



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Se N 98 / 86 B

U.F.R. S.T.M.P.

Ecole doctorale : Sciences de la Terre



FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSE

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré - Nancy I

en

PÉDOLOGIE

par

Delphine ARAN

ANDOSOLISATION DANS LES HAUTES VOSGES

*CONDITIONS DE DÉVELOPPEMENT ET COMPARAISON
AVEC LES AUTRES PROCESSUS DE PÉDOGENÈSE*

Soutenue publiquement le 4 septembre 1998 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :

MM. A. J. HERBILLON	Professeur à l'Université Henri Poincaré - Nancy I	Président
P. BUURMAN	Professeur à l'Université d'Agriculture de Wageningen (Pays-Bas)	Rapporteur
J. M. HETIER	Chargé de Recherches à l'ORSTOM, Montpellier	Rapporteur
M. GURY	Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré - Nancy I	Directeur
P. FAIVRE	Professeur à l'Université de Savoie	Examineur
B. HAGUENAUER	Professeur à l'Université Henri Poincaré - Nancy I	Examineur
E. JEANROY	Ingénieur de Recherches au CNRS, Nancy	Examineur



C.N.R.S. Centre de Pédologie Biologique

UPR 6831 associée à l'Université Henri Poincaré - Nancy I
17, rue Notre-Dame des Pauvres - BP 5
54 501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex



A ma Grand-Mère

Avant-propos

Au moment où s'achève ce travail, il m'est agréable de remercier tous ceux qui m'ont accueillie, dirigée et conseillée.

Je suis très reconnaissante envers M. Adrien HERBILLON pour son soutien et l'attention bienveillante qu'il a portée à la réalisation de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à M. Michel GURY pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder et pour toute l'aide, la sollicitude, et les précieux conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail. Avec patience et attention, il m'a guidée dans toutes les étapes de cette thèse, du travail de terrain à la phase de rédaction. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mon profond attachement.

Je voudrais également remercier M. Emmanuel JEANROY, qui a pris une part active à l'orientation de ce travail, pour son aide efficace et attentive, sa disponibilité et ses encouragements. Sa collaboration amicale, ses compétences et son enthousiasme m'ont été très précieux.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. Jean-Marie HETIER qui a accepté d'être l'un des rapporteurs et qui a été un interlocuteur éclairé et bienveillant.

J'exprime toute ma reconnaissance à M. Peter BUURMAN, également rapporteur, qui a bien voulu s'intéresser à ce travail.

Je remercie enfin les membres du jury, M. Pierre FAIVRE et M. Bernard HAGUENAUER, de me faire l'honneur de juger cette thèse.

Ma reconnaissance va aussi à toutes les personnes qui, au Centre de Pédologie Biologique comme à l'extérieur, m'ont apporté leur concours et dont la gentillesse et les compétences ont contribué au bon déroulement de ce travail. Il m'est impossible de toutes les citer mais qu'elles trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Je n'oublie pas dans ces remerciements toute la joyeuse équipe des étudiants du CPB qui m'ont toujours épaulée et encouragée avec gentillesse et gaieté : Cécile QUANTIN, Valérie TONIAZZO, Philippe BINET, Sébastien STEMMLER, Laure METZGER, Ouafae MAITAT, Véronique GOMENDY; mais également Laurent CANER et Jérôme POULENARD, autres amateurs d'Andosols...

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 - CADRE DE L'ÉTUDE	
Introduction	3
Chapitre I - Principes de Classification des Andosols	5
I. Historique.....	5
II. Les Principales Classifications.....	6
A. La Soil Taxonomy.....	6
B. La Classification FAO - Unesco.....	7
C. Le World Reference Base for Soil Resources	9
D. Le Référentiel Pédologique.....	11
III. Conclusions.....	13
Chapitre II - Répartition géographique des Andosols	15
I. Distribution des Andosols dans le Monde.....	15
A. Asie - Océane - Pacifique.....	16
B. Amérique.....	19
C. Afrique.....	22
D. Europe et îles atlantiques.....	24
E. France.....	26
II. Précédentes Études Réalisées sur les Andosols des Vosges.....	28
III. Conclusions.....	32
Chapitre III - Physiographie du Massif Vosgien	35
I. Topographie.....	35
II. Cadre Géologique	36
A. Généralités	36
B. Formations étudiées.....	37
1. Terminologie	37
2. Les Vosges méridionales.....	40
3. Les Vosges septentrionales.....	42
III. Climat.....	45
A. Précipitations	45
B. Températures	45
C. Bilan hydrique.....	45
D. Types climatiques	47
1. Climat semi-sec.....	47
2. Climat subhumide	47
3. Climat humide.....	47
IV. Végétation	48
V. Pédogenèse.....	49
1. Les sols.....	49
a. Sols brunifiés	49
b. Sols podzolisés.....	51
2. Pédogenèse.....	51
a. Brunification	53
b. Podzolisation modérée	53
c. Podzolisation accentuée.....	54

2 - MISE EN ÉVIDENCE ET CARACTÉRISATION DES ANDOSOLS DANS LES VOSGES

Introduction.....	55
Chapitre I - Matériel et méthodes	57
I. Prospection et logique de l'échantillonnage.....	57
A. Choix des stations.....	57
B. Échantillonnage.....	57
II. Méthodes d'étude	58
A. Recherche des propriétés andiques	58
B. Analyses complémentaires.....	59
C. Caractérisation approfondie des Andosols.....	60
Chapitre II - Recherche des Propriétés Andiques.....	63
Chapitre III - Caractères généraux des Andosols des Vosges.....	65
I. Propriétés andiques.....	65
II. Caractérisation des Andosols dans les Vosges.....	67
A. Caractères stationnels	67
B. Morphologie.....	67
C. Extractions chimiques sélectives	70
D. Constituants organiques	75
E. Propriétés physico-chimiques	78
F. Propriétés physiques.....	81
G. Constituants minéraux.....	84
III. Conclusions.....	90
IV. Classification.....	91
A. La Soil Taxonomy.....	91
B. La Classification FAO - UNESCO.....	92
C. Le Référentiel Pédologique.....	92
D. Le World Reference Base.....	92
Chapitre IV - Les intergrades andiques.....	93
I. Propriétés andiques.....	93
II. Autres Propriétés.....	95
III. Classification	95
IV. Conclusions.....	96
Chapitre V - Limites et facteurs de l'andosolisation dans le Massif Vosgien.....	97
Chapitre VI - Conclusions	103

3 - ÉTUDE COMPARÉE DES ANDOSOLS ET DES AUTRES SOLS DES VOSGES

Introduction.....	105
-------------------	-----

Chapitre I - Matériel et méthodes	107
I. Inventaire et échantillonnage.....	107
II. Choix des stations.....	107
III. Méthodes d'étude	108
A. Analyse des éléments totaux.....	108
B. Caractérisation des matières organiques.....	108
C. Extraction HCl.....	113
Chapitre II - Constituants et Propriétés.....	115
I. Extractions chimiques sélectives	115
A. Andosol de référence (Chaîne des Puys).....	115
B. Sols du Massif Vosgien.....	118
C. Conclusions.....	123
II. Complexe d'échange.....	124
A. Andosol de référence (Chaîne des Puys).....	124
B. Sols du Massif Vosgien.....	125
C. Conclusions.....	127
III. Constituants minéraux.....	127
A. Texture.....	127
B. Éléments totaux	130
IV. Constituants organiques	135
A. Carbone et azote	135
B. Densités optiques des extraits oxalate et HCl.....	136
C. Caractérisation des matières organiques	137
Chapitre III - Limites et analogies des différents processus de pédogenèse.....	145
Conclusions.....	151

4 - DYNAMIQUE DES ASSOCIATIONS ORGANO-MINÉRALES

Introduction.....	153
Chapitre I - Matériel et méthodes	155
1. Tests de désagrégation.....	155
2. Tests de biodégradation	155
3. Mesures d'activité du ¹⁴ C des MO.....	156
4. Tests de dispersion.....	157
5. Analyse des solutions du sol.....	157
6. Confection de lames minces.....	158
7. Analyses statistiques.....	158
Chapitre II - Stabilité des associations organo-minérales.....	159
I. Stabilité structurale.....	159
A. Introduction	159
B. Caractérisation de la stabilité structurale	161
II. Stabilité Biologique.....	164
A. Introduction	164
B. Cinétiques de minéralisation du C.....	165
III. Datations au ¹⁴ C des MOS.....	168

A. Introduction	168
B. Temps moyens de résidence du C	168
IV. Conclusions.....	170
Chapitre III - Dynamique des associations organo-minérales.....	171
I. Aptitude à la dispersion des particules	171
II. Transferts par les solutions du sol.....	173
A. Remarques générales.....	173
B. Caractéristiques des solutions du sol	175
III. Micromorphologie	177
A. Description micromorphologique.....	177
B. Interprétations	179
IV. Conclusions.....	181
Chapitre IV - Conclusions : Fonctionnement actuel.....	183
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	185
BIBLIOGRAPHIE	193

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 - Propriétés de Sol Andique pour des valeurs intermédiaires de $A_{lo} + 1/2Fe_o$ (0,4 - 2 %) dans la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994).....	8
Fig. 2 - Définition des horizons vitr-andiques et non vitr-andiques pour des valeurs intermédiaires de $A_{lo} + 1/2Fe_o$ (0,4 - 2 %) dans le WRB (Shoji et al., 1996).....	8
Fig. 3 - Classification des Andosols dans le Référentiel Pédologique (AFES, 1995).....	12
Fig. 4 - Distribution globale des Andosols.....	15
Fig. 5 - Représentation schématique de la composition binaire de la fraction argileuse des Andosols (Mizota & van Reeuwijk, 1989).....	33
Fig. 6 - Coupe géologique schématique du Massif Vosgien.....	36
Fig. 7 - Carte géologique simplifiée du socle vosgien (d'après Fluck et al., 1987).....	39
Fig. 8 - Carte géologique simplifiée des Vosges méridionales.....	
Fig. 9 - Variations climatiques du versant lorrain au versant alsacien.....	46
Fig. 10 - Données climatiques de la station Gsang.....	46
Fig. 11 - Climats régionaux du Massif Vosgien (d'après Cachan, 1974).....	
Fig. 12 - Chaîne de sols dans les Hautes Vosges cristallines. Cas d'un versant simple (Robinot).....	52
Fig. 13 - Chaîne de sols dans les Hautes Vosges cristallines. Cas d'un versant complexe (Forêt des Hospices de Nancy).....	52
Fig. 14 - Dissolutions sélectives sur la fraction de terre fine des deux Andosols par les différents réactifs.....	72
Fig. 15 - Répartition du carbone total (Corg) et du carbone extrait au pyrophosphate (Cpyro) dans les deux profils de Château-Lambert et Gsang.....	76
Fig. 16 - Distribution du rapport C/N (a) et de la Densité Optique de l'Extrait Oxalate (DOEO) (b) des deux profils de Château-Lambert et Gsang.....	76
Fig. 17 - Distribution des cations échangeables dans les profils de Château-Lambert et Gsang.....	80
Fig. 18 - Granulométrie des profils de Château-Lambert et Gsang.....	82
Fig. 19 - Diagramme de texture des profils de Château-Lambert et Gsang.....	82
Fig. 20 - Diagramme DRX de la roche mère de Gsang.....	84
Fig. 21 - Diagrammes DRX des fractions limoneuses de Gsang.....	86
Fig. 22 - Diagrammes DRX des fractions argileuses de Gsang.....	87
Fig. 23 - Diagrammes DRX des fractions limoneuses de Château-Lambert.....	88
Fig. 24 - Diagrammes DRX des fractions argileuses de Château-Lambert.....	89
Fig. 25 - Organigramme du fractionnement des matières organiques des sols.....	114
Fig. 26 - Distribution de Al, Fe et Si extraits par l'oxalate dans les sols sur roche volcanique.....	120
Fig. 27 - Distribution de Al, Fe et Si dans l'extrait oxalate des sols sur granite (d'après Jeanroy, 1983).....	121
Fig. 28 - Distribution des cations échangeables dans les sols étudiés.....	126
Fig. 29 - Répartition des particules dans les différentes classes granulométriques des sols étudiés.....	128
Fig. 30 - Relations entre la réserve totale en bases (RTB) et la teneur en SiO_2 (toutes deux rapportées à la fraction minérale) dans les roches mères.....	134
Fig. 31 - Évolution des densités optiques des extraits oxalate et HCl N des sols étudiés.....	138
Fig. 32 - Distribution du carbone extrait par HCl N des sols sur granite (d'après Jeanroy, 1983).....	139
Fig. 33- Répartition du carbone dans les principaux horizons des sols étudiés.....	140
Fig. 34 - Diagrammes densité optique de l'extrait oxalate maximum et $A_{lo}+1/2Fe_o$ (%) maximum en fonction des valeurs minimales rencontrées dans un horizon sus-jacent.....	149
Fig. 35 - Schéma du dispositif d'incubation.....	156
Fig. 36 - Profils de stabilité structurale des sols vosgiens.....	160
Fig. 37 - Relations entre le taux d'agrégats stables à l'eau et la teneur en C (a) et en Al oxalate (b) des sols vosgiens.....	162
Fig. 38 - Courbes cumulatives de minéralisation du carbone des sols vosgiens lors d'une incubation à 20°C pendant 6 semaines.....	166
Fig. 39 - Test de dispersion à l'eau en fonction du rapport de dilution sol/eau.....	172
Fig. 40 - Variations saisonnières du pH des eaux gravitaires et de rivière de l'Andosol vosgien.....	175
Fig. 41 - Rôle de la roche mère dans l'orientation de la pédogenèse.....	191
Fig. 42 - Rôle de la roche mère sur l'intensité de l'andosolisation.....	191

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 - Principales propriétés des horizons de référence des Andosols et des Vitrosols dans le Référentiel Pédologique (AFES, 1995).....	13
Tab. 2 - Conditions environnementales et propriétés générales de quelques Andosols dans le monde.....	18
Tab. 3 - Quelques caractéristiques générales de sols de la région du Velay-Vivarais-Coirons d'après Moinereau (1977).	28
Tab. 4 - Quelques caractéristiques de sols andiques des Vosges d'après Duchaufour & Souchier (1966b) et Hetier (1968).....	31
Tab. 5 - Sols dérivés de cendres volcaniques sous différentes combinaisons de régimes de température (T) et d'humidité (H) du sol selon Parfitt (1990).	33
Tab. 6 - Stratigraphie simplifiée de l'ère primaire dans les Vosges.....	44
Tab. 7 - Valeurs de la somme (Alo + 1/2Feo) dans les deux niveaux de prélèvement.....	64
Tab. 8 - Valeurs de la densité apparente (Da) et de la rétention des phosphates (Rét.P) dans les deux niveaux de prélèvement.....	65
Tab. 9 - Dissolution de Al, Fe et Si dans diverses fractions de sols selon différents traitement (d'après Wada, 1989).....	71
Tab. 10 - Quelques données des dissolutions sélectives de Château-Lambert et Gsang.....	73
Tab. 11 - Valeurs de l'indice mélanique (Im) et de Al éch. dans les deux niveaux de prélèvement.	77
Tab. 12 - Valeurs du pH (H ₂ O, KCl et NaF) et de la rétention des phosphates (Rét.P) des profils de Château-Lambert et de Gsang.....	78
Tab. 13 - Quelques pH _{H2O} et pH _{KCl} rencontrés dans divers types d'Andosols.....	79
Tab. 14 - Teneurs en eau dans les deux niveaux de prélèvement.....	83
Tab. 15 - Propriétés physiques et chimiques des profils ne vérifiant pas les critères andiques.	94
Tab. 16 - Données des extractions sélectives des profils ne vérifiant pas les critères andiques.	94
Tab. 17 - Quelques données des extractions sélectives des sols sur roche volcanique.....	116
Tab. 18 - Quelques données des extractions sélectives des sols sur granite (d'après Jeanroy, 1983).	117
Tab. 19 - Acidité des sols sur roches volcaniques étudiés.	125
Tab. 20 - Valeurs de la Réserve Totale en Bases (RTB), rapportée à la fraction minérale, des horizons et roches mères étudiés.	133
Tab. 21 - Teneurs en C et rapport C/N des sols sur roches volcaniques étudiés.....	136
Tab. 22 - Caractéristiques principales des MO des horizons étudiés lors d'une extraction (sur la fraction < 50 µm) à NaOH N/10.....	141
Tab. 23 - Equations des droites de régression et charge métallique des sols.....	166
Tab. 24 - Temps moyens de résidence (TMR) des fractions < 50 µm.....	169
Tab. 25 - Composition moyenne des eaux de gravité de sols vosgiens.....	174

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La première mention au terme "Andosol" remonte à la fin de la deuxième guerre mondiale au Japon (SIMONSON, 1979). Ces sols, alors également appelés "sols dérivés de cendres volcaniques", montraient des propriétés originales que l'on rencontrait rarement dans les sols développés sur d'autres matériaux. Ils étaient caractérisés par des profils de couleur sombre, très humifères, de structure micro-grumeleuse floconneuse, et par une abondance de produits dits "amorphes" ou cryptocristallins (c'est-à-dire de faible organisation cristalline), les allophanes. De telles propriétés ont très vite attiré l'attention de la communauté scientifique sur ces sols mais ce n'est que dans les années 1970 que les différentes commissions de classification les ont considérés comme appartenant à une catégorie distincte et les ont placés aux niveaux les plus hauts de la taxonomie.

Les Andosols ne représentent qu'approximativement 0,8 % de la surface du globe (LEAMY, 1984). Cependant, ces sols correspondent à des régions parmi les plus fortement peuplées (parfois jusqu'à plus de 400 habitants / km²) en raison de leur potentiel agricole très élevé lié à leurs propriétés particulières. Ces régions très fertiles et recherchées se rencontrent autour de la plupart des zones d'activité volcanique récente du globe, comme en Indonésie (SHOJI *et al.*, 1993). De tels enjeux impliquent la nécessité de maintenir et d'augmenter la remarquable productivité de ces sols et surtout de s'attacher à leur conservation et à leur protection. Ainsi, la connaissance de la genèse des Andosols et de leurs propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et agronomiques s'est révélée essentielle et a suscité l'intérêt de la communauté des pédologues.

Le processus d'andosolisation a été défini comme une acidolyse ou une complexolyse libérant massivement l'aluminium et le fer sous forme de complexes qui sont immédiatement insolubilisés, immobilisés et stabilisés. En effet, les substances humiques empêchent la cristallisation des gels minéraux et les maintiennent à l'état amorphe. De même, ces composés minéraux amorphes protègent les composés humifiés vis-à-vis de la biodégradation, ceci aboutissant à une accumulation considérable de ces derniers (DUCHAUFOR, 1983). L'andosolisation se développe sous des climats très humides et préférentiellement sur des matériaux pyroclastiques récents. Néanmoins, de nombreux travaux ont montré que ce processus n'était pas limité aux seules roches volcaniques comme on l'a longtemps supposé.

Le petit massif montagneux des Vosges présente une très vaste gamme de roches magmatiques soumises à un environnement dans l'ensemble assez humide et peut offrir par conséquent des sites propices à l'andosolisation et à l'étude de ce processus en milieu tempéré. Dans ce massif, les processus de pédogenèse habituels sont la brunification et la podzolisation. En effet, les sols de la série sols bruns - podzols y sont très bien représentés et ont été abondamment étudiés

(BONNEAU *et al.*, 1978 ; SOUCHIER, 1971). En revanche, seulement quelques travaux réalisés il y a une trentaine d'années font état de sols andiques dans cette région (DUCHAUFOR & SOUCHIER, 1966b ; HETIER, 1968).

A cette époque, le concept d'Andosol souffrait de nombreuses imperfections. En effet, ils étaient décrits comme des sols dérivés exclusivement de matériaux volcaniques (d'où leur assimilation aux "volcanic ash soils") et dont la fraction minérale était constituée essentiellement d'allophanes. Or, il est apparu que les techniques d'étude de ces composés alors utilisées pouvaient conduire à une surestimation des allophanes. Par ailleurs, la découverte d'Andosols non allophaniques au Japon (SHOJI *et al.*, 1985) ou dérivés de roches non volcaniques (GARCIA-RODEJA *et al.*, 1987) a conduit les différentes commissions de classification à adopter de nouveaux critères de classification de ces sols.

Ainsi, à la lumière de ces récents travaux, il nous a paru utile de ré-examiner la question de l'existence d'Andosols dans le Massif Vosgien et de préciser les conditions de développement du processus d'andosolisation par rapport aux deux autres processus prévalant dans cet environnement, brunification et podzolisation.

Ce mémoire s'organise en quatre grandes parties :

La première partie retrace l'évolution des concepts relatifs à la définition des Andosols et donne les bases des classifications actuelles. Elle se poursuit par une analyse de la distribution de ces sols à l'échelle du globe. Enfin, nous exposons le cadre environnemental (géographique, géologique et pédologique) dans lequel cette étude a été réalisée.

La seconde partie traite de l'existence d'Andosols dans les Vosges. Nous énonçons brièvement les critères choisis pour cette reconnaissance et la prospection des sites. Puis nous nous attachons à caractériser les Andosols mis en évidence, ainsi que des sols ne satisfaisant pas totalement aux critères. Ceci nous permet d'aborder les causes et facteurs limitants de l'andosolisation dans les Vosges.

La troisième partie est consacrée à une étude approfondie des propriétés générales de ces Andosols vosgiens au regard de celles des sols de la série sols bruns - podzols, plus représentatifs de cet environnement. Elle cherche par ailleurs à faire ressortir les particularités de l'Andosolisation dans ce même environnement.

Enfin, la quatrième partie aborde l'aspect fonctionnement actuel des Andosols vosgiens et des autres sols étudiés en se focalisant plus particulièrement sur la stabilité et la dynamique de leurs constituants organo-minéraux.

Première partie

CADRE DE L'ÉTUDE

INTRODUCTION

Le but de cette première partie est de dresser le cadre général dans lequel cette étude a été menée et s'articule en trois chapitres.

Un premier aspect de cette étude porte sur la mise en évidence de l'existence, dans les Vosges, d'Andosols répondant aux nouveaux critères de classification. Il fallait donc rappeler dans le premier chapitre l'évolution des concepts relatifs aux Andosols durant les vingt dernières années ainsi que les nouvelles définitions de ces sols utilisées dans les principaux systèmes de classification.

Dans un second chapitre nous traiterons de la répartition des Andosols dans le monde, en donnant un bref aperçu de leurs propriétés générales empruntées à la littérature. Puis nous nous focaliserons sur les précédentes études, relativement anciennes, qui ont été réalisées sur les Andosols dans le Massif Vosgien.

Enfin, nous nous attacherons, dans le troisième chapitre, à la description des différents facteurs de formation des sols (géologie, topographie, climat et végétation) et aux grands processus de pédogenèse dans le Massif Vosgien.

CHAPITRE I - PRINCIPES DE CLASSIFICATION DES ANDOSOLS

I. HISTORIQUE

Le terme "ando sol" est né après une campagne de reconnaissance des sols menée par les scientifiques américains au Japon, entre 1945 et 1949 (SIMONSON, 1979). Au cours de cet inventaire, il apparut que les sols dérivés de cendres volcaniques, les "volcanic ash soils", montraient des propriétés telles qu'ils ne correspondaient à aucun des Grands Groupes de sols de la classification américaine alors en vigueur ; il fut ainsi décidé de les ranger dans un nouveau Grand Groupe, les "ando sols". Un trait frappant dans ces sols était la présence d'un horizon A₁ épais et noir, riche en matière organique, à l'origine de leur nom (du japonais "an" signifiant noir et "do" sol). Le terme "ando", utilisé pour la première fois par THORP & SMITH en 1949 (*in* SIMONSON, 1979), a ensuite été repris par les différents systèmes de classification.

Les propriétés originales de ces sols ont pendant longtemps été considérées comme résultant de la présence, dans leur fraction fine, de quantités appréciables de composés "amorphes" (produits par l'hydrolyse des verres volcaniques) sur lesquels les composés organiques étaient adsorbés et stabilisés. Cette accumulation de produits amorphes est liée au fait que l'argilogenèse est limitée dans ces sols à deux phases (prépédologique et tardive) séparées par une période d'inhibition durant laquelle des composés non ou peu cristallins peuvent se former (HETIER *et al.*, 1977). Dans la classification américaine la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1975), ils sont rattachés aux Inceptisols et appartiennent au Sous-Ordre des Andepts. Ils sont caractérisés par une faible densité apparente ($D_a < 0,85 \text{ g.cm}^{-3}$) et un complexe d'échange dominé par des matériaux "amorphes" et/ou sont constitués en grande majorité (plus de 60 %) de matériaux pyroclastiques vitreux, cendres *etc...* Ils présentent sensiblement les mêmes propriétés dans la Légende de la Carte Mondiale des Sols (FAO, 1975) où ils font partie de l'Unité Andosols. Dans la classification française, établie par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS, 1967), ces sols constituent la Classe des Andosols et présentent, dans leur fraction minérale, une grande abondance de produits "amorphes", les allophanes, associés à des teneurs généralement élevées de matière organique.

En 1978, SMITH (*in* PARFITT & CLAYDEN, 1991), estimant que les critères conduisant à l'identification des Andepts ainsi que leur placement taxonomique sont peu satisfaisants, propose de classer ces Andepts et les sous-groupes andiques au niveau du nouvel Ordre des Andisols dans la Soil Taxonomy. Cette proposition sera d'ailleurs le point de départ des travaux d'un comité international chargé de la classification de ces sols dans la Soil Taxonomy, l'ICOMAND (International Committee on the Classification of Andisols). SMITH considère ces sols comme dérivant de matériaux volcaniques et présentant un complexe d'échange dominé soit par des composés constitués d'Al et Si amorphes aux rayons X et de l'humus, soit par une matrice vitreuse. Cette distinction

conduisit, en 1983, à l'élaboration d'une définition des Andisols en termes de "propriétés de sol andique" et "propriétés de sol vitrique". Pour ces derniers, la matrice est dominée par des verres et les teneurs en Al extrait par l'oxalate $Al_o \geq 0,4 \%$. Pour les premiers, la Da est inférieure à $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$, la rétention des phosphates Rét.P > 85 % et $Al_o \geq 2 \%$. Un troisième volet fut ajouté à cette définition en 1984, lors du 6^e Congrès International de Classification des Sols (Chili et Equateur), pour inclure les sols à propriétés intermédiaires (teneur en verre entre 5 et 30 % et Al_o entre 0,4 et 2 %).

Au fur et à mesure de l'élaboration de la définition de ce nouvel Ordre, on s'aperçut qu'en réalité les matériaux dits "amorphes" de ces sols étaient constitués de minéraux à organisation cristalline à courte distance, allophanes, imogolite, ferrihydrite et/ou de complexes Al-matière organique (MO). Il fut d'ailleurs mis en évidence que certains Andisols, notamment au Japon, devaient leurs propriétés non pas à la présence de minéraux à organisation cristalline à courte distance mais à l'existence de tels complexes ; ils furent ainsi qualifiés de "non allophaniques" (SHOJI & ONO, 1978 ; SHOJI & FUJIWARA, 1984 ; SHOJI *et al.*, 1985 ; SHOJI & OTOWA, 1988). De tels Andisols non allophaniques furent ensuite observés en dehors du Japon (BAHAM & SIMONSON, 1985 ; HUNTER *et al.*, 1987 ; MADEIRA *et al.*, 1994). Enfin, les travaux de GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) établirent l'existence d'Andisols développés sur des matériaux d'origine non volcanique en Galice, présentant les mêmes propriétés que les Andisols non allophaniques décrits au Japon par SHOJI *et al.* (1985). De tels Andisols non volcaniques et non allophaniques ont été rencontrés dans d'autres régions comme au Népal (BAUMLER & ZECH, 1994). Ainsi, l'appellation "volcanic ash soil" souvent utilisée comme équivalent d'Andisol est à utiliser avec précaution car elle ne rend pas compte de ces sols développés sur roches non volcaniques.

Aujourd'hui, les différentes classifications s'accordent pour placer ces sols au niveau le plus haut de la taxonomie et un consensus s'est établi quant à leurs critères de reconnaissance. Nous rappelons ci-dessous les définitions actuellement en vigueur dans les différents systèmes de classification.

II. LES PRINCIPALES CLASSIFICATIONS

A. LA SOIL TAXONOMY

Dans la dernière version de la classification américaine (SOIL SURVEY STAFF, 1994) ces sols apparaissent directement au niveau de l'ordre des Andisols. Cette catégorie consiste en un ensemble de sols dont les propriétés reflètent ou résultent d'un ou de plusieurs groupes de processus pédogénétiques majeurs (ARNOLD, 1988). L'ordre des Andisols se présente en troisième position dans la clef, après l'ordre des Histosols et des Spodosols. Ils sont définis comme des sols présentant des propriétés andiques sur 60 % ou plus de l'épaisseur suivante : (i) soit dans les 60 cm supérieurs du sol

minéral à condition qu'il n'y ait pas de contact lithique ou paralithique, de duripan ou d'horizon pétrocalcique sur cette épaisseur, (ii) soit dans l'épaisseur comprise entre la surface du sol minéral et un de ces contacts. Ceci correspond, en l'absence de tout contact, à une épaisseur minimale de 36 cm dans les 60 cm supérieurs du sol.

Pour être reconnu comme possédant des propriétés andiques, un matériau pédologique doit contenir moins de 25 % (en poids) de carbone organique (Corg) et rencontrer une des deux exigences suivantes :

1) dans la fraction de terre fine, toutes les propriétés suivantes :

- $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0$ % (extraits à l'oxalate d'ammonium pH 3), et
- une $Da \leq 0,90$ g.cm⁻³ (mesurée à une tension d'humidité de 33 kPa), et
- une rétention des phosphates Rét.P ≥ 85 % (par la méthode Blakemore) ; ou

2) dans la fraction de terre fine, présenter une Rét.P ≥ 25 %, 30 % ou plus de particules comprises entre 0,02 - 2,0 mm et une des propriétés suivantes :

- $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 0,40$ % et, dans la fraction 0,02 - 2,0 mm, 30 % ou plus de verres volcaniques ; ou
- $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0$ % et, dans la fraction 0,02 - 2,0 mm, 5 % ou plus de verres volcaniques ;
ou
- $Al_0 + 1/2Fe_0$ compris entre 0,40 et 2,0 % et, dans la fraction 0,02 - 2,0 mm, suffisamment de verres volcaniques pour que le point d'abscisse ($Al_0 + 1/2Fe_0$) et d'ordonnée (% de verres dans la fraction 0,02 - 2,0 mm) se trouve dans la zone grisée de la Fig. 1.

Les deux points de cette définition correspondent en fait dans l'ensemble aux anciennes définitions des "propriétés andiques" (1) et "propriétés vitriques" (2), auxquelles on a rajouté ($1/2Fe_0$) à la valeur de Al_0 . Les sous ordres concernent une catégorie de sols dont les propriétés supplémentaires reflètent ou résultent d'un contrôle majeur du processus pédogénétique actuel (ARNOLD, 1988). Se succèdent ainsi : Aquands (conditions aquiques), Cryands (régime de température cryique ou pergélique), Torrands (régime hydrique aridique), Xérands (régime hydrique xérique), Vitrandes (texture grossière et Rétention en eau à 1500 kPa < 15 % sur échantillon sec et < 30 % sur échantillon non séché), Ustands (régime hydrique ustique), Udands (régime hydrique udique).

B. LA CLASSIFICATION FAO - UNESCO

La légende révisée de la carte mondiale des sols au 1:5000000^{ème} éditée par la FAO en 1990, reprise dans le livre "The Major Soils of the World" (DRIESSEN & DUDAL, 1991), distingue divers "Major Soil Groupings" (MSG). Parmi l'ensemble des sols dont la formation est conditionnée par les propriétés particulières de leur matériau parental apparaît le MSG des Andosols.

Fig. 1 - Propriétés de Sol Andique pour des valeurs intermédiaires de $Al_0 + 1/2Fe_0$ (0,4 - 2 %) dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994).

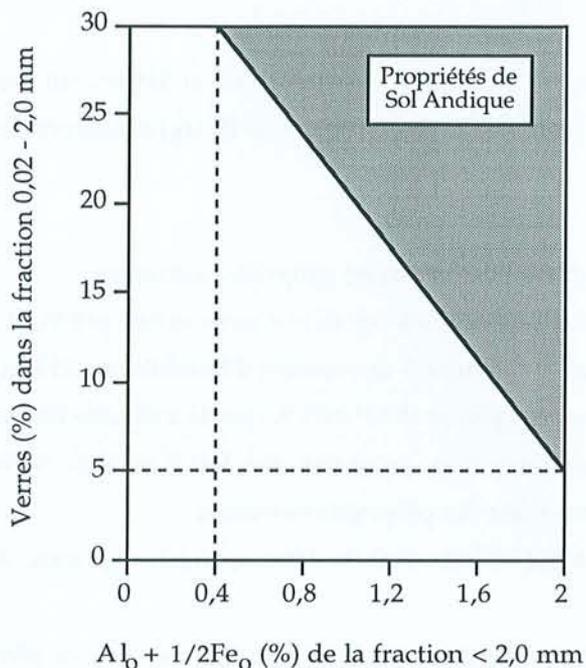
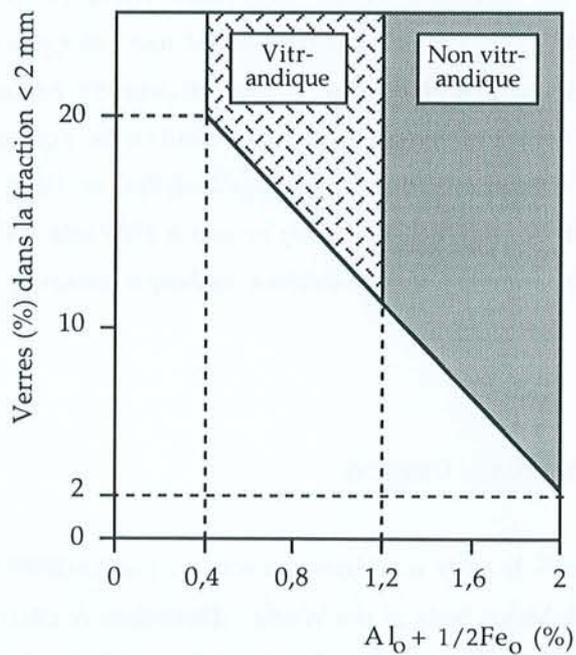


Fig. 2 - Définition des horizons vitr-andiques et non vitr-andiques pour des valeurs intermédiaires de $Al_0 + 1/2Fe_0$ (0,4 - 2 %) dans le WRB (SHOJI *et al.*, 1996).



Ce MSG se rencontre en 8^{ème} position dans la clef de cette classification et les Andosols sont définis comme des sols présentant des propriétés andiques sur une profondeur d'au moins 35 cm à partir de la surface et ayant un horizon A mologique ou umbrique pouvant surmonter un horizon B cambique, ou un horizon A ochrique et un B cambique. Ils ne doivent pas montrer d'autres horizons diagnostiques, de propriétés gléiques sur les 50 cm supérieurs, de caractéristiques diagnostiques des Vertisols ni de propriétés saliques.

Les propriétés andiques s'appliquent aux matériaux rencontrant au moins une des trois conditions suivantes :

- 1) • $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0$ % de la fraction de terre fine, et
 - $Da \leq 0,9$ g.cm⁻³ de la fraction de terre fine, et
 - Rét.P > 85 %.
- 2) • Plus de 60 % (volume) du sol constitué de matériaux volcanoclastiques de plus de 2 mm et
 - $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 0,40$ % de la fraction de terre fine.
- 3) La fraction 0,02-2,0 mm constitue au moins 30 % de la fraction de terre fine et rencontre une des conditions suivantes :
 - si la fraction de terre fine a une valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0 \leq 0,40$ %, au moins 30 % de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2,0 mm ; ou
 - si la fraction de terre fine a une valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0$ %, au moins 5 % de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2,0 mm ; ou
 - si la fraction de terre fine a une valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ entre 0,40 et 2,0 %, une teneur proportionnelle de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2,0 mm (entre 5 et 30 %).

Dans les différentes unités de sol se rencontrent les Andosols :

- géliques : ayant un permafrost dans les 200 cm supérieurs,
- gleyiques : montrant des propriétés gleyiques dans les 100 cm supérieurs,
- vitriques : sans consistance gluante et/ou une texture sablo-limoneuse ou plus fine dans les 100 cm supérieurs,
- mologiques : ayant un horizon A mologique,
- umbriques : ayant un horizon A umbrique,
- haplique : autres.

C. LE WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES

Un des objectifs principaux du World Reference Base for Soil Resources (WRB, SPAARGAREN, 1994) est de développer une base internationale pour la description des ressources en sols en se fondant sur la légende révisée de la carte mondiale des sols de la FAO. De ce fait le WRB utilise sensiblement les mêmes MSG que la FAO, dont celui des Andosols qui apparaît en 9^{ème} position dans la clef.

Ils sont définis comme des sols ayant un horizon andique débutant dans les 30 cm supérieurs du profil et n'ayant aucun horizon diagnostique (à moins qu'il ne soit enfoui) autre qu'un horizon histique, mollique, umbrique ou ochrique, ou un horizon cambique, mais ces horizons doivent montrer des propriétés andiques au moins dans les 50 premiers cm depuis la surface. Les horizons andiques comportent trois sous-types :

- horizon vitr-andique : horizon dominé par des verres volcaniques et autres minéraux primaires (> 60 %) et présentant une valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ comprise entre 0,4 et 2 %,
- horizon sil-andique : horizon constitué principalement d'allophanes et de minéraux similaires et présentant les caractères suivants : $Al_0 + 1/2Fe_0 > 2$ %, $Si_0 \geq 0,6$ %, $Al_p/Al_0 < 0,5$, Al échangeable < 2 cmol/kg de la terre fine, $pH_{H_2O} > 4,5$ si C > 5 % ou $pH_{H_2O} > 5,0$ si C < 5 %.
- horizon alu-andique : horizon où les complexes organo-sesquioxides dominent et présentant les caractères suivants : $Al_0 + 1/2Fe_0 > 2$ %, $Si_0 < 0,6$ %, $Al_p/Al_0 > 0,5$, Al échangeable (Al éch.) > 2 cmol/kg de la terre fine, $pH_{H_2O} < 4,5$ si C > 5 % ou $pH_{H_2O} < 5,0$ si C < 5 %.

La teneur en Si_0 (extrait par l'oxalate d'ammonium) permet d'estimer la quantité de minéraux allophaniques et le rapport Al_p/Al_0 (Al_p : extrait au pyrophosphate) permet d'établir si l'Al est majoritairement complexé par des composés organiques ($Al_p/Al_0 > 0,5$) ou s'il entre plutôt dans la structure de minéraux allophaniques ou d'oxyhydroxydes ($Al_p/Al_0 < 0,5$).

Récemment ces différents critères ont été réévalués par SHOJI *et al.* (1996) à l'aide de la base de données mondiale des Andosols et quelques modifications ont été apportées. Par exemple, les critères de Si_0 et Al éch. ont été supprimés et la valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ séparant les horizons vitr-andiques des non vitr-andiques a été ramenée à 1,2 % (au lieu de 2 %) car elle correspond à des sols ayant des Rét.P < 70 % ne nécessitant pas de forts apports en P.

Dans cette dernière version, les horizons diagnostiques doivent être épais d'au moins 30 cm et appartenir aux 60 cm supérieurs du sol et,

1) Pour les horizons non vitr-andiques :

- $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 1,2$ %, et
- Rét.P ≥ 70 %, et
 - pour $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0$ %, une $Da < 0,9$ g.cm⁻³ (33 kPa), et
 - pour $Al_0 + 1/2Fe_0$ de 1,2 à 2,0 %, une teneur en verres volcaniques de la fraction de terre fine telle que le point de coordonnées ($Al_0 + 1/2Fe_0$ - verres volcaniques) tombe dans la zone non vitr-andique de la Fig. 2.

Parmi les horizons non vitr-andiques, les horizons alu-andiques montrent un rapport $Al_p/Al_0 \geq 0,5$ dans les 30 cm supérieurs et les horizons sil-andiques ont un $Al_p/Al_0 < 0,5$.

2) Pour les horizons vitr-andiques :

- $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 0,4 \%$, et
- Rét.P $\geq 25 \%$, et
- une teneur en verres volcaniques de la fraction de terre fine telle que le point de coordonnées ($Al_0 + 1/2Fe_0$ - verres volcaniques) se trouve au-dessus de la diagonale de la Fig. 2.

Au second niveau des Unités de sols se trouvent successivement :

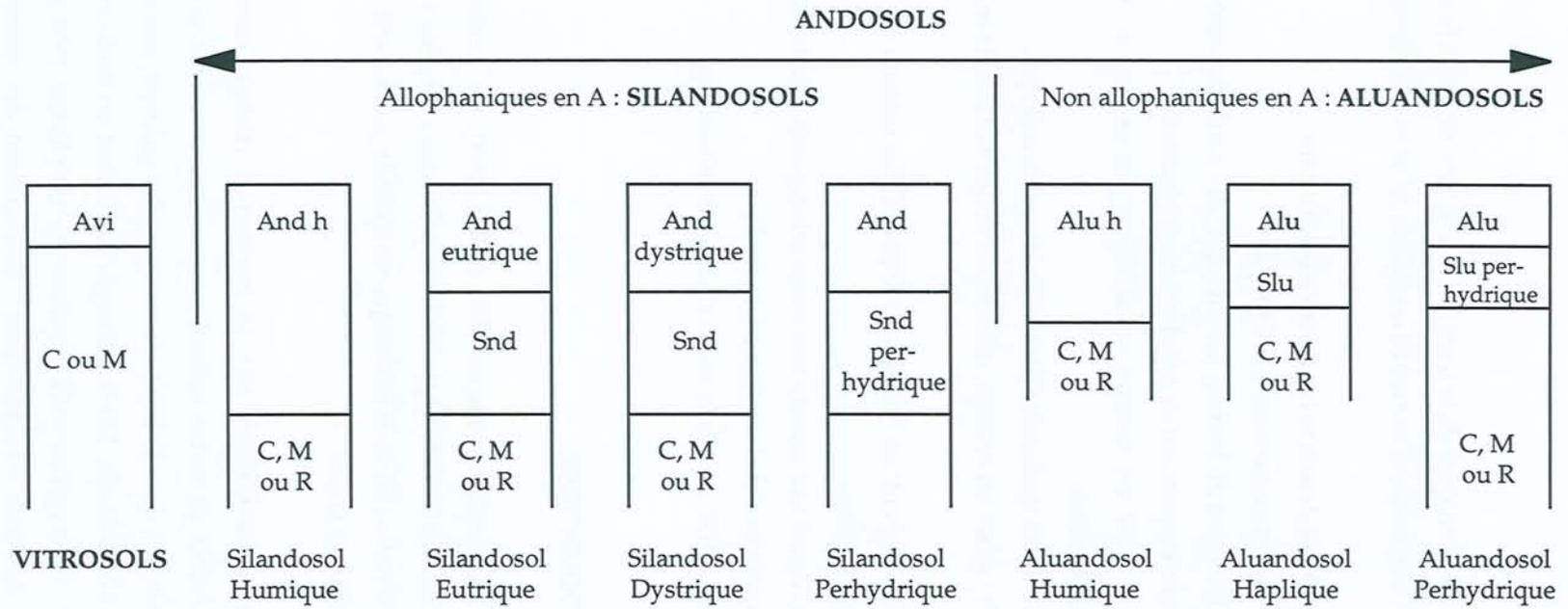
- Andosols vitriques : ayant un horizon vitr-andique,
- mélano-alu Andosols : ayant un horizon alu-andique, des couleurs sombres et des teneurs en Corganique (Corg.) $\geq 6 \%$ avec un minimum de 4 % dans chaque horizon,
- fulvo-alu Andosols : ayant un horizon alu-andique, des teneurs en Corg $\geq 6 \%$ avec un minimum de 4 % dans chaque horizon,
- haplo-alu Andosols : autres Andosols ayant un horizon alu-andique,
- hydro-silic Andosols : ayant un horizon sil-andique et une Rét.eau de la fraction de terre fine (1500 kPa) $\geq 100 \%$,
- mélano-silic Andosols : ayant un horizon sil-andique des teneurs en Corg $\geq 6 \%$ avec un minimum de 4 % dans chaque horizon,
- Andosols eutriques : ayant une somme des bases échangeables de la fraction de terre fine > 15 cmol/kg dans les 30 cm supérieurs de l'horizon sil-andique,
- haplo-silic Andosols : autres Andosols ayant un horizon sil-andique.

D. LE RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE

Dans le Référentiel Pédologique français (RP, AFES, 1995), les Andosols et les Vitrosols apparaissent au niveau des Grands Ensembles de Référence. Ces sols sont caractérisés par la présence d'au moins un horizon de référence (vitrique, silandique ou aluandique) sur une épaisseur d'au moins 30 cm dans les 50 cm supérieurs du profil.

Les vitrosols sont ainsi caractérisés par un horizon A vitrique constitué de matériaux pyroclastiques peu altérés (riches en verres volcaniques et autres minéraux primaires non altérés). Ses autres caractères sont indiqués dans le Tab. 1. Concernant les andosols, une distinction est établie entre les Silandosols et les Aluandosols. Les Silandosols présentent un horizon silandique riche en minéraux secondaires para- ou cryptocristallins comme les allophanes, l'imogolite et l'hisingérite et s'apparentent ainsi aux Andisols allophaniques. Ils montrent des teneurs en $Si_0 > 0,6 \%$ et $Al_p/Al_0 < 0,5$, à l'opposé des Aluandosols, riches en complexes et correspondant au andosols de type non allophanique (Tab. 1). Les Aluandosols sont caractérisés par un horizon aluandique de pH acide où l'Al est principalement complexé par des composés organiques ($Al_p/Al_0 > 0,5$).

Fig. 3 - Classification des Andosols dans le Référentiel Pédologique (AFES, 1995).



D'autres qualificatifs peuvent être ajoutés à ces dénominations (Fig. 3) :

- un caractère perhydrique : propriétés de thixotropie, Rét.eau (1500 kPa) > 100 %, taux de déshydratation irréversible > 70 %,
- humique : C > 6 % et une couleur noire sur plus de 50 cm d'épaisseur,
- eutrique : taux de saturation en bases ≥ 50 % ou somme des cations échangeables alcalins et alcalino-terreux > 15 cmol/kg,
- dystrique : taux de saturation en bases < 50 % ou somme des cations échangeables alcalins et alcalino-terreux < 15 cmol/kg,
- haplique : pas de caractère supplémentaire par rapport à la référence.

Tab. 1 - Principales propriétés des horizons de référence des Andosols et des Vitrosols dans le Référentiel Pédologique (AFES, 1995).

VITROSOL	ANDOSOL			
<i>Horizon A Vitrique</i>	Da < 0,9 g.cm ⁻³			
0,9 < Da < 1,2 g.cm ⁻³	Al _o + 1/2Fe _o > 2 %			
Rét.Eau(1500kPa) < 25 %	SILANDOSOL		ALUANDOSOL	
0,4 < Al _o +1/2Fe _o < 2 %	<i>Horizon Silandique</i>		<i>Horizon Aluandique</i>	
Rét.P < 85 %	Si _o > 0,6 % Al _p /Al _o < 0,5 Al éch. < 2 cmol/kg		Si _o < 0,6 % Al _p /Al _o > 0,5 Al éch. > 2 cmol/kg	
	<i>Horizon And</i>	<i>Horizon Snd</i>	<i>Horizon Alu</i>	<i>Horizon Slu</i>
	Corg ≥ 3 % Sombre ou noir pH _{H2O} > 4,5 Microgrumeleux	Corg > 0,6 % pH _{H2O} > 5,0 Grenu ou polyédrique	Noir Corg ≥ 3 % pH _{H2O} < 4,5 Microgrumeleux	pH _{H2O} < 5,0

III. CONCLUSIONS

Actuellement, les différents systèmes de classification reconnaissent tous l'originalité des Andosols et les placent au niveau le plus haut dans la hiérarchie : Ordre des Andisols de la Taxonomie américaine, Grands Ensembles ou Grands Groupes des Andosols dans les autres classifications. Dans la suite de cette étude c'est ce terme d'Andosol que nous utiliserons, hormis lorsqu'il sera fait référence à la Soil Taxonomy.

La valeur seuil de 2 % de la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ est primordiale dans la définition des Andosols. Elle rend compte de la grande richesse de ces sols en composés "amorphes", l'oxalate d'ammonium tamponné à pH 3 par de l'acide oxalique (méthode de Tamm) permet d'extraire Al et Fe engagés dans la structure de minéraux à organisation cristalline à courte distance (allophanes, imogolite...), d'hydroxydes mal cristallisés et des complexes organiques de l'aluminium et du fer.

Ces diverses classifications distinguent les Andosols à horizon ou propriétés vitriques de ceux présentant un horizon ou des propriétés andiques. Dans le premier cas, des valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$ allant de 0,4 à 2 % sont associées à des teneurs élevées en verres volcaniques. Dans le deuxième cas, la valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ doit être $> 2\%$ sans condition particulière concernant la teneur en verres. Dans la récente révision du WRB toutefois (SHOJI *et al.*, 1996), cette limite s'abaisse à 1,2 % mais, pour des valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$ comprises entre 1,2 et 2 %, le sol doit présenter des teneurs en verres suffisantes (entre 2 et ~ 10 %)

CHAPITRE II - RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES ANDOSOLS

I. DISTRIBUTION DES ANDOSOLS DANS LE MONDE

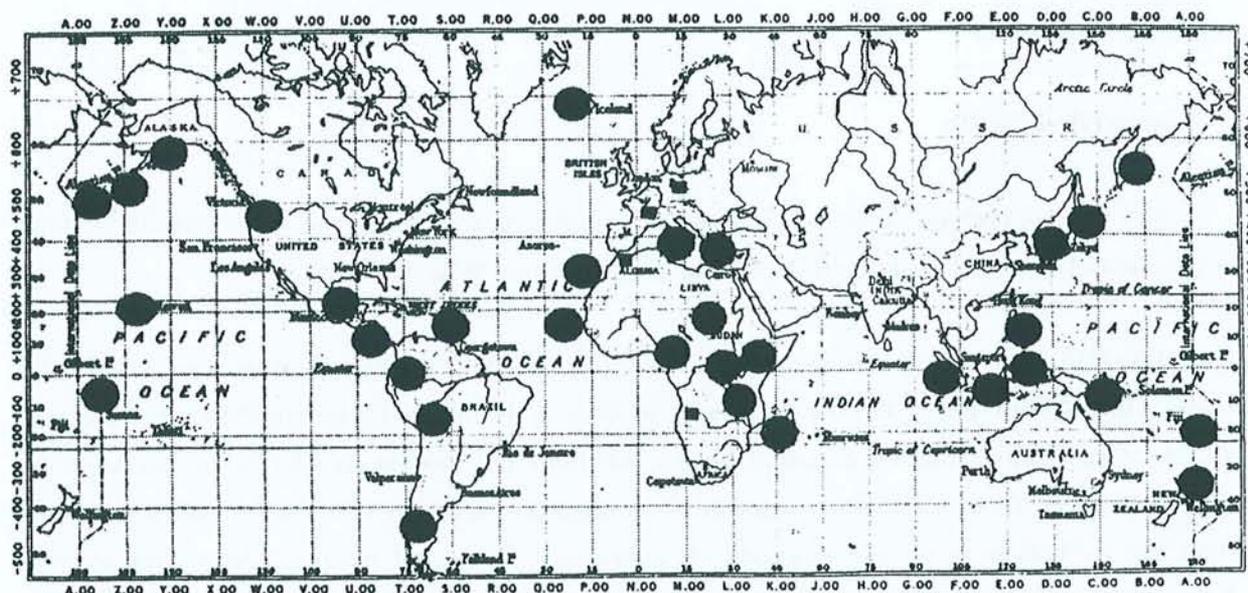
Les Andosols couvrent plus de 100 millions d'hectares dans le monde mais ne représentent que 0,8 % de la surface totale du globe. Environ 80 % de ces sols sont des terres potentiellement cultivables, correspondant à 2 % de la surface totale de ces terres (LEAMY, 1984 ; ARNOLD, 1988 ; DRIESSEN & DUDAL, 1991).

La distribution des Andosols épouse étroitement celle des zones de volcanisme récent ou actif (Fig. 4) : le long de la ceinture de feu du Pacifique, de la ceinture volcanique Alpine-Himalayenne et dans les grandes zones de rifts.

Il n'entre pas dans notre propos d'examiner dans le détail leur répartition aussi nous ne traiterons que de quelques exemples, en partant des régions où ces sols ont été décrits pour la première fois et abondamment étudiés pour nous rapprocher de notre site d'étude. Cette revue géographique nous permettra de dégager les conditions générales d'apparition des Andosols dans le monde. Nous rappellerons brièvement avant chaque paragraphe les principales régions où ces sols ont été rencontrés. Pour une revue bibliographique exhaustive de la répartition de ces sols on se référera à LEAMY (1984) et à MIZOTA & VAN REEUWIJK (1989).

Fig. 4 - Distribution globale des Andosols.

Les zones de forte densité sont représentées par des cercles, celles où l'occurrence de ces sols est mineure par des carrés. D'après LEAMY et al. (1980).



A. ASIE - OCEANIE - PACIFIQUE

Dans cette région du globe, des Andosols ont été répertoriés au Népal, en Chine, Taiwan, Corée, Kamtchaka, Japon, Nouvelle-Zélande, Hawaï, dans les îles du Sud Pacifique, de Samoa, Fidji, Nouvelle-Guinée, au Vanuatu et en Indonésie (LEAMY *et al.*, 1980 ; LEAMY, 1984 ; MORRISSON *et al.*, 1988 ; MIZOTA & VAN REEUWIJK, 1989).

1. Japon

Le Japon est situé dans la zone la plus active de la ceinture de feu du Pacifique et les sols dérivés de cendres volcaniques occupent environ 16 % de la surface du pays (SHOJI & OTOWA, 1988). Les cendres sont principalement andésitiques ou felsiques, riches en verres "non colorés" (indice de réfraction < 1,52) et peuvent s'altérer pour former des Andosols de type non allophanique. Les cendres basaltiques, un peu plus rares, sont dominées par des verres "colorés" (IR > 1,52) et favorisent la formation d'Andosols allophaniques (DAHLGREN *et al.*, 1993).

Les Andosols non allophaniques ont pour la première fois été décrits au Japon et une étude complète des propriétés de ces sols sur des cendres de composition diverse (Tab. 2) a été effectuée par SHOJI *et al.* (1985). Les Andosols non allophaniques ont une morphologie comparable aux Andosols allophaniques. Un caractère notable (commun aux Andosols allophaniques ou non du Japon) est la présence d'un humus épais et très foncé, riche en acides humiques de type A ayant le plus fort degré d'humification. Le développement d'un tel horizon est attribué à la végétation graminéenne (réseau racinaire très dense) et à l'influence de l'Al : dans ces sols, l'Al est en grande partie sous forme de complexes organo-aluminiques. Ces Andosols sont principalement caractérisés par l'absence d'allophanes et d'imogolite et leur fraction argileuse est dominée par des minéraux 2:1 chloritisés. Ils présentent en outre un faible taux de saturation en bases, un pH fortement acide et une forte saturation en Al.

2. Nouvelle-Zélande

Les travaux réalisés sur les sols dérivés de cendres volcaniques en Nouvelle-Zélande se sont notamment attachés à l'étude de la formation des allophanes et de l'halloysite.

PARFITT *et al.* (1983) ont examiné une séquence d'altération sur cendres rhyolitiques en étudiant un sol brun (PMA : 1200 mm), un Andosol (Tab. 2) (Hydric Dystrandept, PMA : 2600 mm) et un sol intermédiaire (Entic Dystrandept, PMA : 1400 mm). Les teneurs en allophanes, imogolite et oxydes de fer croissent avec l'augmentation des précipitations. Le sol brun est caractérisé par une abondance d'halloysite et une pauvreté en allophanes, l'Andosol montre une prédominance d'allophanes. Dans le sol intermédiaire les deux constituants sont présents et la teneur en

allophanes diminue en profondeur accompagnée d'une augmentation en halloysite. De faibles teneurs en Si (dans la solution du sol de l'Andosol) résultent de conditions fortement lixiviantes (fortes précipitations) favorisant la formation d'allophanes alumineux ($Al/Si = 2/1$). Dans le sol brun, soumis à des conditions moins lixiviantes (précipitations plus faibles), les teneurs de Si en solution sont plus importantes et les halloysites ($Al/Si = 1/1$) peuvent être formées. Les travaux de PARFITT *et al.* (1984) ont confirmé ces faits et ont établi pour le drainage une valeur seuil de 200-250 mm/an au-dessus de laquelle les allophanes sont majoritairement formés et les halloysites absentes. PARFITT *et al.* (1983) ont également signalé que, dans le cas de cendres andésitiques, les allophanes ($Al/Si = 2/1$) prédominent sous une large gamme de précipitations, les halloysites étant plus rares. Plus récemment, CRONIN *et al.* (1996) ont observé une coexistence d'allophanes et d'halloysites dans des dépôts andésitiques. Les allophanes, ainsi que de la ferrihydrite, se sont formés par altération des verres andésitiques lorsque les dépôts cendreux se trouvaient près de la surface. Puis, l'enfouissement du sol, accompagné de conditions de faible drainage, ont inhibé leur formation. Le rapport Al/Si de la solution du sol diminue alors et l'halloysite a pu apparaître aux dépens des verres andésitiques.

3. Hawaii

Une particularité remarquable de certains Andosols d'Hawaii est leur grande richesse en ferrihydrite. PARFITT *et al.* (1988) ont étudié quatre sols sur cendres basaltiques soumis à des conditions de précipitations variables (Tab. 2). Sous les conditions les plus sèches (PMA : 1000 mm) le sol présente les plus fortes teneurs en Si total et le minéral dominant est l'halloysite (20 à 40 %), accompagnée de ferrihydrite (10 %), d'hématite (10 %) et d'allophanes (8 %). Sous des conditions légèrement plus humides (PMA : 1500 mm), les allophanes sont prépondérants (25 %) et on trouve de la ferrihydrite (10-15 %), de la gibbsite (2-15 %) et d'autres oxydes de fer (9-11 %). Un régime de température plus chaud (isohyperthermique) associé à un bon drainage et des précipitations abondantes (PMA : 3000 mm) sont responsables de l'apparition de gibbsite en grandes quantités (40-50 %). La ferrihydrite est aussi présente (20 %) ainsi que les allophanes et l'imogolite (13 %). Enfin, les précipitations les plus fortes (PMA : 3800 mm), un bon drainage, des températures moins chaudes (isomésothermique) combinées à des cendres basaltiques ont permis la libération par les minéraux primaires de fer précipitant sous forme de ferrihydrite. Dans ce cas, la ferrihydrite est abondante (10-35 %) accompagnée de gibbsite (2-40 %), d'autres oxydes de fer (9-14 %) et d'allophanes (7-12 %).

4. Nouvelles-Hébrides (Vanuatu)

L'étude des sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides a été menée par QUANTIN (1991). Les Andosols, très étendus, se développent sur des matériaux pyroclastiques récents, autour des cratères en activité ou à activité intermittente, ou encore sur des formations plus anciennes récemment recouvertes par des cendres.

Tab. 2 - Conditions environnementales et propriétés générales de quelques Andosols dans le monde.

Localisation	Roche mère	PMA (mm)	TMA (°C)	C (%)	pH H ₂ O	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p /Al _o
						(%)			
JAPON H	cendres rhyolitiques,	1000 - 3300	7 - 15	11,8	5,0	2,22	1,31	0,22	0,8
NH	dacitiques & andésitiques			2,1	5,2	2,24	1,19	0,83	0,4
N.-ZELANDE *	cendres rhyolitiques	1400 - 2600	12 - 14			3,4 - 8,4	2,0 - 3,1	0,7 - 3,5	0,1 - 0,7
HAWAII *	cendres basaltiques	1000 - 3800		3,1 - 11		4,0 - 7,1	4,5 - 14,4	0,5 - 1,6	< 0,3
NEPAL *	micaschiste	2000 - 2500		4,1 - 14,5	3,9 - 4,7	0,4 - 1,9	1,5 - 2,8	< 0,3	> 1
ETATS-UNIS *	colluvions de roches tuffacées	1500 - 3500	10	1,2 - 8,2	4,9 - 5,1	2,1 - 2,5	2,7 - 4,0	0,1 - 0,2	0,6 - 1,0
COSTA RICA *	sables andésitiques	4100 - 6600	25 - 26	1 - 12	5,3 - 6,7	2,0 - 2,8	0,4 - 0,8		
ANTILLES *	dépôts pyroclastiques	~ 4000		3,1 - 10,6	5,4 - 5,5	3,1 - 8,1	1,6 - 2,7	0,7 - 3,4	0,8 - 0,1
RWANDA *	cendres basiques	> 1200	> 16	5,4 - 9,9	6,2 - 6,7	4,3 - 6,7			0,1 - 0,2
ISLANDE *	cendres et matériaux éoliens	700 - 1400	2 - 6	7,4 - 7,9	5,7 - 6,1	3,1 - 5,6	5,0 - 7,1	2,2 - 2,7	0,1
ITALIE *	téphrite à leucite	1600 - 2000	10 - 12	2,6 - 12,8	5,2 - 5,7	1,8 - 3,9	0,5 - 0,8	0,5 - 1,0	0,1 - 0,5
MADERE *	basalte, pyroclastes	1500 - 2000	12,5 - 15	6,3 - 17,6	5,2 - 5,6	3,1 - 4,5	2,5 - 4,0	0,4 - 1,2	0,2 - 0,4
GALICE *	gabbros, amphibolites & schistes	1010 - 1860	12 - 14	4,5 - 10,7	4,9 - 5,3	2,5 - 3,2		< 0,5	0,6 - 0,7

PMA : Précipitation moyenne annuelle ; TMA : Température moyenne annuelle ; H : horizons humifères ; NH : horizons non humifères.

* : propriétés (C, pH, Al_o, Fe_o, Si_o, Al_p/Al_o) dans la section de contrôle andique (~ 60 cm supérieurs) de sols représentatifs (soulignés ci-dessous).

Japon : SHOJI *et al.* (1985) ; Nouvelle-Zélande : Mairoa PARFITT *et al.* (1983) ; Hawaï : Akaka PARFITT *et al.* (1988) ; Népal : BAUMLER & ZECH (1994) ; Etats-Unis : n°3 HUNTER *et al.* (1987) ; Costa Rica : AT6 NIEUWENHUYSE *et al.* (1993) ; Antilles (Guadeloupe) : BR NDAYIRAGIJE (1996) ; Rwanda : Tamira MIZOTA & CHAPELLE (1988) ; Islande : Thingvallasveit ARNALDS *et al.* (1995) ; Italie : Mt. Fogliano LORENZONI *et al.* (1995) ; Madère : P16/82 MADEIRA *et al.* (1994) ; Galice : G-4 GARCIA-RODEJA *et al.* (1987).

Après les sols minéraux bruts puis peu évolués, les Andosols vitriques apparaissent entre 100 et 500 ans puis passent à des Andosols saturés entre 500 et 1500 ans. La zonation climatique est alors assez marquée : les Andosols saturés mélaniques, contenant un peu de smectites ferrifères, se situent sur le versant "sous le vent" (climat tropical à courte saison sèche). Les Andosols saturés chromiques, plus colorés et caractérisés par la formation d'halloysite glomérulaire, se rencontrent sur le versant "au vent" (climat tropical humide). Sur les sommets (climat tropical perhumide), les sols sont plus riches en allophanes, très humifères, perhydratés et en partie désaturés. De 1500 à 5000 ans se développent des Andosols désaturés, des Andosols saturés et des sols bruns andiques. L'influence de la zonalité climatique est plus sensible avec les séquences suivantes : sur le versant "au vent", du littoral vers le sommet, Andosols faiblement désaturés en A → modérément désaturés dans tout le profil → fortement désaturés et perhydratés ; sur le versant "sous le vent", du sommet vers le littoral, Andosols perhydratés → Andosols saturés → sols bruns andiques. De 5000 à 10000 ans on passe aux Andosols perhydratés puis à plus de 10000 ans aux sols ferrallitiques sur le versant "au vent". De même, sur le versant "sous le vent", on passe des sols bruns eutrophes aux sols fersiallitiques et dans les zones perhumides des Andosols perhydratés aux sols fersiallitiques très humifères.

5. Népal

Dans l'Himalaya (Népal), une récente étude de BAUMLER & ZECH (1994) a mis en évidence des Andosols bien drainés (Haplustands, SOIL SURVEY STAFF, 1992) dérivés de matériaux non volcaniques (micaschistes) sous un climat froid et humide (2800 m d'altitude) mais présentant néanmoins une saison sèche de novembre à mars (Tab. 2). Ces sols sont assez acides et riches en matière organique. La fraction argileuse ne contient pas d'allophanes ou d'imogolite et est en grande partie héritée du matériau parental. Les propriétés andiques résultent des fortes teneurs en Al, libérées par l'altération des minéraux primaires, réagissant avec les matériaux humiques incorporés dans le sol grâce aux fortes précipitations et à un bon drainage. Ainsi, des complexes Al(Fe)-humus, insolubles et résistants, se forment à la place de minéraux allophaniques. Ceci pourrait expliquer le développement de propriétés andiques sous un climat à saison sèche (régime hydrique ustique).

B. AMÉRIQUE

Sur le continent américain, les Andosols se rencontrent principalement le long de la côte Ouest (COLMET-DAAGE *et al.*, 1967a, 1967b ; LEAMY *et al.*, 1980 ; LEAMY, 1984 ; MIZOTA & VAN REEUWIJK, 1989) :

- en Amérique du Nord : Alaska, Canada (Colombie Britannique), Etats-Unis (Washington, Oregon, Idaho, Californie),
- en Amérique centrale : Mexique, Guatemala, Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panama ainsi que dans les Antilles,
- en Amérique du Sud : Colombie, Equateur, Pérou, Bolivie, Chili, Argentine.

1. Etats-Unis

Peu après les travaux de SHOJI *et al.* (1985) sur les Andosols non allophaniques du Japon, BAHAM & SIMONSON (1985) ont mis en évidence des sols similaires en Orégon sur des colluvions basaltiques, soumis à des régimes d'humidité et de température udiques et mésiques à isomésiques. HUNTER *et al.* (1987) ont ensuite décrit des Andosols non allophaniques dans l'Etat de Washington sous un climat maritime (Tab. 2). Ils se développent sur des matériaux qualifiés de non volcaniques mais dérivant de roches sédimentaires tuffacées plus ou moins mélangées à des loess et cendres volcaniques. Les propriétés de ces sols sont attribuées à l'Al et Fe "libres" des oxydes et des complexes organo-métalliques plutôt qu'aux minéraux allophaniques.

Un peu plus à l'Est (Idaho), JOHNSON-MAYNARD *et al.* (1997) ont étudié l'influence de la végétation sur des Andosols dérivant de cendres volcaniques. Après la destruction de la forêt (pins en majorité) les fougères (*Pteridium aquilinum*) s'installent rapidement. Cette succession se traduit par de fortes modifications des propriétés des sols, passant du type allophanique sous forêt au type non allophanique sous fougères. Ces dernières ont un effet acidifiant sur le sol (pH de 4,8 à 5,3) et les acides organiques produits sont capables de complexer Al et Fe, inhibant ainsi toute synthèse de minéraux allophaniques.

2. Costa Rica

Sur le continent américain, de nombreux travaux ont été effectués en climat tropical, dont l'étude d'une chronoséquence réalisée au Costa Rica par NIEUWENHUYSE *et al.* (1993). Sous un climat tropical perhumide, des Andosols (Tab. 2) peuvent se développer sur les sables andésitiques en moins de 2000 ans. Avec l'augmentation de l'âge des sols (100 à 5000 ans), s'observe un accroissement de leur développement et une intensification de l'altération des fragments rocheux, accompagnés d'une diminution de la Da. De même, la fraction fine augmente sur une plus grande profondeur. En raison de leur position topographique, les sols les plus anciens sont aussi les moins bien drainés et ce facteur semble jouer un rôle important dans la pédogenèse. Les teneurs en matière organique sont élevées ; la fraction argileuse est dominée par des complexes Al,Fe-matière organique dans les horizons A et par des allophanes dans les horizons plus profonds.

3. Antilles

Les sols dérivés de roches volcaniques des Antilles, étudiés par COLMET-DAAGE & LAGACHE (1965), ont été dernièrement examinés par NDAYIRAGIJE (1996). Ses travaux ont porté sur la caractérisation (minéralogique notamment) d'une chrono-climatoposéquence sur pyroclastes et sous un climat tropical humide en Guadeloupe. Cette séquence d'altération est la suivante : Andosol →

sol brun andique → sol brun-rouille à halloysite → sol ferrallitique. L'Andosol (Hapludand, SOIL SURVEY STAFF, 1994) présente une composition minéralogique particulière. Il montre des quantités encore importantes de minéraux primaires et, à côté d'allophanes, des minéraux plus caractéristiques de matériaux non allophaniques : gibbsite, kaolinite, vermiculite et smectite hydroxy-alumineuses. Ceci reflète des conditions d'altération caractérisées à la fois par un soutirage intense de la silice (gibbsite) et par le maintien de l'activité de la silice conjugué à des solutions d'altération dont les caractéristiques permettent tantôt la formation d'allophanes, tantôt celle de kaolinite. La smectite, probablement d'origine hydrothermale, joue un rôle "anti-gibbsite" ; cette dernière n'apparaît qu'après l'intercalation de la quasi-totalité des polymères hydroxy-alumineux interfoliaires. Les autres caractères de cet Andosol sont exposés dans le Tab. 2.

4. Colombie

Les Andes colombiennes, étudiées par FAIVRE (1988), ont été le siège d'un volcanisme intense au Quaternaire, les enfouissant presque totalement sous une couverture pyroclastique d'épaisseur variable. La configuration de la chaîne andine confère aux versants externes une position "au vent" se traduisant par des précipitations abondantes (de 3500 mm à plus de 6300 mm sur le versant pacifique ; plus de 1500 mm à près de 5000 mm sur la façade orientale) et un fort couvert nuageux et brumeux freinant l'évapotranspiration. La zone intra-andine se trouve en position d'abri par rapport aux vents dominants et subit des effets de foehn et des circulations locales. Les fonds de dépression y sont généralement plus secs que les versants les dominants.

La répartition des sols suit une zonation altitudinale. Les sols ferrallitiques, quelquefois légèrement lessivés ou blanchis, dominent aux plus basses altitudes (< 1000 m). Au niveau de la forêt sub-andine (de 1000 à ~ 2300 m), les sols appartiennent aux Andosols oligotrophes (Dystrandeps, SOIL SURVEY STAFF, 1975) sous un climat perpétuellement humide et sur des matériaux récents. Ils passent à des ferrisols à caractères andiques plus ou moins affirmés (Andic ou Typic Humitropepts) sur les matériaux plus anciens ou sous un climat présentant des périodes de déficit hydrique. Les minéraux sont alors mieux cristallisés (halloysite et kaolinite). Le caractère humifère s'accroît à l'étage de la forêt andine (de ~ 2300 à ~ 3300 m). Sous un climat constamment humide, les composés allophaniques peuvent se maintenir, même sur des matériaux anciens, et les sols appartiennent aux Hydrandeps et Dystrandeps. Les sols passent à des ferrisols à caractères andiques plus ou moins affirmés mais toujours humifères (Andic Humitropepts) en présence de périodes sèches. Enfin, aux plus hautes altitudes (Paramos, jusqu'à 4700 m), l'altération est plus faible et plus lente et les Vitrandeps dominent. Cette zonation peut être modifiée par des conditions climatiques xériques et plus contrastées au niveau des dépressions : les andosols et ferrisols sont localisés dans les parties moyennes et supérieures (sans déficit hydrique) et des sols planosoliques apparaissent dans la partie inférieure et dans le fond des zones dépressives (plus sèches).

5. Chili

Au Chili, les sols dérivés de matériaux volcaniques représentent 50 à 60 % des 5400000 ha de terres arables. Le Chili peut être découpé en trois zones (BESOAIN, 1985). La zone aride (précipitations < 100 mm/an) est située autour de 3000 m d'altitude et les sols dérivés de cendres volcaniques sont majoritairement des Aridisols. Dans la zone de transition semi-aride/méditerranéenne se rencontrent des dépôts de ponces rhyolitiques, plus ou moins consolidés, où se développent des sols appartenant aux Durandepts (SOIL SURVEY STAFF, 1975). Enfin, quatre groupes principaux de sols sur cendres volcaniques apparaissent dans la zone subhumide/humide ($P > 800$ mm/an). Les sols rouges argileux (Alfisols et Ultisols) correspondent à un stade avancé de la séquence d'altération et sont probablement d'âge Riss-Würm ou Mindel-Riss. L'origine des sols bruns argileux (Andic Haplumbrepts), présentant des propriétés intermédiaires entre les sols précédents et les "Trumaos", se situe vraisemblablement à la fin du Würm. Les "Trumaos" se développent sur des cendres basiques Holocène ou post-Würm, de même que les "Ñadis" (Placandepts) qui présentent des conditions de drainage imparfait. La fraction minérale des Trumaos (Dystrandeps ou Vitrandeps) est composée d'allophanes, de composés para-allophaniques, d'imogolite, de smectite et chlorite en quantités variables, ainsi que des minéraux primaires. La durée de formation des Andosols peut être relativement courte (quelques centaines d'années) et leur persistance, c'est-à-dire tant que les allophanes dominent, ne dépasse pas 20000 à 25000 ans dans les conditions environnementales du Chili. Les allophanes tendent à disparaître au profit des halloysites ou d'autres minéraux cristallins sous l'action de solutions du sol riches en Si provenant de dépôts de cendres récentes sur le sol.

C. AFRIQUE

En Afrique, des Andosols ont été reportés au centre du continent, Cameroun, Soudan, Zaïre et plus particulièrement à l'Est, Ethiopie, Kenya, Rwanda, Ouganda, Tanzanie, ainsi que dans l'île de la Réunion (LEAMY *et al.*, 1980 ; LEAMY, 1984 ; MIZOTA & VAN REEUWIJK, 1989).

1. Cameroun

Une étude des sols dérivés de matériaux volcaniques a été réalisée au Cameroun par SIEFFERMANN (1973). Plus récemment, DELVAUX (1988) a notamment examiné la région côtière du Sud-Ouest (Mont Cameroun, plaine du Tiko et zone de Mungo) présentant des dépôts pyroclastiques d'époque quaternaire soumis à un climat équatorial à deux saisons (une longue saison des pluies de mars à novembre et une saison sèche de décembre à février). Les séquences de sols dépendent de l'âge des matériaux et de la distance par rapport au cône d'émission (tri granulométrique des particules). La séquence évolutive classique est la suivante : Andosols (à allophanes) sur les matériaux les plus récents → sols brunifiés (à halloysite hydratée 10 \AA) sur matériaux intermédiaires → sols ferrallitiques (halloysite déshydratée 7 \AA et kaolinite) sur les matériaux plus âgés.

2. Rwanda

MIZOTA & CHAPELLE (1988) ont étudié une dizaine de profils dérivant de cendres basiques le long d'une toposéquence et aux pieds de quelques édifices volcaniques au Nord-Est du Rwanda (Tab. 2). Les variations climatiques y sont importantes : régimes de température et d'humidité respectivement frigide et pérudique aux plus hautes altitudes, conditions plus chaudes et plus sèches (udique-ustique) à de plus faibles altitudes. Les sols, Andepts selon la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1975), sont caractérisés par de fortes teneurs en C dans les horizons de surface, augmentant avec l'altitude (et avec la permanence de l'humidité). Ils présentent une séquence d'altération de type opale - allophanes - halloysite. Il semble que les produits d'altération des cendres volcaniques au Rwanda diffèrent fortement de ceux du Kenya-Tanzanie. Un environnement humide associé à des cendres basiques au Rwanda serait favorable au développement de la séquence d'altération à allophane-halloysite dominants alors que dans les conditions plus sèches du Kenya-Tanzanie (ou même pour certains sols du Rwanda soumis aux régimes les plus secs), les sols présentent une smectite dite "courbe" (dont seule la réflexion selon ($hk0$) est distincte). Plus récemment, NIZEYIMANA (1997) et NIZEYIMANA *et al.* (1997) ont étudié une toposéquence de sols sur matériaux volcaniques situés dans la même région que ceux de MIZOTA & CHAPELLE (1988). Ils aboutissent dans l'ensemble aux mêmes conclusions que ces derniers et classent ces sols parmi les Andisols de la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994) et plus précisément dans le Grand Groupe des Hapludands.

3. Réunion

La spécificité de l'île de la Réunion est son importante couverture d'Andosols qui représentent environ les 2/3 de sa surface agricole (RAUNET, 1991). Ils se développent notamment sur les pyroclastites terminales du Piton des Neiges, à tendance trachytique et datées entre 40000 et 15000 ans. Leur répartition obéit à un gradient altitudinal : les Andosols non perhydratés apparaissent entre 600 et 750 m sur le versant "sous le vent" (faiblement désaturés) et de 400-750 à 1000-1300 m, soumis à de fortes précipitations (1500 à 3000 mm) pour les plus désaturés. Les Andosols perhydratés, désaturés et chromiques, ont une extension considérable et se situent à des altitudes comprises entre 1300 et 1800 m correspondant à des pluviométries supérieures à 1500 mm. Ils présentent une spécificité réunionnaise qui a conduit à distinguer trois groupes :

- Andosols "modaux" plus ou moins perhydratés.
- Andosols perhydratés à "mascareignite" (couche superficielle claire d'aspect cendreuse constituée de phytolithes d'opale) localisés entre 1600 et 1800 m et sous des précipitations de 1500 à 1600 mm. L'abondance de ces phytolithes, issus d'une végétation de *Nastus borbonicus* (bambous), combinée à l'accumulation d'une matière organique riche en acides fulviques, favorisent la différenciation des horizons E et Bh traduisant l'apparition d'un processus de podzolisation se surimposant à l'andosolisation (ZEBROWSKI, 1975 ; ALARCON, 1997).

- Andosols perhydratés à "avoune" (épaisse couche organique noirâtre d'aspect tourbeux formée de l'accumulation de débris végétaux) sur les pentes plus humides (3000 à 6000 mm) à partir de 1300 m d'altitude.

Enfin, les Andosols vitriques se rencontrent à plus de 1800 m d'altitude.

D. EUROPE ET ILES ATLANTIQUES

En Europe, des Andosols ont été observés en Islande, Angleterre, Allemagne, Roumanie, Italie, Sicile, Sardaigne, Espagne et dans les îles atlantiques de Madère, des Açores et des Canaries (LEAMY *et al.*, 1980 ; LEAMY, 1984 ; MIZOTA & VAN REEUWIJK, 1989).

1. Islande

En Islande, la surface occupée par les Andosols a été estimée à plus de 60000 km², correspondant à 5-6 % des Andosols du monde et à un peu plus de la moitié des sols de l'Islande selon ARNALDS *et al.* (1995). Quatre profils polycycliques (Haplo- et Vitricryands, SOIL SURVEY STAFF, 1992) ont été décrits sur des dépôts cendreux interstratifiés de matériaux éoliens, soumis à un climat froid et humide (Tab. 2).

Ces sols présentent les caractéristiques générales des Andosols : faibles Da, forte Rét.P et fortes valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$. Leur couleur semble fortement influencée par la nature du matériau parental. Ils sont faiblement acides (pH_{H₂O} de 5,6 à 6,9) et leurs horizons de surface montrent des pH plus élevés que ceux habituellement reportés pour les Andosols, vraisemblablement en raison de matériaux parentaux et de conditions environnementales (végétation, climat) différents. Ces sols montrent des quantités appréciables d'allophanes et de ferrihydrite ainsi qu'une grande abondance de verres volcaniques et des quantités variables de minéraux primaires (plagioclases, pyroxènes et minéraux riches en fer : olivine, hématite, ilménite et magnétite). Les sols d'Islande sont assez jeunes (< 10000 ans) et se développent sur des dépôts volcaniques d'épaisseur variable surmontant des moraines glaciaires. Ils sont faiblement résistants à l'érosion (en particulier éolienne).

2. Italie

LORENZONI *et al.* (1995) ont étudié les sols du complexe volcanique Cimini au Nord de Rome, dont un Andosol (Typic Hapludand, SOIL SURVEY STAFF, 1992) développé à partir de téphrites leucitiques sous un climat humide (Tab. 2).

Cet Andosol est modérément acide et présente des teneurs assez élevées en carbone et en Al_0 . Les allophanes, de type alumineux, sont abondants et résultent de l'altération de la leucite, fournissant par ailleurs de l'hallowysite (7Å). La genèse d'argiles est limitée et aboutit à

l'halloysite et à un peu d'illite. Il semble donc que l'altération rapide de la leucite soit le facteur principal dans la formation de minéraux allophaniques. Les autres sols se développent à partir de laves trachytiques ou latitiques et présentent des propriétés andiques qui ne sont pas suffisamment exprimées pour qu'ils puissent être reconnus comme des Andosols. La genèse de minéraux argileux est alors plus développée : kaolinite, illite.

3. Madère

Les Andosols de l'île de Madère (Fulv- et Hapludands, SOIL SURVEY STAFF, 1990) se rencontrent sur des roches basaltiques et sur des matériaux pyroclastiques de composition basaltique (MADEIRA *et al.* 1994). Le climat est tempéré, avec des caractéristiques océaniques, et fortement influencé par la présence de nuages entre 400-700 et 1200 m d'altitude (Tab. 2).

Ils se situent au niveau de la zone de nuages et se répartissent en deux groupes : Andosols "bruns" et "bruns-rouges" sur basaltes et Andosols "rouges" sur pyroclastes. Ils présentent des teneurs en carbone élevées, même en profondeur, mais la couleur des sols est souvent influencée par la présence d'hématite, d'origine lithogénique. Certains sols sont soumis à une influence marine (présence de Na sur le complexe d'échange). Ces Andosols montrent des teneurs en allophanes très variables, de 0 à 23 % et peuvent atteindre divers degrés d'altération. Les Andosols les plus altérés de Madère présentent les caractéristiques générales des Andosols de type non allophaniques décrits par SHOJI *et al.* (1985) au Japon : très peu d'allophanes, présence de minéraux argileux de type 2:1 et leurs propriétés andiques sont attribuées à la présence de complexes Al-humus. Ces sols contiennent de plus de l'halloysite (7Å), de la vermiculite et occasionnellement de la goéthite.

4. Galice

Les travaux de GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) en Galice ont pour la première fois clairement mis en évidence l'existence d'Andosols sur des matériaux d'origine non volcanique mais facilement altérables : gabbros, amphibolites et schistes. Ces sols (Dystrandeps, SOIL SURVEY STAFF, 1975), vraisemblablement d'origine colluviale, se rencontrent sous un climat tempéré humide (Tab. 2). Les sols ont des caractères comparables aux Andosols de type non allophaniques décrits par SHOJI *et al.* (1985) au Japon : absence d'allophanes, abondance de minéraux 2:1 et prédominance de complexes Al-humus. Les sols développés sur schistes présentent des propriétés andiques moins exprimées. Ici, le matériau parental, riche en minéraux altérables, libère d'importantes quantités d'Al dans des conditions de bon drainage. L'Al est alors complexé et la matière organique, ainsi stabilisée, peut s'accumuler. Le rôle de la matière organique est primordial, les propriétés andiques étant limitées aux horizons où ces composés sont abondants.

E. FRANCE

1. Massif Central

Par la grande variété et l'abondance de ses formations volcaniques, le Massif Central offre un remarquable terrain d'étude de l'andosolisation. Déjà abordée par DUCHAUFOR & SOUCHIER (1966b) et HETIER (1968) (cf. section II), cette étude a été approfondie par HETIER (1975) dans la Chaîne des Puys et le Cantal et par MOINEREAU (1977) dans la région du Velay-Vivarais-Coirons.

Les Andosols de la Chaîne des Puys se rencontrent sur des formations volcaniques récentes (de 4000 à 20000 ans) et se répartissent selon une zonation altitudinale (climatique) : ils n'apparaissent pas en dessous de 600 m d'altitude où l'évolution des sols est marquée par la brunification. L'andosolisation est possible entre 600 et 1100 m et prépondérante, à des degrés divers, au-dessus de 1100 m sur toutes les formations volcaniques. Dans cette région, les conditions pédoclimatiques (humidité permanente et bon drainage) sont déterminantes dans le développement du processus d'andosolisation, se manifestant d'autant plus que la roche mère est basique. Pour HETIER (1975), "les conditions pédoclimatiques nécessaires à l'andosolisation doivent être d'autant plus rigoureuses que l'altérabilité de la roche mère est faible". Cette altérabilité repose sur l'abondance de minéraux calciques et ferro-magnésiens, puis sur l'état de division et éventuellement sur l'état cristallin. Dans la troisième partie de ce travail nous reviendrons sur un Andosol du Massif Central (Puy de Mercoeur), déjà étudié par HETIER (1975).

Dans le Cantal, les Andosols se développent à partir de coulées basaltiques (ankaramites) miocènes pour les plus anciennes, ou le plus souvent d'âge Quaternaire ancien ou moyen. On observe fréquemment la chaîne de sols suivante (de haut en bas) : Andosols - sols bruns andiques - sols hydromorphes ou tourbières. Aux plus hautes altitudes (> 1300 m), les Andosols sont plus humifères ; aux plus basses altitudes, l'évolution andosolique des sols basaltiques est moindre mais nette en haut de pente jusqu'à 900 m (HETIER, 1975). Ici, le pédoclimat froid et humide, sans dessiccation, est le facteur principal, suivi de l'acidité de la roche mère qui peut limiter l'intensité de l'altération (phonolites, trachytes). Une brunification des horizons de surface apparaît sur les sols très anciens, accélérée sans doute par le déboisement qui favorise une dessiccation en surface.

La région du Velay-Vivarais-Coirons, soumise à des influences montagnardes (> 900 m d'altitude) et méditerranéennes (500-900 m), présente deux volcanismes (antéquatenaire et contemporain du Würm ou postérieur) principalement représentés par la famille des basaltes à olivine sous forme de roches dures, de scories ou de tufs. Les Andosols se rencontrent au-dessus de 1000 m d'altitude, les sols andiques entre 800 et 1000 m et les sols bruns en dessous de 800 m (MOINEREAU, 1977). Ces Andosols sont décrits comme des sols humifères à profil AC ou ABC, les sols bruns sont peu humifères et à profil ABC. Les sols andiques présentent des propriétés intermédiaires entre celles des Andosols et celles des sols bruns et ont des profils AC ou ABC. Les caractéristiques générales de

ces trois types de sols sont reportées dans le Tab. 3. Les Andosols peuvent être peu différenciés (vitriques) ou différenciés humiques. Certains sont très humifères et sombres (mélaniques), d'autres moins humifères et plus colorés (chromiques) et tous sont désaturés.

2. Hérault

Dans son étude des sols développés sur les formations volcaniques de l'Hérault, BERTRAND (1969) a comparé les sols de la région de l'Escandorgue au Nord à ceux des basses montagnes de Lodévois et, plus au Sud, aux sols de la basse vallée de l'Hérault jusqu'à Agde. L'activité volcanique de cette région, s'étendant du Pliocène supérieur au Quaternaire moyen, a donné principalement des basaltes, basanites et ankaramites et des projections volcaniques (tufs, cendres et scories). Les laves semblent plus acides au Sud qu'au Nord. Le climat est plus chaud et plus sec vers le Sud avec un climat montagnard dans l'Escandorgue (pluviosité : 1000 mm/an ; température moyenne annuelle : 10 °C), méditerranéen subhumide dans le Lodévois (900-1000 mm/an ; 13 °C), méditerranéen dans la basse vallée de l'Hérault (600-700 mm/an ; 15 °C) et plus aride dans la région d'Agde.

BERTRAND (1969) a proposé une classification régionale en distinguant les sols sur laves (Andosols, andique...) de ceux sur scories ou tufs (vitrosols, vitrique...) :

- horizon de surface très humifère de type moder montagnard, complexe absorbant très désaturé : Andosols ou vitrosols. Ces sols se rencontrent principalement dans l'Escandorgue et présentent une teinte foncée, de fortes teneurs en matière organique (> 10 %), un C/N bas et un pH acide (entre 5 et 6). Ils ont une forte capacité d'échange en surface (30 à 40 méq/100g), diminuant en profondeur, et sont très désaturés. La densité apparente est faible (variant entre 0,9 et 0,6) et la porosité est de 55 %.

- horizon de surface moyennement humifère de type mull calcique à complexe absorbant non saturé en bases : sols bruns andiques ou vitriques, apparaissant dans le Lodévois.

- horizon de surface peu humifère de type mull calcique à complexe absorbant saturé ou presque : sols bruns xéroandiques ou xérovitriques. Ces sols s'observent dans la basse vallée de l'Hérault et dans la région d'Agde.

3. Conclusions

En France, l'andosolisation peut se manifester à des degrés divers. Les Andosols les plus évolués se rencontrent aux plus hautes altitudes, sous des conditions froides et surtout humides, sans dessiccation. L'andosolisation est en premier lieu favorisée par les roches mères les plus basiques, puis par leur état de division. Dans les conditions plus sèches (altitude plus faible, climat plus chaud méditerranéen), l'évolution des sols tend vers la brunification. De même, une brunification de surface peut apparaître avec le temps. Enfin, un processus de podzolisation peut se développer sur les roches les moins altérables, les plus acides.

Tab. 3 - Quelques caractéristiques générales de sols de la région du Velay-Vivarais-Coirons d'après MOINEREAU (1977).

	Andosols	Sols andiques	Sols bruns
Humus	moder	mull ou moder	mull
C	> 10 %	3 - 10	≤ 3
C/N	pelouse : 12-13 forêt, lande : 15-20	variable	< 12
pH _{H2O}	≤ 5,6	≤ 6	≥ 6
Structure	grumeaux fins arrondis	grumeleuse fine	polyédrique subanguleuse
Da	≤ 1	~ 1	> 1
Porosité	> 50 %		< 40
CC ^a	≥ 50 %	> 35	< 35
PF ^b	≥ 30 %	< 20	< 20
CEC _{pH7} - CEC _{pH4}	22 méq/100g	~ 15	≤ 10
Taux de Saturation ^c	< 30 %	> 30	> 50

^a Capacité aux champs (pF 2,3) ; ^b Point de flétrissement (pF 4,2) ; ^c à pH 7.

II. PRÉCÉDENTES ÉTUDES RÉALISÉES SUR LES ANDOSOLS DES VOSGES

Les premières études relatives aux sols andiques dans le Massif Vosgien ont été conduites dès la fin des années soixante par DUCHAUFOR & SOUCHIER (1966b) et par HETIER (1968).

A cette époque, le caractère essentiel permettant de définir les Andosols reposait sur leur développement à partir d'un matériel exclusivement volcanique et sur la nature dite amorphe ou cryptocristalline de leur phase minérale, les allophanes. Ces composés étaient dosés sous forme d'alumine et de silice "libres", c'est-à-dire facilement extractibles par des réactifs chimiques appropriés. On disposait alors du réactif "combiné" : réactif de Tamm (acide oxalique - oxalate d'ammonium) et hydrosulfite de sodium (dithionite), censé extraire les formes les plus colloïdales ; les formes cryptocristallines étant extraites par la soude 0,5 N à 60 °C. Ces deux réactifs étaient supposés ne pas attaquer les silicates, en particulier les argiles (DUCHAUFOR & SOUCHIER, 1966a).

Dans le secteur volcano-sédimentaire du Champ du Feu (massif dévono-dinantien de Schirmeck), DUCHAUFOR & SOUCHIER (1966b) ont décrit toute une gamme de sols présentant des propriétés andiques plus ou moins affirmées sur kératophyres et diabases (dolérites, basaltes et andésites). Leurs propriétés (Tab. 4) ont été comparées à celles d'un Andosol de référence (sur pouzzolane) choisi dans le Massif Central et à celles de sols vosgiens types sur granite (sol brun forestier et sol cryptopodzolique).

A partir de leurs analyses, ces auteurs ont ainsi établi la présence d' "Andosols *sensu stricto*" développés sur basalte. Ils ont fondé leur diagnostic sur les fortes similitudes que présentaient ces sols avec l'Andosol de référence, soit :

- de fortes teneurs en alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 45 \%$) et silice ($\text{SiO}_2 > 15 \%$) libres, extraites par le réactif "combiné",
- une incorporation profonde des matières organiques associée à une couleur foncée du profil ; des rapports C/N faibles,
- une CEC élevée, toutefois ces Andosols vosgiens présentent un faible taux de saturation en bases et se distinguent en cela de l'Andosol de référence,
- une faible teneur en argiles "dispersables" ($< 20 \%$) directement par hexamétaphosphate de sodium par rapport aux argiles totales obtenues après pré-traitement au réactif "combiné". Ceci suggère que la plus grande partie des argiles soit engagée dans des "concrétions" de la taille des limons ou des sables dans lesquelles les allophanes jouent le rôle de ciment.

Sous des conditions de faible altitude, ces sols présentent localement une brunification limitée aux horizons de surface.

Des sols intermédiaires dits "andosoliques" ont également été mis en évidence sur des roches microlitiques ou vitreuses généralement riches en silice. Sur diabase ils forment une transition avec les sols bruns forestiers à mull acide ; sur kéraatophyre, en raison de la dureté de la roche peu favorable à une altération rapide, ils sont à rapprocher des rankers. Ces sols "andosoliques" présentent des caractéristiques morphologiques proches des Andosols (notamment pour les rankers) et les mêmes caractères physico-chimiques mais sensiblement atténués :

- teneurs en Al_2O_3 et en SiO_2 réduites de moitié (voire moins encore pour les rankers),
- CEC plus faible et taux de saturation en bases faibles également,
- teneurs en argile "dispersable" plus élevée ($\sim 60 \%$).

Localement (sur diabase) un phénomène de "podzolisation chimique" peut se superposer au processus d'andosolisation. Le sol, qualifié de "sol brun cryptopodzolique andosolique", présente un humus de type mor libérant des composés fulviques à C/N élevé qui migrent en profondeur.

Sur dolérite et andésite, l'andosolisation semble contrecarrée par une forte teneur en bases de ces sols, qui évoluent vers la brunification (ce sont des sols brun mésotrophes à mull) et montrent des caractères proches du sol brun sur granite :

- faibles teneurs en alumine libre ($< 10 \%$),
- décroissance des matières organiques en profondeur ; C/N faibles,
- forte proportion d'argiles "dispersables" ($> 80 \%$).

Ainsi, pour DUCHAUFOR & SOUCHIER (1966b), le développement du processus d'andosolisation est lié à une altération rapide de matériel volcanique riche en éléments vitreux qui

libèrent de l'alumine et de la silice libres. La formation d'argile est inhibée par un lessivage des bases et une acidification rapide liés à un climat humide de montagne. Les allophanes peuvent se développer, fixer les composés humiques et former des complexes humus-allophane responsables des propriétés particulières des Andosols. Sur des roches plus cristallines, à altération plus lente, la brunification s'accroît et se traduit par la libération lente d'alumine et de silice se réorganisant au sein d'agrégats argilo-humiques.

Dans la même région, HETIER (1968) a étudié les conditions écologiques et lithologiques conduisant à la formation des Andosols dans le secteur de la Haute Vallée de la Bruche, sur des roches volcaniques dévono-dinantiennes (kératophyres et diabases du Massif de Schirmeck) et permienes (andésites et basaltes du Massif de Servaumont, à la périphérie du bassin de Saint-Dié). Un Andosol du Massif Central (sur phonolite) a également été sélectionné comme référence. A l'issue de cette étude, différentes définitions ont été proposées (Tab. 4):

- "Andosol brunifié" : sol à mull où les taux d'alumine libre (réactif combiné) sont élevés et croissent avec la profondeur (25 à 55 % d' Al_2O_3). Ce sol couvre une surface relativement réduite qui correspond à un faciès de basalte permien massif à olivine. Il se situe dans un milieu constamment humide et présente les caractéristiques suivantes :

- matière organique faiblement polymérisée ; rapports C/N faibles,
- CEC élevée et forte désaturation,
- faible teneur en argiles "dispensables" (< 20 %),
- grande affinité pour l'eau et faible densité apparente.

- sols bruns andiques : sols à mull ou moder où les taux d'alumine sont moyens et augmentent vers la roche mère (15 à 25 % d' Al_2O_3). Ces sols ne semblent pas correspondre à un faciès dévono-dinantien précis (la roche mère étant rarement en place) mais ils coïncident avec des endroits humides sur diabases. On les trouve aussi sur basalte scoriacé permien mais limités aux hauts de versants humides. Dans l'ensemble, ils montrent les mêmes caractères que l'Andosol précédent.

- sols bruns : sols à mull ou moder où la teneur en alumine "libre" est plus faible et constante dans le profil ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 10\%$). Ce sont des sols bruns acides sur une grande partie des affleurements dévono-dinantiens volcaniques (localisés sur les versants et en bas de pente) et des sols bruns mésotrophes sur des roches riches en phyllites (andésite aphanitique et basalte scoriacé permien).

- sols "andopodzoliques" : sols à moder où les taux d'alumine passent par un maximum en surface et restent assez élevés en profondeur. Toutefois, il n'est pas certain que ces profils aient subi cette double pédogenèse et ne soient pas simplement remaniés ou complexes. Ils sont très proches des sols bruns andiques et sont localisés sur des roches volcaniques dévono-dinantiennes dans les zones de dômes, hauts plateaux, crêtes et ressauts topographiques.

• sols "cryptopodzoliques" : sols à moder ou moder-mor où les taux d'alumine passent par un maximum proche de la surface puis diminuent en profondeur (20 à 10 % d'Al₂O₃). On les trouve sur roches sédimentaires et pyroclastiques dévono-dinantiennes très acides.

Pour HETIER (1968) les critères favorables au développement du processus d'andosolisation sont d'une part, la présence d'une roche finement cristallisée, pauvre en phyllites et riche en feldspaths (surtout plagioclases) et d'autre part, des conditions pédoclimatiques fortement et constamment humides.

Ainsi, les premières études menées sur le volcanisme dévono-dinantien et permien des Vosges du nord ont permis d'établir l'existence de sols présentant des caractères andiques, localisés dans des zones fortement humides et définis par de fortes teneurs en alumine et silice libres. Cependant, il est fort probable que ces sols ne répondent plus aux critères des Andosols tels qu'on les définit aujourd'hui. En effet, on connaît mieux la sélectivité des différents réactifs vis à vis des formes de l'aluminium et de la silice et il est apparu que les méthodes d'extraction utilisées autrefois conduisaient à une surestimation de la teneur en allophanes (WADA, 1989) ; le réactif combiné attaquant notamment par dégradation et solubilisation partielle des silico-aluminates fragiles (JEANROY, 1983). La confirmation de l'existence, dans le Massif Vosgien, de sols andiques selon les nouveaux critères de classification des Andosols et selon les techniques d'analyses modernes est apparue nécessaire. Cette recherche, abordée par ZIDA (1994), sera développée dans la seconde partie de cette étude.

Tab. 4 - Quelques caractéristiques de sols andiques des Vosges d'après DUCHAUFOR & SOUCHIER (1966b) et HETIER (1968).

	Al ₂ O ₃ ^a	SiO ₂ ^a	Humus	C/N	CEC ^b	Sat. Bases ^b
	‰	‰			még/100g	%
Andosol de référence* (pouzzolane-Mass.Central)	85	40	moder	14	> 30	> 25
Andosol de référence** (phonolite-Mass.Central)	16 → 50	4 → 20	moder	13 à 18	> 30	< 3
Andosol <i>sensu stricto</i> * (basalte dévon.-din.)	> 45	> 15	mull	9	> 25	< 15
Andosol brunifié** (basalte permien)	25 → 55	5 → 15	mull	~ 10	> 25	< 15
Sol brun andique** (diabase dévon.-din.)	20 → 25	< 10	mull ou moder	13 à 17	> 15	< 10
Sol brun andosolique* (diabase dévon.-din.)	20 à 30	< 10	mull acide	13 à 17	~ 15	< 10
Ranker andosolique* (kératophyre dévon.-din.)	< 20	< 5	moder	< 15	15 à 25	< 10

* d'après DUCHAUFOR & SOUCHIER (1966b) ; ** d'après HETIER (1968).

^a extraits au réactif combiné ; ^b acétate d'ammonium pH 7 ; → évolution en profondeur.

III. CONCLUSIONS

Ces quelques exemples nous ont permis de décrire à grands traits les conditions d'apparition des Andosols dans le monde et de rappeler leurs propriétés fondamentales. Les Andosols sont donc présents sur tous les continents et concernent des superficies non négligeables si les conditions climatiques et de roche mère sont satisfaisantes. Ainsi, les Andosols se développent d'autant mieux qu'ils se situent sous des conditions fortement humides, sans saisons sèches, et sur des matériaux volcaniques basiques, finement divisés (cendres principalement) et récents.

Sous ces climats humides, l'altération produit des allophanes et de l'imogolite dans des conditions neutres ou faiblement acides ($\text{pH} > 5$, $\text{Al}_p/\text{Al}_o < 0,5$) et les complexes organo-métalliques dominant dans des environnements plus acides ($\text{pH} < 5$, $\text{Al}_p/\text{Al}_o > 0,5$), à de plus hautes altitudes ou de plus basses températures par exemple. A cette distinction correspondent des Andosols allophaniques et des Andosols non allophaniques mais la composition de leur fraction fine constitue un continuum entre ces deux pôles (SHOJI *et al.*, 1985 ; MIZOTA & VAN REEUWIJK, 1989) (Fig. 5). On trouve aussi généralement de la ferrihydrite. Sous des climats plus secs, les complexes et/ou les allophanes sont présents en faibles quantités et les minéraux dominants sont l'hallowite et les minéraux 2:1 (smectite). De tels sols présentent rarement les propriétés nécessaires pour être reconnus comme des Andosols.

Les Andosols peuvent se développer localement sur des roches non volcaniques mais riches en minéraux altérables libérant assez d'Al, et dans une moindre mesure de fer, pour former des complexes Al,Fe-humus. Ces Andosols sont alors de type non allophanique. Des Andosols s'observent également sur des matériaux plus riches en SiO_2 mais soumis à des précipitations suffisamment importantes pour évacuer Si hors du profil et permettre la formation d'allophanes.

PARFITT (1990) a répertorié les conditions de formation des Andosols sur cendres volcaniques soumis à différents climats ainsi que leurs relations avec d'autres types de sols. Ses principales observations sont résumées dans le Tab. 5.

CHAPITRE III - PHYSIOGRAPHIE DU MASSIF VOSGIEN

La région étudiée se situe principalement dans la partie méridionale du Massif Vosgien et plus particulièrement (Fig. 7) :

- autour du massif des Ballons (stations de Château-Lambert¹, Tête Niqueuse, La Pransière, Langenberg¹),
- de part et d'autre de la vallée du Rahin (Belfahy¹, Goutte des Saules, Ordon¹, Ménard¹, Tête des Sapins¹, Charborue, Planche des Belles Filles, Croix du Choléra, Saint Antoine¹, Tête de Demesy, Plain des Boeufs¹),
- autour du massif de Rossberg (Gsang¹, Rossberg¹, Masevaux) et plus à l'Est (Schlusselkopf¹).

Quelques stations ont fait l'objet de reconnaissances dans les Vosges septentrionales dans la région du Champ du Feu (Neuntelstein, Champ du Feu¹, Servaumont^{1,2}) et autour du massif du Donon et de la vallée de la Bruche (Schirmeck, Grendelbruch, Schliffstein, Evaux, Donon, Blanc Rupt, Malcôte).

I. TOPOGRAPHIE

Les Vosges constituent un massif dissymétrique, orienté NNE-SSO, présentant une partie SE (terrains cristallins et métamorphiques) plus élevée que la partie gréseuse au NO. Du NO au SE se rencontrent successivement (Fig. 6) :

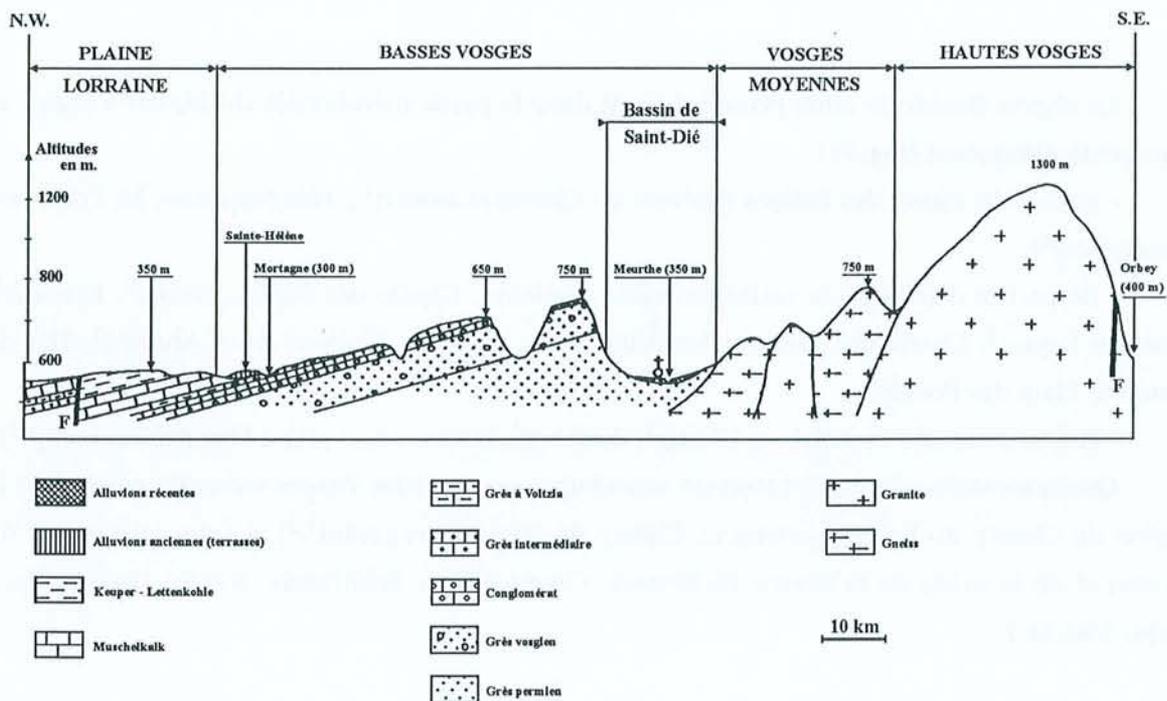
- la plaine lorraine, plateau de terrains triasiques de 300 à 400 m d'altitude, doucement incliné vers l'Ouest,
- les Basses Vosges gréseuses, d'altitude 500 à 750 m,
- le bassin permien de Saint-Dié,
- les Hautes Vosges cristallines, d'altitude 1000 à 1400 m, profondément affectées par l'empreinte glaciaire et caractérisées par des lignes de hauteurs régulières et arrondies ("ballons"),
- la retombée abrupte sur l'Alsace par une série de gradins intermédiaires (collines sous vosgiennes).

De grandes vallées (Moselle, Meurthe, Thur...) traversent ces ensembles. Les glaciations quaternaires (Würm) ont peu marqué la région des Basses Vosges. En revanche, les Hautes Vosges ont été profondément marquées par l'action des glaciers, sculptant des auges courtes et déposant quelques moraines dans le fond des vallées encaissées du versant alsacien. Sur le versant lorrain, les grandes vallées glaciaires sont beaucoup moins encaissées et le modelé et les dépôts glaciaires (moraines, dépôts lacustres et fluvio-glaciaires) sont beaucoup plus importants.

¹ Stations déjà étudiées par ZIDA (1994).

² Station déjà étudiée par HETIER (1968).

Fig. 6 - Coupe géologique schématique du Massif Vosgien.

D'après BONNEAU *et al.* (1978).

II. CADRE GÉOLOGIQUE

A. GÉNÉRALITÉS

Le Massif Vosgien constitue un petit massif montagneux d'âge hercynien, dissymétrique, pénéplané puis rajeuni et fracturé au Tertiaire. Il est constitué de deux grands ensembles, les Vosges gréseuses au NO et les Vosges hercyniennes ou cristallines au SE.

Les Vosges gréseuses comportent tout un ensemble de roches sédimentaires détritiques datées de la fin de l'ère primaire au début du secondaire avec successivement, le grès permien (arkose riche en orthose) surmonté des grès du Trias inférieur (Buntsandstein) : le grès vosgien (grès siliceux fin à ciment ferrugineux), le conglomérat principal (à galets de quartz, quartzite et lydiennes), le grès intermédiaire (riche en feldspaths et micas) et enfin le grès à Voltzia, comprenant le grès à meule et un faciès argileux, le grès de Ruaux. Les grès triasiques s'étendent largement sur le socle et occupent de vastes étendues dans le nord et à l'ouest.

Les Vosges hercyniennes sont constituées en grande majorité de terrains cristallins et métamorphiques (Fig. 7). Des dépôts sédimentaires et volcano-sédimentaires ainsi que des formations volcaniques (que nous étudierons plus en détail dans la section suivante B) se rencontrent également. Parmi les roches cristallines, les granites occupent une place importante et présentent de nombreuses variétés allant de granites acides (granite du Valtin, de Brézouard) à des granites calco-

alcalins (granite des crêtes). On trouve de plus des granitogneiss de composition variée et des formations acides de type migmatites et leptynites. Enfin, les séries gneissiques, atteintes par un métamorphisme général intense, présentent un groupe à lithologie variée (gneiss amphiboliques, à grenat...) et un groupe de type grésopélimitique.

B. FORMATIONS ÉTUDIÉES

1. Terminologie

Lorsque l'on aborde l'étude des roches volcaniques anciennes se pose le problème de la nomenclature pétrographique. La terminologie utilisée doit rendre compte à la fois du caractère paléovolcanique (vieillessement, altération) des roches et de leur composition chimique et minéralogique. Nous rappelons brièvement ci-dessous quelques définitions de la nomenclature employée par STUSSI (1970) et par JUTEAU & ROCCI (1965) :

a. Séries pré-orogéniques

- *Diabases* : Roches vertes à caractère basaltique présentant un faciès paléovolcanique. Leur composition minéralogique est à plagioclase et pyroxène (augite), ou ses produits de transformation (chlorite, calcite, épidote, serpentine). Ces diabases sont plus ou moins quartziques et peuvent présenter un plagioclase acide (séries spilitiques) ou basique (dolérites et diabases porphyriques).

- *Albitophyres* : Roches magmatiques effusives comportant de l'albite comme seul feldspath et des minéraux ferro-magnésiens hydratés (chlorite, amphibole, épidote, serpentine). On distingue : les kératophyres (roches claires assez siliceuses, à composition de trachyte sodique, à albite dominante) et les spilites (roches sombres vacuolaires à minéraux ferro-magnésiens dominants. Certaines peuvent être équivalentes aux diabases vacuolaires). A ces roches doivent être ajoutés les orthoalbitophyres, plus rares, à feldspath potassique, comprenant les orthokératophyres (sodi-potassiques et leucocrates).

- *Orthophyres* : Roches à composition de trachyte ou trachyandésite à faciès paléovolcanique.

b. Séries orogéniques

- *Porphyres* : Roches magmatiques à composition de trachyte présentant des cristaux de grande taille dispersés dans une pâte aphanitique. Dans les porphyres quartzifères le quartz est exprimé globulairement (types dellénitiques et rhyolitiques).

- *Porphyrites* : Roches vertes à composition d'andésites ou de latites à faciès paléovolcanique.

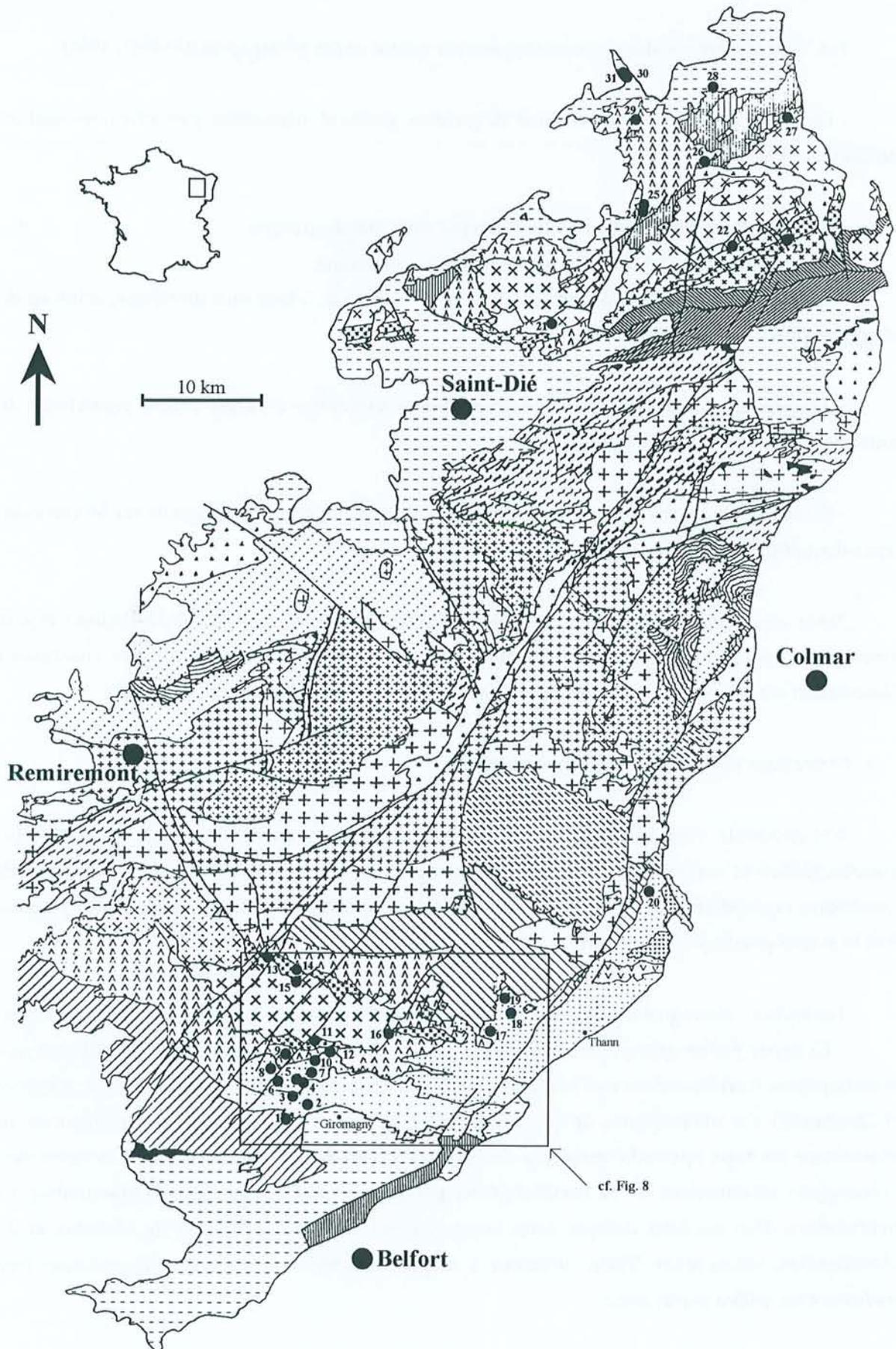
Légende de la carte géologique simplifiée du socle vosgien

	Volcanisme permien
	Volcanisme de Wuenheim
	Houiller
	Granites alcalins type Kagenfels
	Leucogranites grossiers
	Granites à mégacristaux (type Thannenkirch)
	Granites d'anatexie de la couverture dévono-dinantienne
	Granites d'anatexie du socle (à biotite ou à deux micas)
	Granite des Crêtes
	Granites type Champ du Feu - Nord
	Ignimbrite du Molkenrain
	Granites rouges
	Granite de Corravillers
	Plutonites basiques à intermédiaires anté-sudètes
	Granodiorite type Hohwald (et différenciés)
	Volcanisme dévono-dinantien des Vosges du Nord
	Viséen "sur " de la vallée de la Bruche
	Dévono-Dinantien sédimentaire de la Bruche et du Rabodeau
	Schistes de Steige
	Schistes de Villé
	Migmatites du Culm
	Série du Markstein (Dévono-Dinantien)
	Série de Giromagny (Viséen supérieur)
	Série de Thann (Viséen supérieur)
	Série de Malvaux (Viséen moyen ?)
	Série d'Oderen (Viséen inférieur à moyen)
	Série de Plancher-Bas (Viséen inférieur)
	Dévonien du Belfortais
	Méta-granite alcalin de Ste-Croix-aux-Mines
	Migmatites allochtones
	Gneiss monométagmorphiques et polymétagmorphiques d'Urbeis

● Sites d'étude

- 1: Ménard
- 2: Ordon
- 3: Tête des Sapins
- 4: Tête de Charborue (est)
- 5: Tête de Charborue (ouest)
- 6: Croix du Choléra
- 7: Planche des Belles Filles
- 8: Belfahy
- 9: Goutte des Saules
- 10: Saint-Antoine
- 11: Plain des Boeufs
- 12: Tête de Demesy
- 13: Tête Niqueuse
- 14: La Pransière
- 15: Château-Lambert
- 16: Langenberg
- 17: Masevaux
- 18: Rossberg
- 19: Gsang
- 20: Schlussekopf
- 21: Servaumont
- 22: Champ du Feu
- 23: Neuntelstein
- 24: Evaux-B
- 25: Evaux-R
- 26: Schirmeck
- 27: Grendelbruch
- 28: Schliffstein
- 29: Donon
- 30: Blanc Rupt
- 31: Malcôte

Fig. 7 - Carte géologique simplifiée du socle vosgien et localisation des sites d'étude (d'après FLUCK *et al.*, 1987).



2. Les Vosges méridionales

Les Vosges méridionales sont caractérisées par quatre unités géologiques (GAGNY, 1968) :

- Un socle cristallophyllien constitué de granites, gneiss et migmatites, peu affleurant sauf en lambeaux tectoniques.
- Un important complexe granitique défini par deux grands groupes :
 - granites de l'association des Crêtes à tendance syénitique,
 - cortège granitique des Ballons d'Alsace et de Servance, à tendance dioritique, ceinturé de plutonites plus basiques au Nord et au Sud.
- D'épaisses formations volcano-sédimentaires viséennes à faciès Culm, constituant la couverture du socle cristallophyllien.
- Un ensemble de rhyolites et projections acides, dont notamment la rhyolite du Molkenrain, équivalent effusif du granite des Ballons.

Nous nous intéresserons plus particulièrement au plutonisme du massif des Ballons et aux formations volcaniques viséennes qui semblent liés par la même tendance évolutive constituant l'association magmatique des Vosges méridionales (GAGNY, 1968 ; STUSSI, 1970) (Fig. 8).

a. Formations volcano-sédimentaires viséennes

Cet ensemble Viséen est constitué d'épaisses séries sédimentaires à faciès Culm (schisto-grauwackeuses et conglomératiques) accompagnées d'un volcanisme d'extension variable. Ces formations, profondément affectées par la tectonique hercynienne et alpine, ceinturent au Nord et au Sud le massif granitique des Ballons.

Les roches volcaniques associées au Culm présentent deux lignées magmatiques (STUSSI, 1970) :

- La lignée pré-orogénique est représentée par des diabases (station de Ménard), albitophyres et orthophyres (correspondant aux kéraatophyres des stations de Goutte des Saules, Tête de Demesy et Charborue). Ce magmatisme, de type initial, présente un fort caractère alcalin et s'apparente au volcanisme de type spilite-kéraatophyre de Schirmeck (Vosges septentrionales). Ces émissions volcaniques résulteraient de la remobilisation par fusion anatectique (sans contamination ni hybridation) d'un matériel sialique. Elles accompagnent les séries d'Oderen, de Malvaux et de Plancher-Bas, séries d'âge Viséen inférieur à moyen caractérisées par une sédimentation fine traduisant un milieu marin franc.

- Le volcanisme orogénique est caractérisé par la série porphyrites - porphyres - porphyres quartzifères présentant diverses tendances :

- une branche latitique constituée de porphyrites andésitiques, latitiques et leucolatitiques (stations de Gsang, Rosberg, Masevaux, Saint Antoine et Schlusselkopf),
- une branche siliceuse composée de porphyres trachytiques et de porphyres quartzifères rhyolitiques (stations de Belfahy, Ordon).

Cette grande variété d'émissions accompagne les sédiments schisto-grauwackeux grossiers de la série de Thann, correspondant à la base de la série de Giromagny, toutes deux d'âge Viséen supérieur et caractérisées par une sédimentation épicontinentale à continentale. Ces séries débutent par un épisode de porphyrites andésitiques basiques, suivies par le complexe volcano-sédimentaire du Crémillot (porphyres trachytiques ; brèches des stations de Planche des Belles Filles et Croix du Choléra). Le troisième épisode volcanique comprend notamment les trachyandésites type "porphyre vert" (station de Tête des Sapins) et la série se termine par un dernier épisode constitué de porphyres quartzifères rhyolitiques (FOURQUIN, 1973).

- une tendance sodique : porphyrites andésitiques sodiques,
- un volcanisme acide sialique : porphyrites quartzifères dellénitiques.

Avec l'accentuation de l'activité orogénique (transition Viséen inférieur - supérieur) la contamination s'installe (porphyrites andésitiques) et l'hybridation fournit un matériel latitique. Au paroxysme orogénique (Viséen supérieur, phase sudète) l'hybridation plus intense donne naissance aux porphyres trachytiques et rhyolitiques et fournit en profondeur les faciès plutoniques du massif des Ballons.

b. Formations plutoniques du Massif des Ballons

Le massif des Ballons, intrusif dans les formations volcano-sédimentaires du Culm, est constitué d'un monzogranite porphyroïde mis en place au Namurien, flanqué au Nord et au Sud de plutonites plus basiques. Ces plutonites forment deux ensembles : l'un à tendance tholéiitique, essentiellement en bordure Nord du granite des Ballons et d'âge Viséen inférieur, l'autre, en bordure Sud, à tendance calco-alcaline et mis en place au Viséen moyen.

♦ Plutonites de la bordure Nord

Les formations plutoniques de la bordure Nord présentent une grande diversité de faciès (ANDRE, 1983) :

- Une unité cumulative gabbro - dioritique correspondant à des roches sombres à texture de cumulats et riches en minéraux ferro-magnésiens.
- Une unité monzodiorite - monzonite regroupant des roches leucocrates riches en feldspath potassique.

- Une unité dolérite - microdiorite - diorite composée de roches mélanocrates riches en minéraux ferro-magnésiens. Les roches mères de nos stations Château-Lambert, La Pransière et Tête Niqueuse appartiennent à cette unité.

Ces différentes unités proviennent de la cristallisation fractionnée d'un magma tholeiitique (plus ou moins contaminé par l'environnement sialique) et présentent des liens magmatiques avec les formations volcaniques pré-orogéniques du Viséen inférieur (séries d'Oderen et de Malvaux).

◆ Plutonites de la bordure Sud

La périphérie Sud du granite des Ballons présente divers types pétrographiques (GUERIN, 1967) : - granites peu quartziques,

- monzonites quartzifères,

- syénodiorites quartzifères de la vallée du Rahin (station de Plain des Boeufs) correspondant à des roches à grain moyen verdâtres ou rougeâtres,

- syénogabbros (station de Langenberg) moyennement grenus de couleur verte.

Ce faciès de bordure Sud correspondrait aux restes d'un magma "prégranitique" épargné par la granitisation et présente des liens magmatiques avec le volcanisme orogénique du Viséen supérieur (séries de Thann et de Giromagny).

3. Les Vosges septentrionales

Les Vosges septentrionales présentent, outre des dépôts sédimentaires siluriens, dévoniens et dinantiens, de nombreuses formations volcaniques ainsi que le magmatisme original du Champ du Feu.

La bande médiane du massif du Champ du Feu est constituée de terrains sédimentaires et de formations volcaniques où prédominent des faciès pyroclastiques basiques (station du Champ du Feu) ou acides. L'âge de la mise en place de ces formations, fortement métamorphisées, est incertain, probablement Dévonien inférieur ou moyen (VON ELLER, 1964).

Au Dévonien moyen, la sédimentation est fréquemment interrompue par des coulées et brèches d'explosion volcanique acides ou basiques correspondant aux formations volcaniques givétiennes du massif de Schirmeck. Ce massif comprend essentiellement (JUTEAU & ROCCI, 1965) :

- des laves basiques (spilites microlitiques et vacuolaires) associées à des diabases albitiques microlitiques (stations de Grendelbruch, Schirmeck et Donon), des diabases porphyriques et des dolérites (station d'Evaux-B),

Légende de la carte géologique simplifiée des Vosges méridionales.

t  Grès triasiques

Viséen supérieur

Série de Giromagny

4ème épisode volcanique

$\rho 2$  Tufs et ignimbrites rhyodacitiques

h3  Volcano-sédimentaire supérieur

3ème épisode volcanique

$\tau 2$  Trachyte supérieur

α  Andésite porphyrique et brèches

h2  Volcano-sédimentaire inférieur

Série de Thann-Giromagny

Episode du Crémillot

vs3  $\rho 1$ Ignimbrites rhyolitiques latitiques
Latites quartzifères

$\alpha \tau$  Complexe de latites à biotite

vs2 $\tau \beta$  Trachylabradorites porphyriques
et hypovolcaniques

$\sigma \eta$  Syénodiorites hypovolcaniques

$\tau 1$  Trachyte inférieur

h1  Grauwackes lutites
à arénites et lutites

vs1 

Episode des labradorites

β  Labradorites et brèches inférieures

Viséen inférieur à moyen

Séries de Plancher-Bas et de Malvaux

br2  Schistes, brèches et tufs
kératophyriques et albitophyriques

K1  Complexe volcanique acide
(kératophyres et orthophyres)

K2  Complexe volcanique de laves et tufs
(spilites, diabases et termes intermédiaires)

hb  Schistes

ha  Arkoses, grauwackes, pélites

br1  Brèche inférieure

Granites et roches associées

γ  Granite des Ballons

$\gamma \sigma$  Granite à augite et biotite peu quartzique

γM  Syénite de Sewen

$\mu \gamma$  Microgranite

$\eta \sigma$  Syénodiorite à biotite et amphibole

η  Diorite leucocrate à amphibole et pyroxène
Diorite mésocrate à pyroxène

θ  Diorites et gabbros d'Ermensbach

$\sigma \theta$  Monzogabbros du Petit Langenberg

vs3 : Microbrèches volcano-sédimentaires
à éléments trachytiques, albitophyriques et labradoritiques

vs2 : Brèches et poudingues volcano-sédimentaires
à éléments trachytiques, albitophyriques et labradoritiques
Brèche du Crémillot

vs1 : Volcano-sédimentaire de Leimbach
Brèches à éléments trachy-labradoritiques
dominants (Belfahy)

- 1: Ménard
- 2: Ordon
- 3: Tête des Sapins
- 4: Tête de Charborue (est)
- 5: Tête de Charborue (ouest)
- 6: Croix du Choléra
- 7: Planche des Belles Filles
- 8: Belfahy
- 9: Goutte des Saules
- 10: Saint-Antoine
- 11: Plain des Boeufs
- 12: Tête de Demesy
- 13: Tête Niqueuse
- 14: La Pransière
- 15: Château-Lambert
- 16: Langenberg
- 17: Masevaux
- 18: Rossberg
- 19: Gsang

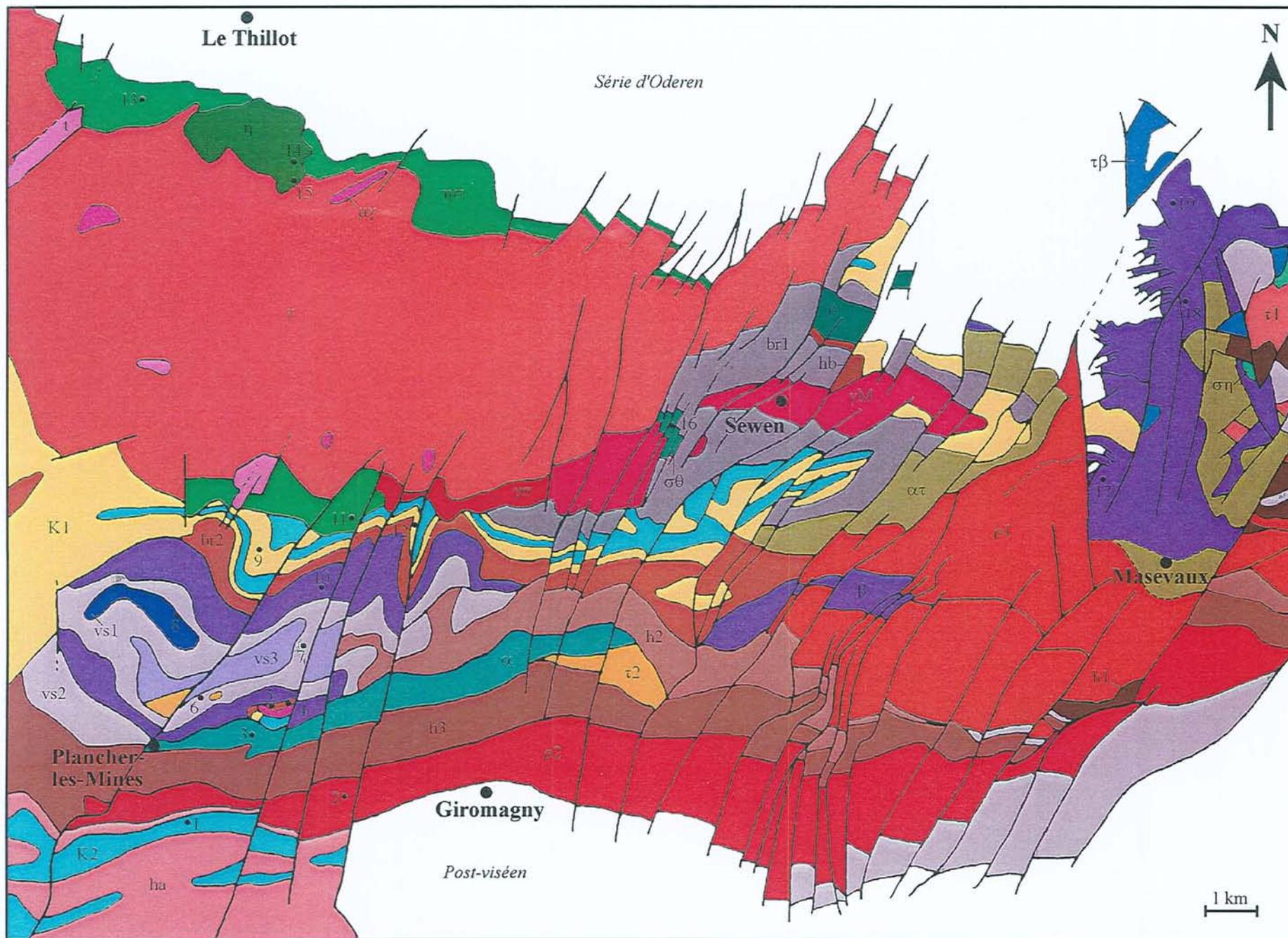


Fig. 8 : Carte géologique simplifiée des Vosges méridionales établie à partir des cartes à 1/50 000 de Giromagny et Thann.

- des laves acides représentées principalement par des kératophyres aphanitiques auxquels sont associés des orthokératophyres quartziques (station d'Evaux-R).

Toutes ces émissions s'accompagnent de brèches magmatiques et de roches pyroclastiques volcano-sédimentaires. L'originalité de ce massif est la grande abondance des formations acides et l'importance des phénomènes de silicification qui les ont affect es. Ce massif représente les produits d'un volcanisme initial caractérisé par l'association spilite - kératophyre et correspond à un massif ophiolitique.

Ces manifestations volcaniques semblent s'achever au début du Dévonien supérieur où des intrusions acides et basiques leur succèdent. L'absence de Tournaisien peut être interpr t e comme la manifestation de la phase bretonne au cours de laquelle a pu être débuté le magmatisme du Champ du Feu (mise en place des diorites de Neuntelstein ?). A la fin du Viséen, la phase sud te se traduit par le plissement du complexe siluro - dévonien - dinantien suivie par la mise en place d'intrusions dioritiques   granitiques du Champ du Feu (le plus tardif étant le granite du Kagenfelds daté du Stéphanien).

Après une période d'émersion, la sédimentation reprend au Permien et s'accompagne d'émissions volcaniques provoqu es par des mouvements d'âge Saalien. La série permienne affleure, dans les Vosges septentrionales, dans les bassins de Saint-Dié et de Villé et dans les régions du Donon et du Nideck ; elle se compose de diverses formations allant de l'Autunien au Buntsandstein (BAROZ & BENZAKOUR, 1989).

Dans le bassin de Saint-Dié, cinq formations ont été individualis es dont, à la base, les couches de Meisenbruckel constitu es d'arkoses, d'argilites et de tufs volcaniques. Elles s'achèvent par des coulées de basaltes (station de Servaumont) et de trachyandésites. Dans la région du Nideck, la série permienne comprend une formation inférieure constitu e de matériaux acides (brèches, tufs pyroclastiques de la station de Schliffstein et ignimbrites) et corr l e avec les couches de Meisenbruckel. Ces matériaux sont surmontés par des dépôts détritiques puis par les ignimbrites des coulées principale et supérieure. Dans la région du Donon, la série permienne débute par les couches de Meisenbruckel, constitu es de tufs pyroclastiques hyperacides auxquels on peut rattacher la rhyolite de Blanc Rupt (station de Blanc Rupt). Ces matériaux sont recouverts par tout un ensemble de formations dont les rhyolites "normales" (station de Malcôte) corr l es avec les coulées principale et supérieure du Nideck.

Les diverses formations  tudi es dans les Vosges (Nord et Sud) sont consign es dans le Tab. 6. Les descriptions pétrographiques et les compositions chimiques des roches mères sont report es en annexe I.

Tab. 6 - Stratigraphie simplifiée de l'ère primaire dans les Vosges d'après VON ELLER (1964) ; JUTEAU & ROCCI (1965) ; GUERIN (1967) ; GAGNY (1968) ; STUSSI (1970) ; FOURQUIN (1973) ; ANDRE (1983) ; BAROZ & BENZAKOUR (1989).

Ma	Systèmes		Etages	Fomations Plutoniques	Formations Volcaniques	Roches mères étudiées
248	PERMIEN	Sup	Thuringien		Rhyolites "normales"	Rhyolite de Malcôte
		Inf	Saxonien		Couches de Meisenbruckel et formation inférieure du Nideck	Basalte de Servaumont - Rhyolite de Blanc Rupt Tufs pyroclastiques acides de Schliffstein
286	CARBONIFERE	Sup	Autunien			
			Stéphanien	Granite du Kagenfelds		
			Westphalien	Granite des Crêtes	Porphyrites quartzifères dellénitiques	
333		Inf	Namurien	Granite des Ballons	Porphyres quartzifères rhyolitiques	Porphyre quartzifère rhyolitique d'Ordon
			Viséen Sup.		Trachyandésites Porphyriques Brèches du Crémillot	Trachyadnésite de Tête des Sapins Brèches de Planche des Belles Filles et Croix du Choléra
			Viséen Moy.	Plutonites Sud	Porphyrites trachytiques Porphyrites latitiques et leucolatitiques	Porphyre trachytique calco-magnésien de Belfahy Syénodiorite de Plain des Boeufs Syénogabbro de Langenberg
			Viséen Inf.	Plutonites Nord	Porphyrites andésitiques Orthophyres et Kératophyres Albitophyres Diabases	Porphyrite andésitique de Gsang, Rossberg, Masevaux, St Antoine et Schlussekopf Diorite de Château-Lambert, Tête Niqueuse et La Pransière Diabase de Ménard - Kératophyres et Tufs de Goutte des Saules, Tête de Demesy et Charborue
360	DEVONIEN	Sup	Tournaisien	Diorite de Neuntelstein		Diorite de Neuntelstein
		Moy	Framénien Frasnien			
387		Inf	Givétien		Volcanisme du Massif de Schirmeck	Diabases de Grendelbruch, Schirmeck et Donon Dolérite d'Evaux-B -Orthokératophyre d'Evaux-R
			Eifeilien			
408			Emsien Praguien Lochkovien		Volcanisme de la bande médiane du Champ de Feu	Tufs pyroclastiques basiques de Champ du Feu

III. CLIMAT

Dans son étude bioclimatique du Massif Vosgien, CACHAN (1974) a proposé un essai de définition des principaux types climatiques à l'aide de données recueillies sur la période 1961-1972. Dans l'ensemble, le climat dans le Massif Vosgien est assez humide et présente de fortes variations en fonction de l'altitude et, par son orientation Nord-Sud, le versant lorrain est plus froid et plus humide que le versant alsacien (Fig. 9).

A. PRÉCIPITATIONS

Du pied du versant lorrain (Chaumousey, 357 m) les précipitations moyennes annuelles passent d'environ 1000 mm à plus de 2000 mm en altitude (Sewen, lac d'Alfeld, 620 m ; Lepuix, Ballon d'Alsace, 1100 m) puis décroissent brutalement sur le versant alsacien jusqu'à 550 mm (Ebersheim, 169 m). Le versant Ouest est ainsi plus pluvieux que le versant Est, protégé par la barrière orographique que constitue la ligne des crêtes. L'indice de continentalité pluviale I représente le rapport des pluies des six mois chauds de mai à octobre sur celles des six mois froids de novembre à avril. Il augmente, à altitude égale, d'Ouest ($I < 1$) en Est ($I > 1$) et diminue quand l'altitude augmente, traduisant un relatif assèchement estival en montagne, largement compensé par l'augmentation de la hauteur de pluie en altitude. La nébulosité s'accroît avec l'altitude (les brouillards sont fréquents à plus de 1000 m) et l'enneigement est important au-dessus de 800 m.

B. TEMPÉRATURES

Les températures moyennes annuelles suivent globalement le même étagement et passent de 7,9 °C sur le versant lorrain (Chaumousey, 357 m, T_{\min} : -1,9 °C, T_{\max} : 17 °C) à 6,2 °C en altitude (Orbey, 940 m, T_{\min} : -2,2 °C, T_{\max} : 14,2 °C) et augmentent sur le versant alsacien jusqu'à 9,5 °C (Sélestat, 182 m, T_{\min} : -0,3 °C, T_{\max} : 19,5 °C). Ces températures peuvent être affectées par la nébulosité : en hiver, la nébulosité nocturne fait obstacle à la déperdition de chaleur et les périodes pluvieuses ont alors des températures sensiblement supérieures aux périodes de faible nébulosité. En été, la nébulosité nocturne est sans effets notables, par contre la nébulosité diurne provoque une diminution de la température en arrêtant le rayonnement solaire.

C. BILAN HYDRIQUE

L'évapotranspiration potentielle (ETP) décroît avec l'altitude, passant de 670 à 490 mm pour la région Ouest et de 680 à 520 mm pour la région Est. Le bilan hydrique ($P - ETP$) est généralement déficitaire au mois de juillet. La valeur de ($P - ETP$) est positive en altitude et sur le versant lorrain ; par contre, à des altitudes plus faibles sur le versant alsacien, le bilan est souvent en déficit.

Fig. 9 - Variations climatiques du versant lorrain au versant alsacien (CACHAN, 1974).

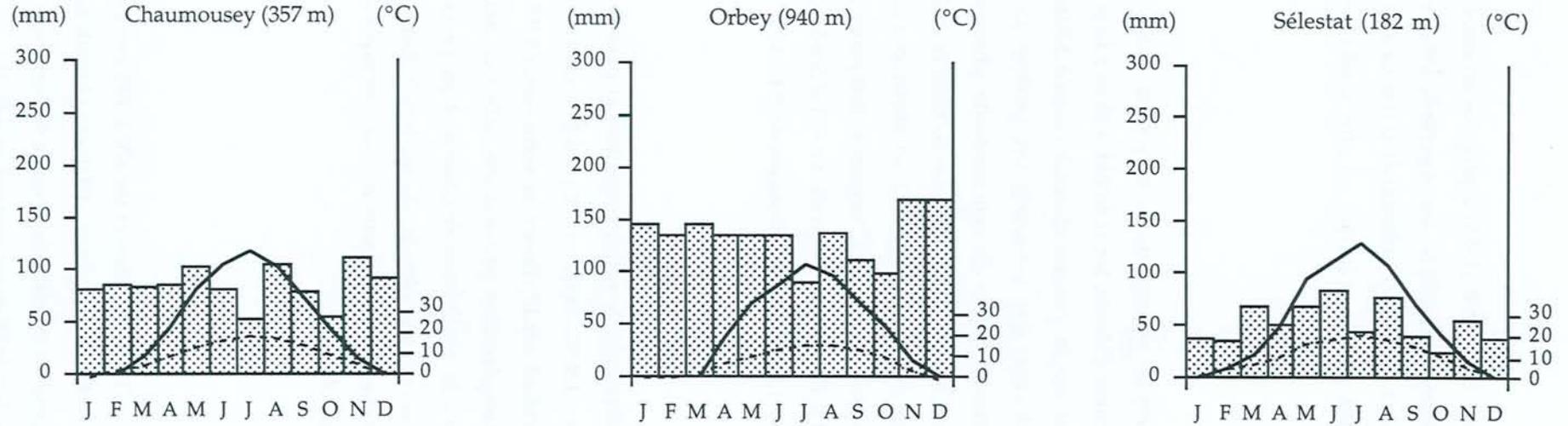


Fig. 10 - Données climatiques (précipitations mensuelles, ETP et température moyenne) de la station Gsang (1100 m) d'après CACHAN (1974).

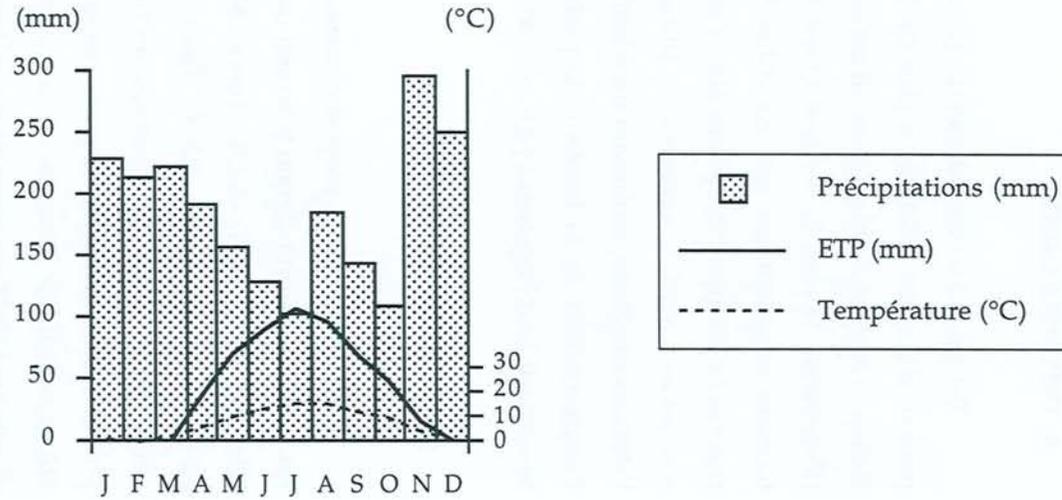
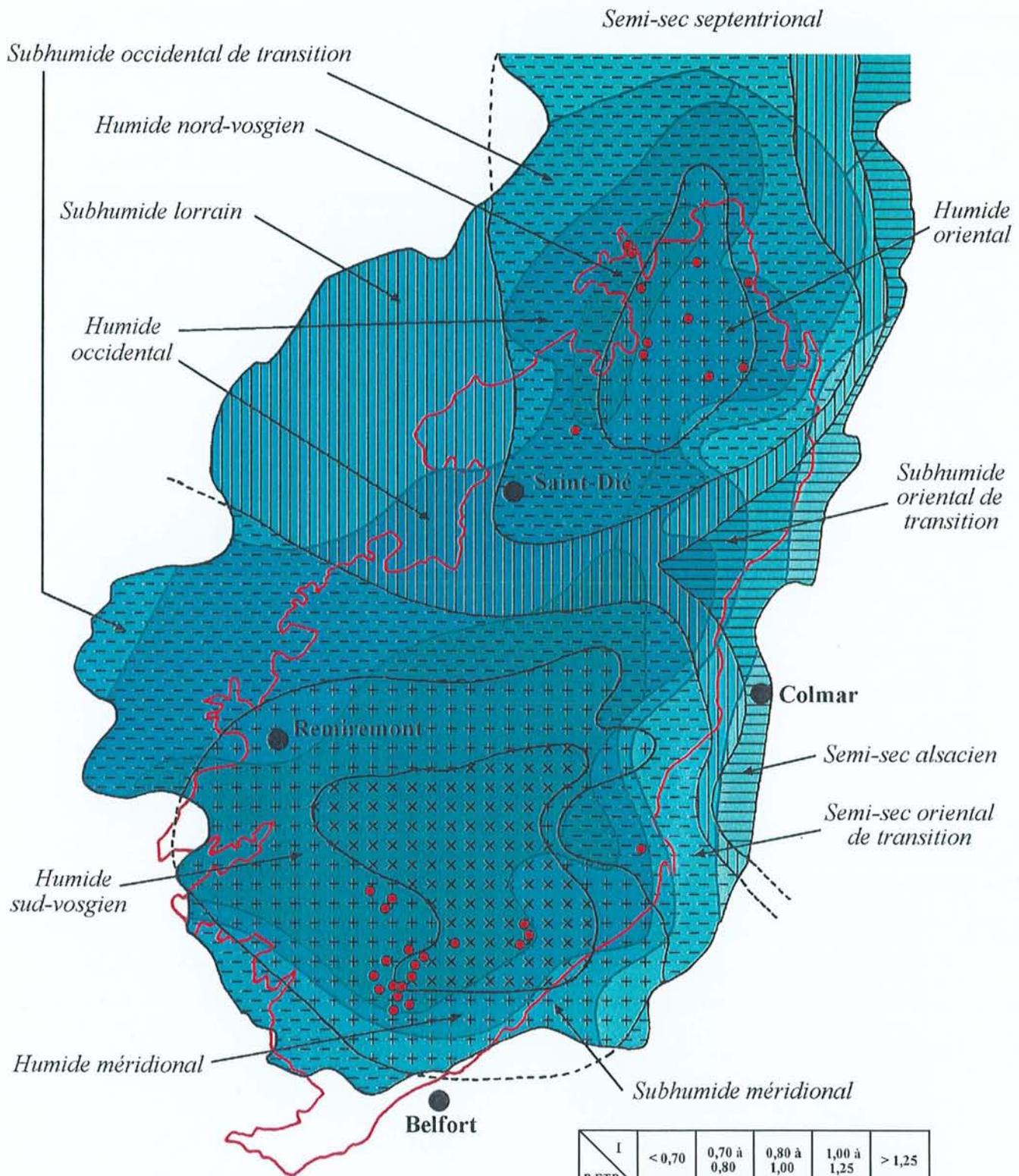


Fig. 11 : Climats régionaux du Massif Vosgien (d'après CACHAN, 1974).



I	< 0,70	0,70 à 0,80	0,80 à 1,00	1,00 à 1,25	> 1,25
P-ETP					
> 100	x x x	+ + +			
100 à 0	x x x	+ + +			
0 à -100	x x x	+ + +			
-100 à -200	x x x	+ + +			
< -200	x x x	+ + +			

Toutes ces données climatiques peuvent présenter des variations dues à des conditions locales telles que l'orientation, l'exposition aux vents dominants, l'enclavement ou l'ouverture du site.

D. TYPES CLIMATIQUES

A partir des données du bilan hydrique et de l'indice de continentalité pluviale (I), CACHAN (1974) a défini différents types climatiques vosgiens (Fig. 11).

1. Climat semi-sec

Ce type climatique correspond aux régions de faible altitude (moins de 400 m et même moins de 250 m) où la pluviosité moyenne annuelle est inférieure à 1000 mm avec un déficit au point de vue du bilan hydrique sur quatre mois (de juin à septembre).

2. Climat subhumide

La pluviosité est légèrement plus élevée (entre 950 et 1150 mm) avec deux mois déficitaires (juin et juillet) et des altitudes inférieures à 400 m.

3. Climat humide

Ce type climatique est localisé au-dessus de 400 m d'altitude avec des précipitations moyennes annuelles supérieures à 1000 mm. L'indice de continentalité pluviale est généralement inférieur à 1 et juillet est le seul mois déficitaire du point de vue du bilan hydrique. Toutes nos stations vosgiennes correspondent à ce type climatique pouvant être subdivisé en plusieurs tendances :

a. Type Sud-Vosgien

C'est le type le plus humide (précipitations moyennes annuelles supérieures à 1500 mm) localisé à des altitudes supérieures à 500 m (excepté dans quelques vallées intérieures). Pour des précipitations supérieures à 1750 mm et I nettement inférieur à 1 on distingue un type montagnard correspondant à la zone la plus élevée de part et d'autre de la ligne de crêtes. La plus grande partie de nos stations appartient à ce type Sud-Vosgien, notamment la station Gsang qui sera notre Andosol de référence vosgien, caractérisé par un climat assez froid (T moy. ann. : 6,2 °C, T_{min} : -1 °C, T_{max} : 13,9 °C), particulièrement humide (P moy. ann. : 2200 mm) et un bilan hydrique positif, excepté en juillet (Fig. 10) (les autres stations concernées sont : Rossberg, Masevaux, St Antoine, Tête des Sapins, Ménard, Ordon, Belfahy, Tête de Demesy, Planche des Belles Filles, Croix du Choléra, Goutte des Saules, Tête de Charborue (Est et Ouest), Château-Lambert, Tête Niqueuse, La Pransière, Langenberg et Plain des Boeufs).

b. Type Nord-Vosgien

La pluviosité est moindre (~ 1400 mm) et seules quelques stations correspondent à ce type : Malcôte, Blanc Rupt et Donon.

c. Type occidental

Une seule station représente ce type (Servaumont) localisé autour de 400 m avec des pluviosités variant de 1000 à 1450 mm, qui décroissent légèrement, à altitude égale, du S au N.

d. Type oriental

La pluviosité y est comprise entre 1000 et 1300 mm et les stations correspondantes sont : Champ du Feu, Schlussekopf, Evaux, Neuntelstein, Schirmeck, Schliffstein, Grendelbruch.

e. Type méridional

Les régions intéressées se situent à des altitudes plus élevées et présentent des précipitations plus fortes que dans le type précédent (1170 à 1540 mm).

IV. VÉGÉTATION

Le Massif Vosgien présente une succession d'étages de végétation traduisant, comme dans tout massif montagneux, des variations climatiques liées à l'altitude. A cette différenciation verticale s'ajoute la dissymétrie climatique existant entre les versants occidentaux et orientaux. Cet étagement se distingue nettement et débute par (DION, 1979) :

- A la base, une ceinture de feuillus correspondant à l'étage collinéen. Sur le versant lorrain le hêtre prédomine (hêtraie acidiphile), mais localement les chênaies à charmes peuvent se développer. Cet étage se rencontre jusqu'à 350-400 m sur le versant lorrain et monte beaucoup plus haut sur le versant alsacien (600 m) où la chênaie domine.

- A plus forte altitude, l'étage des feuillus est relayé par l'étage montagnard comportant trois niveaux. Sur le versant lorrain, l'étage montagnard inférieur, caractérisé par la hêtraie acidiphile, s'étend de 350-400 m à 400-450 m. Puis l'étage montagnard moyen, où se développe la hêtraie sapinière, se rencontre de 400-450 m à 800 m. Au-dessus, l'étage montagnard supérieur débute par la hêtraie sapinière à épicéas, puis les résineux disparaissent presque totalement vers 900-1000 m et les hêtraies des sommets à érables et sorbiers avec quelques conifères isolés apparaissent jusqu'à 1250-1300 m. Sur le versant alsacien les étagements se distinguent plus difficilement : hêtraie à

chênes à l'étage montagnard inférieur, puis hêtraie sapinière à l'étage montagnard moyen et, à l'étage montagnard supérieur, les mêmes essences que sur le versant lorrain mais beaucoup moins étendues.

- A l'approche des sommets, la taille des arbres diminue et ils disparaissent et laissent la place aux landes des hautes chaumes primaires ou secondaires (effets du pâturage), plus étendues sur le versant alsacien.

Toutes nos stations se situent sous couvert forestier avec un important tapis herbacé et appartiennent à l'étage montagnard moyen à supérieur. Les caractéristiques environnementales de nos stations (roche mère, altitude, exposition, climat et végétation) sont reportées dans les fiches de sols. Les données concernant la température et la pluviométrie ont été estimées à partir des stations les plus proches de CACHAN (1974).

V. PÉDOGENÈSE

Dans le Massif Vosgien, l'évolution pédologique est principalement influencée par les facteurs roche mère et topographie. Ainsi, trois grands ensembles peuvent être distingués :

- Les Basses Vosges gréseuses au Nord,
- les Hautes Vosges Hercyniennes ou Vosges cristallines au Sud,
- de part et d'autre du massif, l'extrémité de la plaine lorraine et les collines sous-vosgiennes en Alsace.

Nous nous limiterons à relater les caractères principaux de la pédogenèse dans les Hautes Vosges. Elles comprennent tout un ensemble de roches cristallines et métamorphiques, mais aussi des terrains volcaniques et volcano-sédimentaires dans les parties méridionales et septentrionales sur lesquels nous reviendrons dans la seconde partie de ce mémoire. La pédogenèse en terrain cristallin, métamorphique et sur les séries grauwackeuses a fait l'objet de nombreux travaux dont ceux de SOUCHIER (1971), BONNEAU *et al.* (1978) et BOUDOT (1976, 1982) auxquels nous avons emprunté l'essentiel de ce qui suit.

1. Les sols

Le secteur des Hautes Vosges cristallines est caractérisé par la grande extension du climax sol brun acide à l'étage montagnard inférieur et moyen et de sols intermédiaires (sols bruns ocreux et sols ocres podzoliques) à l'étage montagnard supérieur. Nous ne traiterons pas ici des sols alluviaux ni des sols hydromorphes rencontrés dans les vallées.

a. Sols brunifiés

Ces sols couvrent la plus grande partie de cette région et présentent toute la séquence de sols allant des sols bruns mésotrophes aux sols bruns ocreux.

◆ Sols bruns mésotrophes

Ils se rencontrent à l'étage montagnard inférieur, sur diorites, dolérites et amphibolites, présentent un humus de type mull et une forte argilisation.

◆ Sols bruns acides

Ce sont sans doute les mieux représentés. Aux altitudes moyennes, ils se développent sur des arènes granitiques ou sur des formations gneissiques caillouteuses et sont fréquemment cultivés. Sous forêt, ils présentent soit un mull actif lié à une flore neutrophile, soit un mull-moder sous une végétation à canche, luzule et mousses, ces différences semblant liées à la roche mère, à la position topographique et au colluvionnement. A de plus hautes altitudes, ils montrent un humus de type mull et fréquemment mull-moder. Ils sont liés à des arènes de granulométrie variable et sont bien représentés sur gneiss, granite du Champ du Feu, granite de Senones, granite des Crêtes et granite fondamental. Ils diffèrent peu des précédents excepté par un taux de saturation plus faible, une pénétration plus profonde de la matière organique et la présence de petites quantités d'aluminium "actif". Sur le versant alsacien, plus doux, ils sont caractérisés par une activité biologique plus forte et un complexe plus riche en bases. Les sols bruns acides de bas de pente présentent un mull-moder très sec et très mal structuré.

◆ Sols bruns ocreux

Dans les régions de moyenne altitude, les sols bruns ocreux couvrent de grandes surfaces sur certains plateaux granitiques et sur les hauts de pente des croupes gneissiques. Leur répartition est liée à l'acidité et à la richesse en fer du matériel. Ils sont caractérisés par un humus de type moder ou moder-mor surmontant un horizon A₁Bh massif. A plus haute altitude, ils présentent un humus de type mull-moder ou moder et un horizon (B) ocre à structure floconneuse. Une migration d'acides fulviques et d'aluminium complexé indique un début de podzolisation. Ces sols se rencontrent fréquemment sous la sapinière à myrtille à l'étage montagnard moyen et constituent le sol climacique de la hêtraie à l'étage montagnard supérieur.

◆ Sols bruns humifères et sols bruns colluviaux

En altitude, et surtout sous pelouses et chaumes, les sols bruns acides et les sols bruns ocreux sont relayés par le type humifère épais et très riche en matière organique.

Les sols bruns colluviaux sont fréquents en bas de versant à fortes pentes où les colluvions provoquent une brunification locale, même sur des granites très acides, se traduisant par la présence d'un horizon (B) brun sous un mull très épais.

b. Sols podzolisés

Dans la plupart des cas, les sols podzolisés ne se rencontrent que sur des surfaces limitées, excepté aux plus hautes altitudes où ils sont mieux représentés.

◆ Sols ocres podzoliques

Aux moyennes altitudes, ils peuvent couvrir des surfaces non négligeables sur roches cristallines acides constituées de migmatites et brèches volcano-sédimentaires. A de plus hautes altitudes, la différenciation morphologique s'affirme : sous un moder ou moder-mor épais s'individualisent un horizon Bh foncé et un Bs ocre.

◆ Podzols

Des sols podzoliques ou podzols ferrugineux apparaissent, aux altitudes moyennes, sur des faciès très quartzeux, filoniens et sur mylonite quartzique. Les podzols humo-ferrugineux sont mieux représentés aux plus hautes altitudes, mais toujours limités, sur roches cristallines, aux roches les plus acides, pauvres en argiles et en minéraux altérables, fournissant une arène grossière. Les granites du Brézouard et de Kagenfels sont particulièrement favorables à la podzolisation ; d'autres granites moins acides peuvent localement orienter la pédogenèse dans ce sens par des passées plus quartzueuses, mylonitisées ou par des filonets de roches acides. La différenciation morphologique s'accroît avec un E cendré, un Bh en taches irrégulières et un Bs diffus et localement induré.

2. Pédogenèse

Dans ce secteur des Hautes Vosges cristallines, la pédogenèse est principalement marquée par le développement des processus de brunification et de podzolisation modérée. Une podzolisation accentuée peut localement s'exprimer sur des roches mères très acides ou au niveau de zones de replat. A ces phénomènes s'ajoutent un ralentissement de la décomposition de la matière organique en altitude, une acidification des sols en haut de pente par migrations latérales et un enrichissement en bas de pente par colluvionnement.

Dans le cas d'un versant simple (chaîne de sols sur granite calco-alcalin de la Fig. 12) on observe par exemple la succession sol brun ocreux en haut de pente, sol brun acide plus ou moins désaturé, sol brun colluvial en bas de pente. Pour SOUCHIER (1971), cette évolution convergente vers la brunification dans les zones colluviales s'observe fréquemment à l'étage montagnard supérieur et moyen. L'effet du colluvionnement apparaît comme une condition suffisante à la brunification en milieu acide et freine la podzolisation climatique ou chimique due à la roche mère. L'existence d'un replat peut compliquer cette succession (Fig. 13) en favorisant les migrations verticales ; le stade de la podzolisation accentuée peut alors être atteint.

Fig. 12 - Chaîne de sols dans les Hautes Vosges cristallines. Cas d'un versant simple (Robinet).
D'après BONNEAU *et al.* (1978).

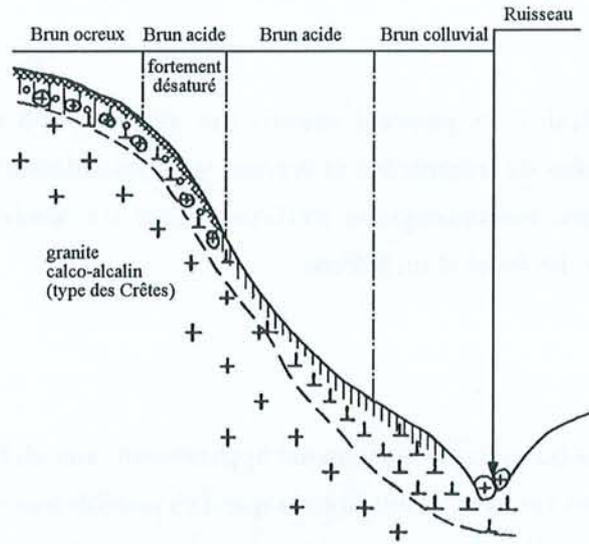
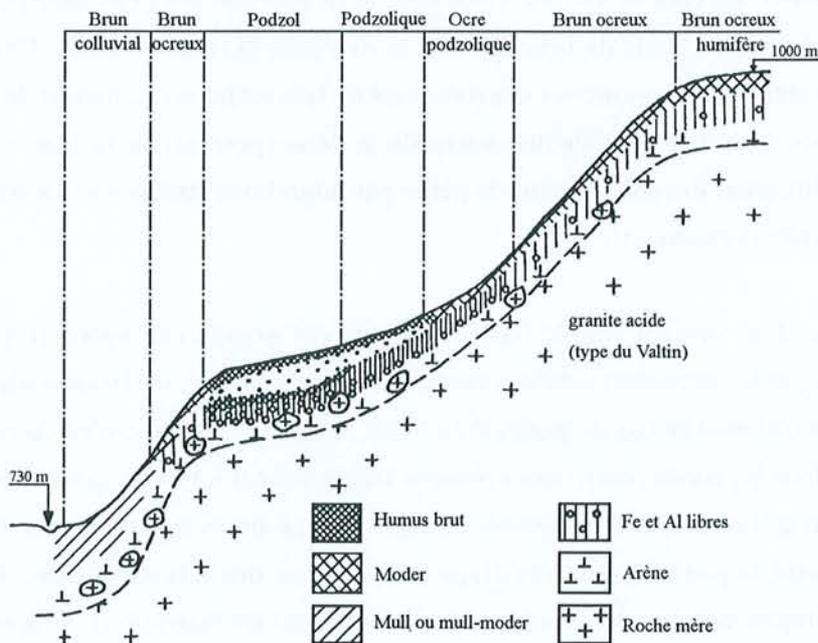


Fig. 13 - Chaîne de sols dans les Hautes Vosges cristallines. Cas d'un versant complexe (Forêt des Hospices de Nancy). D'après BONNEAU *et al.* (1978).



a. Brunification

SOUCHIER (1971) décrit ce processus comme une altération soustractive, sans notable redistribution. La brunification se développe à partir d'un matériau riche en minéraux altérables ; elle est très généralement la règle pour des teneurs en Fe_2O_3 , dans la roche mère, supérieures à 4 % et apparaît sur des arènes de granulométrie variable.

La brunification est liée à des conditions biologiques de forte activité minéralisatrice : sous les humus les plus actifs (mull), les migrations sont réduites, la polymérisation ou la dégradation des agents complexants intervenant dès l'horizon A_1 . Ce type de pédogenèse aboutit à la constitution de structures argilo-humiques très stables. Le mode d'humification est caractérisé par une transformation rapide d'une fraction de matière organique fraîche en humine héritée et par son incorporation jusqu'à l'horizon A_1B . Les acides fulviques sont peu abondants et tendent à disparaître en profondeur ; les acides humiques se forment dans les horizons supérieurs et y sont retenus.

La brunification est marquée par une argilisation croissante du profil des horizons C vers A_1 . Dans les horizons profonds, le fond d'héritage est constitué d'illite, de chlorite primaire et d'interstratifiés I - C, les vermiculites étant faiblement représentées. La pédogenèse s'exerce sur les argiles livrées par l'arénisation et sur les minéraux ferro-magnésiens de l'arène, qui aboutissent par argilisation progressive et sans modification structurale importante aux argiles micacées. Dans les horizons A ou AB, une transformation ménagée de cette fraction a lieu par vermiculitisation.

Pour les sols bruns les pertes en fer sont modérées et sans redistribution. Dans les cas des sols bruns ss, les formes cristallines du fer prédominent (JEANROY, 1983). La forte altération produit pour la plus grande part des oxydes et oxyhydroxydes bien cristallisés ou cryptocristallins. Sous l'action de la matière organique une amorphisation se développe en A_1 se traduisant par la présence de complexes hydroxyferriques peu mobiles. L'aluminium amorphe est peu abondant et sa teneur varie peu dans le profil. Les sols bruns acides présentent les mêmes caractères et des complexes hydroxyferriques plus mobiles apparaissent.

b. Podzolisation modérée

SOUCHIER (1971) considère ce processus non pas comme une intensification de l'altération globale, mais plutôt comme une altération biochimique dégradante prenant naissance dans l'horizon A_0A_1 et se diffusant dans tout le profil. Les sols résultants se développent sur des arènes de granulométrie fine, présentant des teneurs en Fe_2O_3 d'environ 2,5 % caractérisant ce domaine intermédiaire.

La fraction fulvique est plus importante que dans les sols bruns et plus stable en profondeur ; il en est de même pour les acides humiques, qui se maintiennent mieux en profondeur que dans les sols bruns et les podzols. Une fraction non négligeable d'humine existe et croît en profondeur. Les horizons Bh et Bs sont caractérisés par une maturation progressive des composés solubles issus des litières qui s'insolubilisent et dont le terme est une humine de néoformation.

L'argilisation est moindre que dans les sols bruns et les transformations des minéraux phylliteux sont ménagées. La vermiculitisation se poursuit par une agradation¹ alumineuse (ou ferrique) dans les horizons B, la dégradation² ultérieure reste limitée. Il semble que dans les sols ocres podzoliques l'altération soit freinée dans les horizons A et B.

Dans les sols bruns ocres, le fer n'est pas redistribué et l'aluminium amorphe présente une teneur maximum en B. Au stade des sols ocres podzoliques, la redistribution du fer est plus marquée et se fait en deux étapes : accumulation de complexes mobiles en Bh, non mobiles en Bs (JEANROY, 1983).

c. Podzolisation accentuée

Essentiellement dégradant et redistributif selon SOUCHIER (1971), le processus de podzolisation atteint rarement le stade le plus accentué sur roches cristallines. Les podzols sont liés à un matériel originel représenté par une arène pauvre en fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 1,5\%$) où la percolation des solutions organiques acides est facilitée par une granulométrie grossière. L'influence de la roche mère et des pédoclimats des sols l'emportent sur l'action de la végétation, qui ne représente qu'une "cause seconde".

GUILLET (1972b) considère ce processus comme une podzolisation forestière ou primaire, en équilibre avec une végétation forestière stable et non dégradée, par opposition à la podzolisation de dégradation se rencontrant dans les Basses Vosges gréseuses. Les sols atteignent des degrés d'évolution divers et présentent des profils très humifères à horizon E coloré. Les conditions climatiques froides et humides sont favorables à la production intense de composés peu polymérisés qui migrent jusqu'à l'horizon Bh où ils précipitent (rapports AF/AH élevés), les composés les plus condensés s'insolubilisent dès l'horizon E.

Le développement de la fraction argileuse est très faible. Dans les horizons A_0A_1 le milieu est fortement lixiviant pour l'aluminium et les argiles les moins résistantes sont détruites ou plus ou moins dégradées en montmorillonite de dégradation. Dans les horizons Bh et Bs a lieu une agradation des minéraux micacés de l'horizon C plus ou moins vermiculitisés en chlorite secondaire. En B/C et C l'acidité modérée du milieu peut aboutir à la conservation d'illites-vermiculites plus ou moins faiblement dégradées, les minéraux plus fragiles disparaissant dès B/C.

Le comportement différentiel du fer et de l'aluminium s'accroît. La redistribution du fer est très importante et marque une accumulation maximale en Bh où le fer est sous forme de complexes mobiles. La concentration en aluminium amorphe augmente au niveau de l'horizon Bs (JEANROY, 1983).

¹ Transformation positive où des produits à espacements variables, instables, passent à des phyllites de plus en plus semblables aux micas et aux chlorites (MILLOT, 1964).

² Transformation négative où des minéraux stables (micas, chlorites) passent à des minéraux ouverts à espacement variable (MILLOT, 1964).

Seconde partie

***MISE EN ÉVIDENCE ET CARACTÉRISATION
DES ANDOSOLS DANS LES VOSGES***

INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu dans la première partie, des études antérieures avaient déjà établi l'existence d'Andosols dans le Massif Vosgien à la fin des années soixante (DUCHAUFOR & SOUCHIER, 1966b ; HETIER, 1968). Toutefois, ces travaux étaient basés sur des critères analytiques qui, à la suite des travaux réalisés au sein de l'ICOMAND, pouvaient être considérés comme inappropriés.

C'est pourquoi ZIDA (1994) a réalisé une nouvelle approche sur l'existence de tels sols dans les Vosges. Il a pu ainsi mettre en évidence quelques Andosols vérifiant ces nouvelles définitions sur des roches anciennes et compactes du Massif Vosgien. Le second volet de cette étude poursuit cette démarche tout en intégrant certains de ses résultats. Ce sont les critères très stricts de la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994) qui ont été retenus pour cette vérification, sans négliger toutefois les caractères morphologiques propres aux Andosols.

Dans un premier temps, nous traiterons donc de la mise en évidence de l'existence d'Andosols dans les Vosges en nous basant sur les travaux de ZIDA (1994) et en élargissant l'inventaire. Puis nous nous attacherons à la caractérisation des principales propriétés de ces Andosols vosgiens et nous examinerons les sols ne satisfaisant pas les critères. Enfin, ces résultats nous permettront d'examiner les facteurs de l'andosolisation dans cet environnement et les limites au développement de ce processus. Auparavant nous exposerons les méthodes de prospection et d'échantillonnage ainsi que les techniques d'analyses utilisées.

CHAPITRE I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

I. PROSPECTION ET LOGIQUE DE L'ÉCHANTILLONNAGE

A. CHOIX DES STATIONS

L'étude de la répartition des Andosols à l'échelle du globe (cf. 1^o partie) a montré qu'ils se rencontraient le plus souvent sous des climats fortement et constamment humides et sur des matériaux facilement et rapidement altérables. Aussi la sélection des sites d'échantillonnage a été conduite en fonction de ces deux critères fondamentaux (climatique et lithologique) nécessaires à la manifestation du processus d'andosolisation.

L'altérabilité des roches mères peut être estimée par la proportion de minéraux altérables (pyroxène, olivine, plagioclases calciques, biotite...) et par la texture de la roche, mais elle est difficilement quantifiable. Aussi nous sommes nous appuyés sur le chimisme des roches pour conduire la sélection des sites. Nous avons ainsi prospecté sur des roches mères volcaniques ou plutoniques, les plus basiques ($\text{SiO}_2 < 52\%$) ou de chimisme intermédiaire ($\text{SiO}_2 < 66\%$), riches en minéraux altérables et présentant une texture microlitique ou microgrenue (cf. 1^o partie et annexe I).

De même, il est malaisé de mesurer l'humidité constante nécessaire à l'andosolisation (couches nuageuses, brouillards, condensation au niveau de la végétation...). Nous nous sommes donc appuyés sur des régimes de précipitations, des altitudes et des expositions pouvant contribuer au maintien d'une forte humidité en privilégiant les stations situées aux altitudes les plus élevées, aux expositions Nord et Ouest et soumises aux plus fortes précipitations (cf. 1^o partie).

Enfin, quelques critères supplémentaires sont intervenus dans la sélection des sites :

- une position topographique telle que les risques de remaniement mécaniques, de colluvionnement et d'apports latéraux soient limités autant que possible, c'est-à-dire des situations en haut de versant et de faible pente,
- des caractéristiques morphologiques se rapprochant de celles communes aux Andosols (couleur noire, forte épaisseur des horizons humifères, structure microagrégée). Les profils montrant des évidences morphologiques de transferts au sein d'horizons illuviaux ont été systématiquement écartés.

B. ÉCHANTILLONNAGE

Dans la première phase de mise en évidence des Andosols dans les Vosges nous avons recherché l'existence de propriétés andiques dans une vingtaine de profils sélectionnés selon les

critères précédemment cités. Selon la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), les propriétés andiques doivent se manifester sur une épaisseur de 35 cm au moins dans les 60 cm supérieurs du sol minéral. Cette épaisseur minimale correspond à la "section de contrôle" andique. Pour d'une part rencontrer au mieux ces exigences et d'autre part restreindre le nombre d'échantillons à analyser, seuls deux niveaux ont été prélevés : l'un entre 10-20 cm de profondeur, l'autre entre 40-50 cm. Ces deux échantillons permettent de couvrir convenablement l'épaisseur minimale de la section de contrôle andique à l'intérieur de la profondeur requise.

Pour la phase de caractérisation des Andosols des Vosges, deux profils répondant positivement aux critères ont été retenus. On a alors procédé à un nouvel échantillonnage et tous les horizons ont été prélevés jusqu'à la roche mère.

II. MÉTHODES D'ÉTUDE

Comme pour l'échantillonnage, les analyses se sont déroulées en deux temps : une première phase de recherche des propriétés andiques ($Al_0 + 1/2Fe_0$, Da, Rét.P et quelques autres analyses) suivie de la caractérisation plus précise des Andosols des Vosges.

A. RECHERCHE DES PROPRIÉTÉS ANDIQUES

La somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ est déterminée par une extraction à l'oxalate sur la fraction < 2 mm séchée à l'étuve à 35 °C. L'oxalate pH 3 (TAMM, 1922 ; SCHWERTMANN, 1964), agissant par son fort pouvoir complexant et, dans une moindre mesure par son acidité (JEANROY, 1983), est constitué d'oxalate d'ammonium 0,2 M tamponé à pH 3 par de l'acide oxalique. L'extraction est effectuée par agitation de 1 g de sol dans 80 mL de réactif pendant 4 h à froid (20 °C) et à l'obscurité. Après centrifugation (5 min à 5000 tr/min), Al, Fe et Si sont dosés par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) dans le surnageant (notés Al_0 , Fe_0 et Si_0).

La densité apparente (Da) est estimée d'après la méthode du cylindre : sur le terrain, un cylindre de volume connu est enfoncé dans le sol et l'échantillon ainsi prélevé est ensuite séché une nuit à 105 °C puis pesé. La Da est obtenue par la formule :

$$Da = \text{masse échantillon sec} / \text{volume apparent (en g.cm}^{-3}\text{)}.$$

La rétention des phosphates (Rét.P) est évaluée par la méthode de BLAKEMORE *et al.* (1981) modifiée : 5 g de sol (fraction < 2 mm séchée à l'étuve à 35 °C) et 25 mL d'une solution contenant 1 mg P/mL ajustée à pH 4,6 sont agités 24 h puis centrifugés (20 min à 18000 tr/min) ; le phosphate résiduel est dosé dans le surnageant par chromatographie ionique (DIONEX série 2000), technique plus fiable et plus sensible que la colorimétrie préconisée dans la méthode originale.

B. ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

Toutes les autres analyses portent sur des échantillons tamisés à 2 mm et séchés à 35 °C, excepté pour la mesure de l'humidité à 15 bars (H₂O 15 bars) effectuée sur des échantillons frais et séchés puis réhumectés par la méthode de la presse à membrane. Ces mesures n'ont porté que sur les profils répondant aux critères des Andosols.

1. Constituants organiques

Le carbone et l'azote total sont dosés par un autoanalyseur CHN Carlo Erba 1108. L'indice mélanique (Im) est évalué par la méthode de HONNA *et al.* (1987) aménagée : 0,5 g de sol et 25 mL de NaOH 0,5 % sont agités 1 heure puis centrifugés à 18000 tr/min pendant 20 min pour éviter l'addition de l'agent de floculation stipulée dans la méthode originale. L'indice mélanique est donné par le rapport de l'absorbance de l'extrait à 450 nm sur celle à 520 nm. Cet indice n'a été déterminé que sur les profils répondant aux critères.

2. Extractions chimiques sélectives

Le pyrophosphate de Na 0,1 M (pH 10) est un complexant alcalin (JEANROY, 1983). L'extraction est réalisée par agitation à froid de 1 g de sol dans 100 mL de réactif pendant une nuit (16 h). Après une forte centrifugation (20 min à 18000 tr/min) destinée à éliminer les argiles mises en suspension par ce réactif très fortement dispersant, Al et Fe sont dosés par SAA dans le surnageant (notés Al_p et Fe_p). La teneur en allophanes est estimée à partir du rapport atomique (Al_o-Al_p/Si_o). La valeur de ce rapport permet de déterminer le facteur de multiplication à appliquer à la teneur en Si_o pour calculer la quantité d'allophanes (PARFITT & WILSON, 1985 ; PARFITT, 1986) :

Al / Si*	Facteur de multiplication à appliquer à la valeur de Si _o
1,0	5
1,5	6
2,0	7
2,5	10
3,0	12
3,5	16

* rapport atomique : (Al_o-Al_p/Si_o)*(28/27)

3. Propriétés physico-chimiques

Le pH est mesuré dans l'eau (pH_{H₂O}) et dans le KCl 1 N (pH_{KCl}) avec un rapport sol/solution de 1:2,5. L'Al échangeable (Al éch.) est extrait par KCl. Le sol est agité 1 h avec une solution de KCl N (rapport sol/solution 1:10). Après centrifugation, Al est dosé par SAA dans le surnageant.

C. CARACTÉRISATION APPROFONDIE DES ANDOSOLS

Pour l'étude plus approfondie de deux Andosols, ces mêmes analyses ont été effectuées (hormis les mesures de Da, H₂O 15 bar, Im et Al éch.) sur tous les horizons et complétées par les analyses suivantes.

1. Extractions chimiques sélectives

La densité optique de l'extrait oxalate (notée DOEO) a été mesurée selon la méthode de DALY (1982) à 430 nm avec un spectrophotomètre DU-70 Beckman. On a aussi dosé la teneur en carbone de l'extrait pyrophosphate (noté C_p) par un Carmhograph 12 (Wösthoff). De plus, deux autres réactifs ont été appliqués à tous les horizons. Le citrate-bicarbonate-dithionite (MEHRA & JACKSON, 1960) agit principalement par le dithionite de Na (réducteur) associé à une solution de tricitrate de Na complexante tamponnée au voisinage de la neutralité par du bicarbonate de Na (JEANROY, 1983). Ce réactif s'adresse principalement aux oxydes de Fe. La solution de citrate-bicarbonate (50 mL) et 1 g de sol sont portés à 80 °C au bain-marie. Après 15 min le dithionite de Na est ajouté et l'extraction se poursuit 1/2 h. Après centrifugation (5 min à 5000 tr/min), Al, Fe et Si sont dosés par SAA dans le surnageant (notés Al_d, Fe_d et Si_d). Le réactif au tétraborate de Na (BRUCKERT & SOUCHIER, 1975) opère par sa forte alcalinité (JEANROY, 1983). C'est le réactif d'extraction des complexes mobiles Fe - matière organique. L'agitation de 1 g de sol et 50 mL d'une solution de tétraborate de Na tamponnée à pH 9,7 s'effectue à froid pendant 1 h. Après centrifugation (20 min à 18000 tr/min), Fe est dosé par SAA dans le surnageant (noté Fe_t).

2. Constituants minéraux

La distribution de la taille des particules minérales est déterminée par des analyses granulométriques. Un pré-traitement par l'oxalate pH 3 (dans les mêmes conditions que pour les extractions avec 10 g sol < 2 mm dans 1 l d'oxalate) permet de détruire les ciments minéraux mal cristallisés ou organo-minéraux. Puis, la destruction de la matière organique est obtenue par une oxydation à l'hypochlorite de Na (ROUILLER *et al.*, 1974) à chaud (80 °C), suivie de différents lavages à NaCl 1 N, HCl 3 N et à l'eau. La répartition des particules dans la classe des sables grossiers (2 mm-200 µm) ou des sables fins (200-50 µm) est évaluée par une succession de tamisages. Les taux de limons grossiers (50-20 µm), limons fins (20-2 µm) et argiles (< 2 µm) sont obtenus, après dispersion par des résines (Amberlite IRN 77 Prolabo) saturées Na, par prélèvement à la pipette de Robinson. Ces fractions inférieures à 50 µm sont recueillies pour des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X. Ces analyses portent sur les poudres pour les limons, sur des lames orientées pour les argiles (saturées Mg). Les argiles sont de plus soumises à un test de gonflement à l'éthylène-glycol et à un test de chauffage à 550 °C. L'analyse granulométrique a également été réalisée sans pré-traitements pour estimer la proportion de pseudo-limons ou de pseudo-sables.

3. Complexe d'échange

Les cations échangeables sont déplacés par une solution de cobaltihexammine 0,05 N (ORSINI & REMY, 1976). L'extraction est effectuée par agitation de 2 g de sol avec 40 mL de réactif pendant 1 h. Les cations (Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn et Al) sont dosés par SAA après centrifugation (10 min à 4000 tr/min). Les protons sont obtenus par mesure de pH et la CEC est ensuite calculée (somme des cations et protons). Cette valeur est vérifiée par comparaison avec la valeur de la CEC obtenue par colorimétrie à 472 nm sur un spectrophotomètre DU-70 Beckman (résultats présentés uniquement en annexe III, Tab. II).

4. Analyses complémentaires

Un test NaF a été effectué avec un rapport sol:solution de 1:50 (HETIER, 1969). Enfin, une analyse minéralogique par DRX de la roche mère (sur poudre) a été réalisée sur la roche mère d'un des deux Andosols seulement.

CHAPITRE II - RECHERCHE DES PROPRIÉTÉS ANDIQUES

Dans cette recherche des propriétés andiques sur la vingtaine de profils sélectionnés, nous nous limiterons ici à faire un premier tri sur la base du critère $Al_0 + 1/2Fe_0$. Dans le Tab. 7 sont consignées les valeurs de cette somme pour les deux niveaux prélevés (10-20 et 40-50 cm) ainsi que leur moyenne. Nous considérerons qu'un sol vérifie ce critère lorsque la valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ est supérieure ou égale à 2,0 %, non seulement pour la moyenne mais aussi dans chaque niveau.

Un examen du Tab. 7 indique que sur les 21 stations étudiées, 5 répondent positivement au critère $Al_0 + 1/2Fe_0$ et pourraient donc être reconnues comme des Andosols. Nous verrons d'ailleurs plus loin que lorsque la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ est supérieure à 2 %, les autres critères (Da et Rét.P) sont également vérifiés. Ainsi, les stations de Belfahy, Saint-Antoine, Château-Lambert et Gsang répondent à la définition ($Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0$ % dans chaque niveau et $\geq 2,1$ % pour la moyenne). Nous considérons que la forte valeur de la moyenne de la station Tête Niqueuse (2,5 %) justifie qu'on admette aussi ce sol bien que $Al_0 + 1/2Fe_0$ soit faible en 10-20 (mais de 1,9 %). Il est fort probable qu'entre 20 et 40 cm cette somme soit supérieure à 2 % car on passe de 1,9 % en 10-20 à environ 3 % en 40-50.

Par contre, nous écartons les stations de Ménard et Champ du Feu qui montrent certes une moyenne supérieure à 2 % mais des valeurs trop faibles en 10-20 cm. Toutes les autres stations, où la moyenne varie de 0,69 à 1,81 %, sont également exclues des Andosols *sensu stricto*.

Nous examinerons plus en détail les sols vérifiant (chap.III) ou non (chap.IV) ces critères et examinerons les facteurs régissant l'apparition de propriétés andiques (chap.V) en intégrant les résultats de ZIDA (1994). Nous n'aborderons plus (sauf ponctuellement) les autres stations de Tête Niqueuse, La Pransière, Masevaux, Neuntelstein, Evaux-B, Schirmeck, Grendelbruch et Donon. Leurs principales caractéristiques sont exposées en annexe II dans les fiches de sols.

Tab. 7 - Valeurs de la somme ($Al_0 + 1/2 Fe_0$ %) dans les deux niveaux de prélèvement.

		1 Ménard	2 Ordon	3 Tête des Sapins	8 Belfahy	10 Saint- Antoine	11 Plain des Boeufs	13 Tête Niqueuse	14 La Pransière	15 Château- Lambert	16 Langenberg
$Al_0 + 1/2 Fe_0$ (%)	10-20 cm	1,9	1,5	1,8	2,0	2,1	1,3	1,9	1,4	2,5	1,6
	40-50 cm	2,2	1,9	1,8	2,1	2,4	1,8	3,1	1,5	2,8	1,8
	Moyenne	2,1	1,7	1,8	2,1	2,3	1,6	2,5	1,5	2,7	1,7

		17 Masevaux	18 Rossberg	19 Gsang	20 Schlüsselkopf	21 Servaumont	22 Champ du Feu	23 Neuntelstein	24 Evaux-B	25 Schirmeck	27 Grendelbruch	29 Donon
$Al_0 + 1/2 Fe_0$ (%)	10-20 cm	1,0	1,3	2,1	1,0	1,1	1,8	1,1	1,6	0,7	0,9	1,4
	40-50 cm	1,1	1,6	2,4	1,2	1,9	2,3	1,3	1,6	0,7	0,9	1,4
	Moyenne	1,1	1,5	2,3	1,1	1,5	2,1	1,2	1,6	0,7	0,9	1,4

En gras : stations répondant positivement au critère $Al_0 + 1/2 Fe_0 \geq 2$ % dans les deux niveaux.

CHAPITRE III - CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES ANDOSOLS DES VOSGES

I. PROPRIÉTÉS ANDIQUES

Les résultats relatifs aux trois points de la définition des Andosols ($Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2\%$, $Da \leq 0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ et $Rét.P > 85\%$) selon la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994) sont exposés dans les Tab. 7 ($Al_0 + 1/2Fe_0$) et 8 (Da et $Rét.P$).

Tab. 8 - Valeurs de la densité apparente (Da) et de la rétention des phosphates ($Rét.P$) dans les deux niveaux de prélèvement.

		8 Belfahy	10 Saint-Antoine	15 Château- Lambert	19 Gsang
Da (g.cm^{-3})	10-20 cm	0,6	0,8	0,5	0,5
	40-50 cm	0,9	0,9	0,5	0,6
$Rét.P$ (%)	10-20 cm	87	86	89	91
	40-50 cm	86	87	93	91

Dans les quatre profils de Belfahy, Saint-Antoine, Château-Lambert et Gsang, nous l'avons vu, les teneurs en $Al_0 + 1/2Fe_0$ varient de 2,0 à 2,8 % (moyenne : 2,3 %), vérifiant ainsi le premier point de la définition. Ces teneurs augmentent entre les niveaux 10-20 et 40-50 cm et sont les plus faibles dans le profil de Belfahy. Les autres critères sont également vérifiés. La Da varie de 0,5 à 0,9 g.cm^{-3} (moyenne : 0,66 g.cm^{-3}) et augmente entre les niveaux 10-20 et 40-50 cm. Les profils de Gsang et Château-Lambert montrent les Da les plus faibles (0,5 à 0,6 g.cm^{-3}). La capacité de rétention des phosphates ne présente pas de fortes variations avec la profondeur. Elle est plus importante dans les profils de Gsang et Château-Lambert (89 à 93 %) que dans ceux de Belfahy et Saint-Antoine (86 à 87 %).

Ainsi, les trois critères fondamentaux de la définition des Andosols sont vérifiés dans ces quatre profils. Il convient toutefois de noter que si le critère de Da est assez bien respecté (valeurs bien en dessous de 0,9 le plus souvent), il n'en est pas de même pour la $Rét.P$ ni surtout pour la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$. En effet, des valeurs de $Rét.P$ supérieures à 90 voire 95 % ne sont pas rares dans la section de contrôle andique d'Andosols allophaniques comme en Islande ou à Hawaii (99 %) ou non allophaniques tels qu'à Madère (95-100 %) ou aux Etats-Unis (99-100 %) par exemple (ARNALDS *et al.*, 1995 ; PARFITT *et al.*, 1988 ; MADEIRA *et al.*, 1994 ; HUNTER *et al.*, 1987). De même, la teneur en $Al_0 + 1/2Fe_0$ est ici à peine plus élevée que la valeur seuil alors que des teneurs supérieures à 3 % sont assez couramment rencontrées dans des Andosols non allophaniques (Madère : 4-6 % ou aux

Etats-Unis : ~ 4 %) ou plus encore dans les Andosols allophaniques (Islande : 5-9 %, Hawaii : 8-14 %) (MADEIRA *et al.*, 1994 ; HUNTER *et al.*, 1987 ; ARNALDS *et al.*, 1995 ; PARFITT *et al.*, 1988). Ces quelques profils nous permettent donc de confirmer l'existence, dans les Vosges, de sols répondant aux nouvelles règles de classification des Andosols mais qui présentent néanmoins une expression modeste des propriétés andiques.

Les relations existant dans les Andosols entre ces trois critères fondamentaux ont souvent été abordées. La forte capacité de rétention des phosphates dans ces sols est généralement attribuée à leur fortes teneurs en Al et Fe "actifs", qui présentent une réactivité variable vis-à-vis du P. Dans une série d'Andosols du Japon, WADA & GUNJIGAKE (1979) ont estimé que l'adsorption du P est gouvernée, dans les horizons de profondeur, par l'Al des composés allophaniques. Dans les horizons de surface, l'adsorption est reliée à l'Al des complexes organo-métalliques et, dans une moindre mesure, au Fe de ces complexes. BOLLAND *et al.* (1996) ont mis en évidence, dans des sols d'Australie, une meilleure corrélation de la capacité d'adsorption du P avec Al_0 par rapport à Fe_0 . GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) ont d'ailleurs déterminé un coefficient de corrélation $r = 0,864$ entre les valeurs de Rét.P et Al_0 dans une douzaine d'Andosols non allophaniques de Galice. Le P est fixé principalement sous une forme inorganique ; il réagit avec les aluminosilicates cryptocristallins dans les Andosols allophaniques, avec les complexes organo-métalliques dans les Andosols non allophaniques (NANZYO, 1988). L'adsorption du P peut être décrite par une équation de Freundlich, fonction du pH et de la concentration en P. Il semble d'ailleurs qu'elle soit plus fortement dépendante du pH dans les Andosols allophaniques que dans les non allophaniques (GUNJIGAKE & WADA, 1981).

De même que SHOJI *et al.* (1985), ZIDA (1994) a établi, sur l'ensemble de ses 13 profils des Vosges, que des valeurs de Rét.P > 85 % nécessitaient des teneurs en $Al_0 > 1\%$. Généralement, la plupart des Andosols dont la somme $Al_0 + 1/2Fe_0 > 2\%$ montrent également des Rét.P > 90 % (SHOJI *et al.*, 1996). Une distinction apparaît entre les Andosols allophaniques ou non : les Andosols allophaniques nécessitent des teneurs en $Al_0 + 1/2Fe_0 > 2\%$ pour satisfaire au critère Rét.P > 85 % alors que cette valeur s'abaisse à $Al_0 + 1/2Fe_0 > 1,5\%$ dans les Andosols non allophaniques (NANZYO *et al.*, 1993a).

Les faibles Da caractéristiques des Andosols sont liées au développement d'une structure poreuse. Les allophanes contribuent en grande partie à l'élaboration de telles structures. NANZYO *et al.* (1993b), en examinant la banque de données "TU Andisols", ont observé que la Da se situait sous la valeur seuil de $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ pour des teneurs en allophanes de ~ 5 %. Il apparaît également que la matière organique joue un rôle important. Dans le cas d'Andosols non allophaniques, les valeurs de Da sont fortement influencées par la teneur en C (SHOJI *et al.*, 1985). Elles sont inférieures à la valeur seuil pour des teneurs en C > 3 % (NANZYO *et al.*, 1993b). Cette relation Da - teneur en C a également été étudiée par GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) qui ont établi un coefficient de corrélation $r = 0,858$. ZIDA (1994), sur l'ensemble des 13 profils des Vosges, a obtenu une corrélation moins satisfaisante imputée à la forte pierrosité des profils affectant les mesures de Da .

II. CARACTÉRISATION DES ANDOSOLS DANS LES VOSGES

Nous allons maintenant nous consacrer à l'étude des propriétés générales des Andosols reconnus dans les Vosges. Nous avons sélectionné deux profils parmi les quatre répondant aux critères étudiés par ZIDA (1994) et nous leur avons fait subir toute une série d'analyses sur l'ensemble de leurs horizons génétiques. Le profil de Château-Lambert a été retenu comme représentant de l'andosolisation sur roche plutonique (diorite). Concernant les profils développés sur roche volcanique, la station de Gsang (andésite), montrant les propriétés andiques les mieux exprimées, a été choisie. Nous rappellerons brièvement les caractères des autres profils dont les caractéristiques environnementales et les données analytiques sont consignées en annexe II dans les fiches de sols. Le détail des données des stations de Gsang et Château-Lambert est porté dans les Tab. I-II-III A et B en annexe III.

A. CARACTÈRES STATIONNELS

Les caractéristiques environnementales des stations de Gsang et Château-Lambert sont exposées dans les fiches de sols des pages suivantes.

Les deux profils se développent sous un climat froid et humide (hautes altitudes ~ 1000 m, expositions NO). La végétation est de type forestière (hêtraie, sapinière) et la strate herbacée présente des espèces acidiphiles (canche, myrtille, polytric).

Le profil de Château-Lambert se développe à partir d'une roche mère cristalline (diorite) et sa position topographique (sommet aplati) semble induire des circulations latérales dans le bas du profil. En revanche, le profil de Gsang se situe près du sommet, sur une pente moyenne favorisant un bon drainage. La roche mère est ici d'origine volcanique (porphyrite andésitique).

La station de Saint-Antoine présente globalement les mêmes caractères. Celle de Belfahy se situe dans un environnement légèrement moins agressif (altitude et pluviométrie plus faibles, exposition E-NE). Toutes deux se développent à partir de roches volcaniques, respectivement porphyrite andésitique et porphyre trachytique.

B. MORPHOLOGIE

1. Morphologie des profils

Les descriptions morphologiques sont consignées dans les fiches de sols des pages suivantes (en annexe II pour Saint-Antoine et Belfahy). Dans l'ensemble, la morphologie des profils est en bon accord avec celle que l'on peut rencontrer dans les Andosols : couleurs sombres, consistance cireuse, gluante, structure microagrégée.

Profil n° 15 - Andosol : Château-Lambert

Localisation : Masevaux 1:25000 - x = 932,4 ; y = 325,9.

Altitude : 930 m.

Topographie : Sommet aplati et bosselé.

Pente : Faible.

Exposition : Début de versant NO.

Drainage : Circulations latérales en BC.

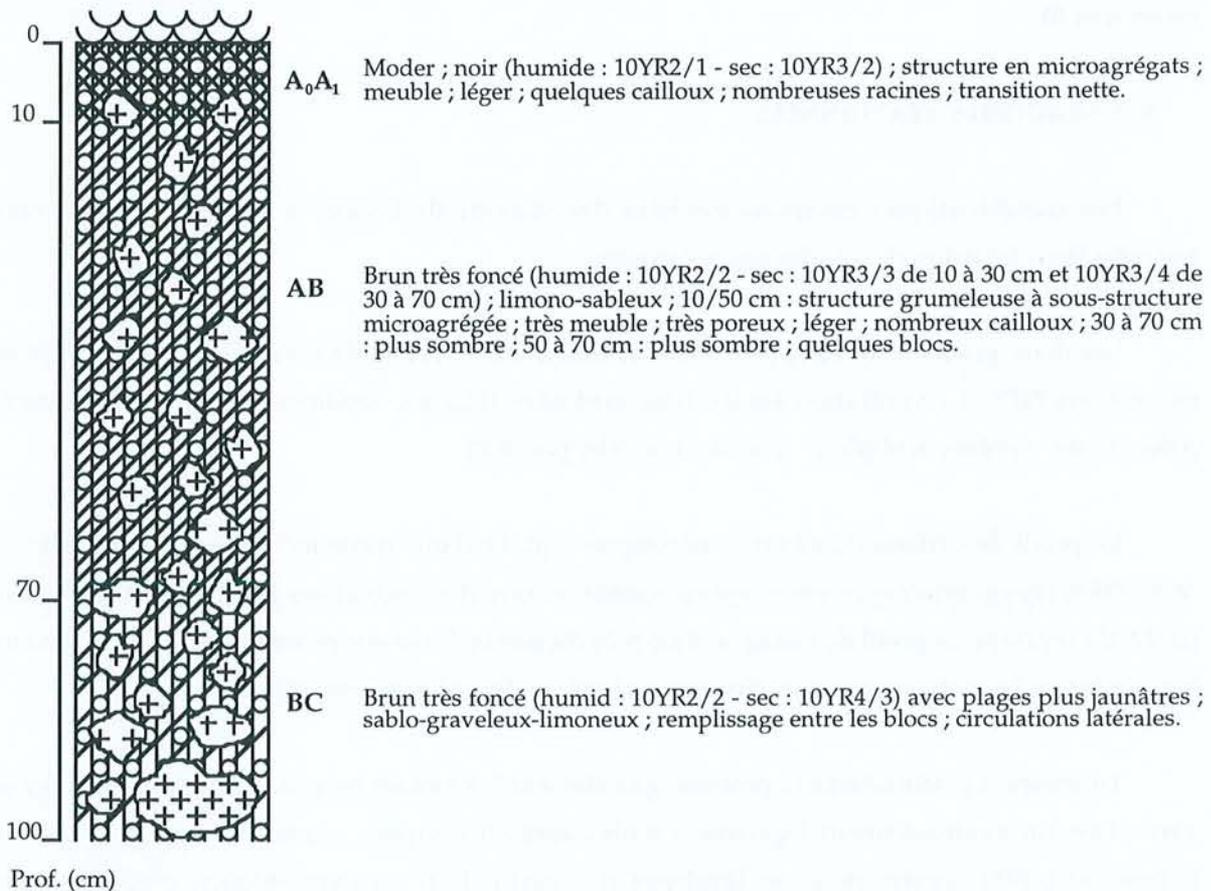
Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Diorite mésocrate à pyroxène.

Végétation : Sapinière, rares hêtres ; canche, myrtille, quelques ronces et fougères mâles.

Description



Couche organique peu décomposée (A₀)



Accumulation de fer ferrique



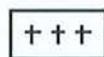
Horizon humifère particulaire peu actif



Alumine libre



Horizon humifère grumeleux actif



Roche mère plutonique



Horizon cendreux ou blanchi



Roche mère volcanique

Profil n° 19 - Andosol : Gsang

Localisation : Masevaux 1:25000 - x = 949,1 ; y = 325,5.

Altitude : 1000 m.

Topographie : 20 m sous arête de croupe.

Pente : Moyenne.

Exposition : NO.

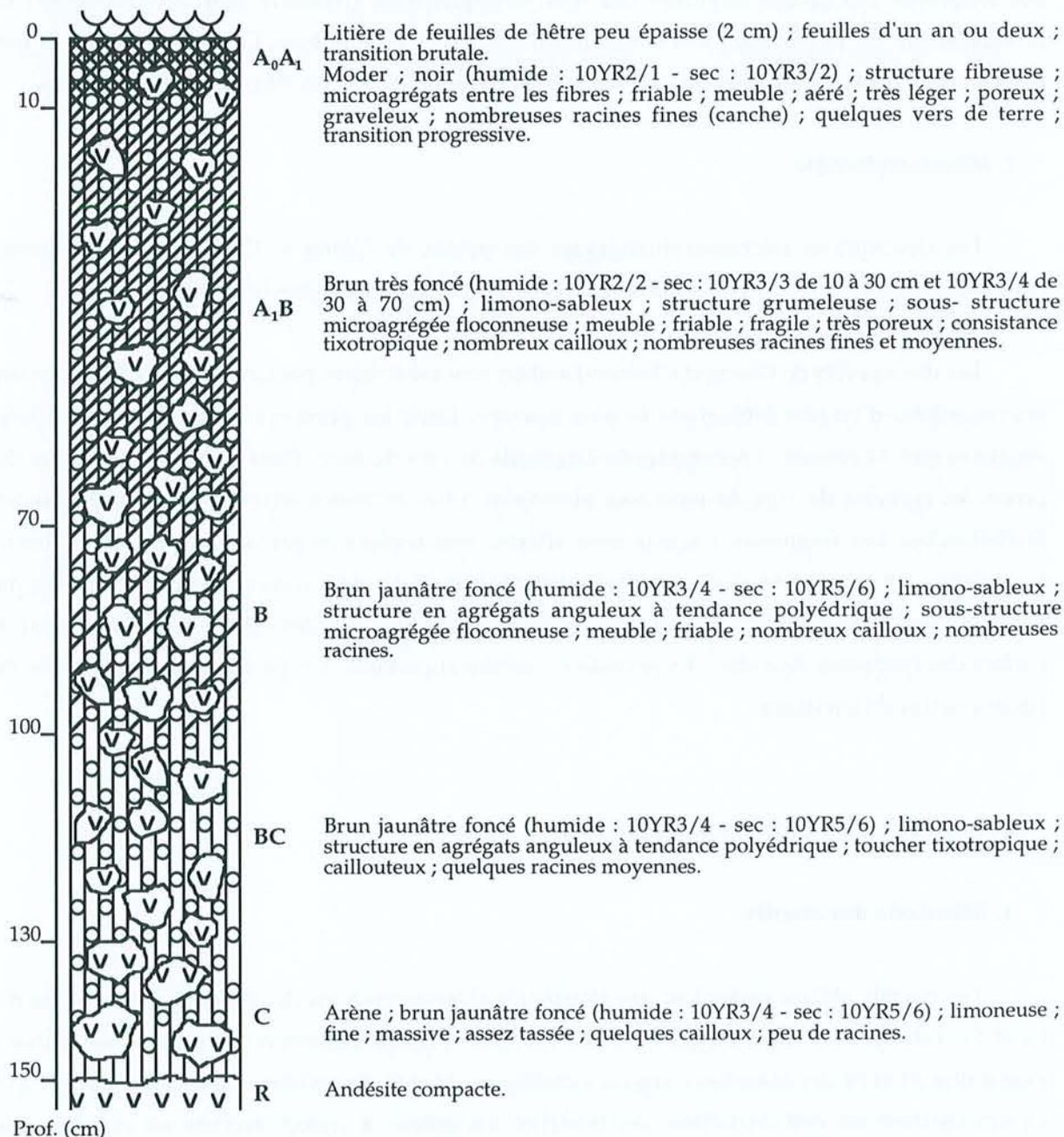
Drainage : Bon.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1800 - 2000 mm.

Roche mère : Porphyrite andésitique basique.

Végétation : Hêtraie, rares sapins ; canche, rares luzules, fétuques ; rares polytrics.

Description

Les horizons de surface sont de type mull à mull-moder ou moder. Les profils présentent une coloration sombre en surface (10YR2/2) et qui reste assez foncée sur une grande profondeur (10YR2/2 à 3/2). Ces couleurs brun sombre sont à relier aux fortes teneurs en MO humifiée dans ces sols. La structure est grumeleuse, microagrégée et floconneuse.

Dans les stations de Gsang et Belfahy, les couleurs s'éclaircissent en profondeur et passent au brun jaunâtre au niveau des horizons B, peu épais et peu différenciés. Une structure légèrement anguleuse à tendance polyédrique peut se développer (Gsang).

Les sols sont très meubles et friables, poreux et légers, et présentent le toucher cireux typique des Andosols. Les profils montrent une très forte pierrosité (moindre pour Saint-Antoine) et l'enracinement est particulièrement dense, jusqu'à de fortes profondeurs. Les sols ne montrent pas d'évidences morphologiques de transferts d'argiles, de fer ou de MO au sein d'horizons illuviaux.

2. Micromorphologie

Les descriptions micromorphologiques des profils de Gsang et Château-Lambert seront détaillées plus loin (4^e partie) mais nous pouvons déjà en donner quelques traits caractéristiques.

Les deux profils de Gsang et Château-Lambert sont caractérisés par une structure très poreuse, microagrégée, d'origine biologique le plus souvent. Dans les premiers centimètres, les débris végétaux sont nombreux et accompagnés d'agrégats de vers de terre. Dans la partie supérieure du profil, les agrégats de vers de terre sont abondants, plus ou moins repris et fragmentés par les Enchytréides. Les fragments rocheux sont altérés, non revêtus et présentent parfois un liseré ferrugineux. La forte porosité est constituée principalement de vides d'entassement. Vers le bas du profil, les agrégats de vers de terre et d'Enchytréides sont plus ou moins effrités et s'agrègent sur la surface des fragments de roches. La porosité est encore importante. Les profils ne présentent pas de figures nettes d'illuviation.

C. EXTRACTIONS CHIMIQUES SÉLECTIVES

1. Sélectivité des réactifs

Les réactifs utilisés présentent des sélectivités diverses vis-à-vis des différentes formes de Al, Fe et Si (Tab. 9). On considère que l'oxalate solubilise préférentiellement les formes "amorphes", c'est-à-dire Al et Fe des complexes organo-métalliques, Al et Si des minéraux allophaniques et Al et Fe des hydroxydes mal cristallisés (ferrihydrite). De même, le pyrophosphate est censé être le réactif sélectif de Al et Fe des complexes organo-métalliques. Le réactif citrate-dithionite extrait

l'ensemble des formes du fer, en dehors du Fe des réseaux silicatés, c'est-à-dire le Fe des complexes organo-ferriques et des oxydes bien ou mal cristallisés. Ce réactif concerne également l'Al des complexes, une partie de l'Al des composés allophaniques et l'Al substitué des oxydes de fer. Le tétraborate solubilise le Fe des complexes hydroxyferriques très mobiles et le pyrophosphate le Fe des complexes moins ou non mobiles (JEANROY, 1983).

En fait, la sélectivité de ces réactifs est plus complexe. On a reporté des cas où l'oxalate ne parvenait pas à dissoudre la totalité du Fe de la ferrihydrite (PARFITT *et al.*, 1988) ou des complexes organo-ferriques (WADA *et al.*, 1986). Par contre, il peut solubiliser une partie du Fe des goethites et hématites mal cristallisées ou de la magnétite et de la lépidocrocite (JEANROY, 1983). Le pyrophosphate, par son fort pouvoir peptisant, extrait non seulement le Fe des complexes organiques mais aussi des particules d'hydroxydes ferriques finement divisées (JEANROY & GUILLET, 1981) et même cristallisées (MADEIRA & JEANROY, 1984). De même, l'Al des hydroxydes peut être solubilisé par le pyrophosphate (KAISER & ZECH, 1996).

Tab. 9 - Dissolution de Al, Fe et Si dans diverses fractions de sols selon différents traitement (d'après WADA, 1989).

		Oxalate acide pH 3,0	Pyrophosphate de Na 0,1 M	Dithionite - citrate
Al et Si	allophanes	+++	+	+
	imogolite	++	+	+
	"allophane-like"	+++	+	+++
	feuilletés silicates	-	--	-
Al	complexes organiques	+++	+++	+++
	oxydes : mal cristallisés	+++	+	+++
	cristallisés	--	--	+*
Fe	complexes organiques	+++	+++	+++
	oxydes : mal cristallisés	+++	+	+++
	cristallisés	-	--	+++

Dissolution : +++ : bonne ; ++ : assez bonne ; + : faible ; - : peu ou pas ; -- : aucune.

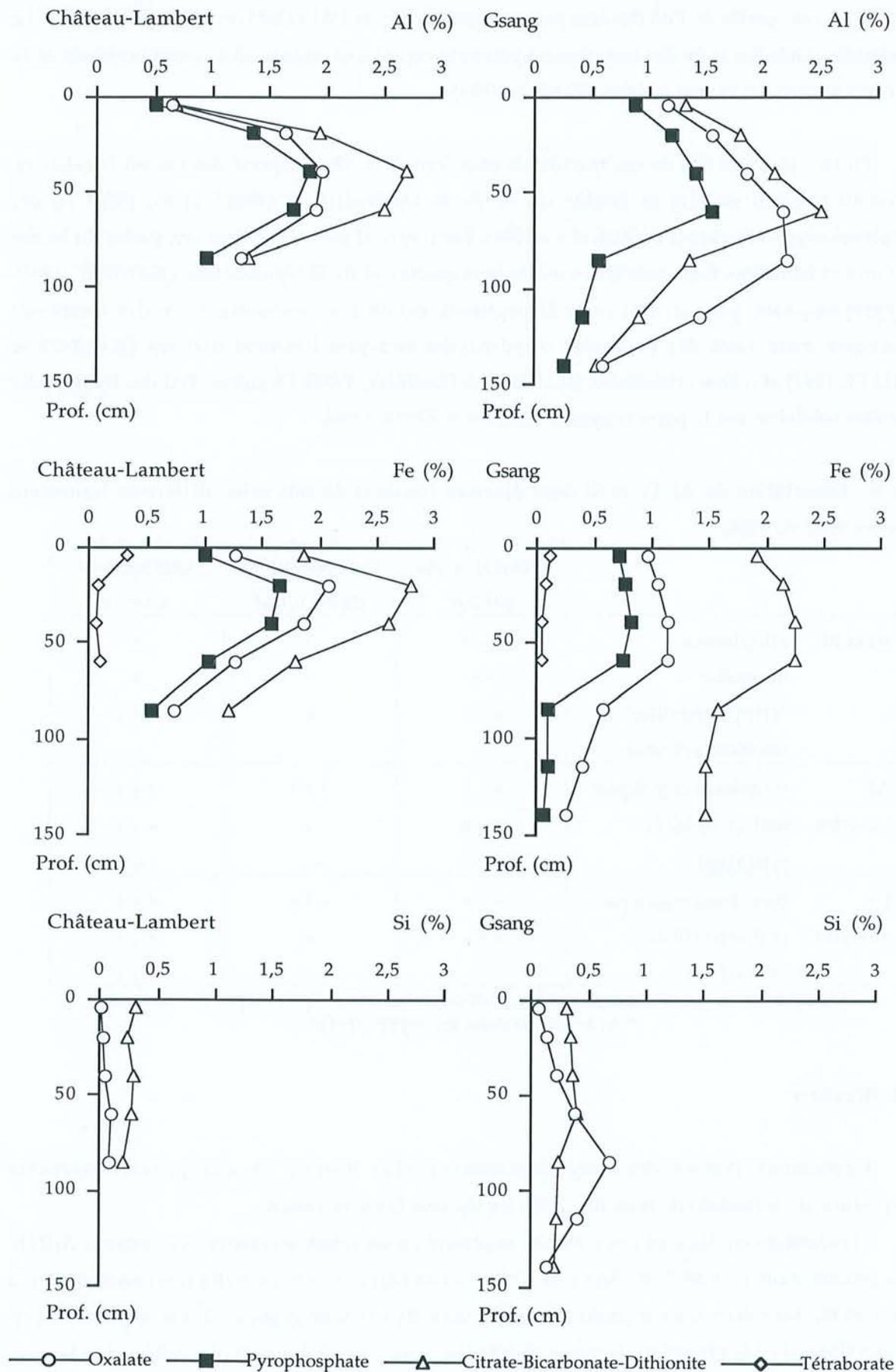
* Al substitué dans les oxydes de fer.

2. Résultats

L'examen des données des dissolutions sélectives (Tab. 10 et Fig. 14) nous permet d'estimer la composition de la fraction de terre fine, avec les réserves faites ci-dessus.

- Les teneurs en Al_0 sont assez élevées et présentent un ventre au niveau des horizons A_1B/B . Elles passent ainsi de 0,64 % en A_0A_1 de Château-Lambert à 1,96 % en A_1B_2 pour redescendre à 1,24 % en BC. De même, dans le profil Gsang, Al_0 varie de 1,16 % en A_0A_1 à 2,2 % en B puis 0,6 % en C. Les valeurs de Al_p présentent la même distribution mais sont légèrement plus faibles. Les teneurs en Al_d montrent le même ventre et sont supérieures à Al_0 sauf dans le bas du profil Gsang.

Fig. 14 - Dissolutions sélectives sur la fraction de terre fine des deux Andosols par les différents réactifs.



- La répartition de Fe_o , Fe_p et Fe_d est similaire avec un ventre plus ou moins prononcé dans les horizons A_1B et dans l'ordre $Fe_d > Fe_o > Fe_p$. Le Fe_o atteint au maximum 2,08 % en A_1B_1 de Château-Lambert, 1,14 % en A_1B_2 et A_1B_3 de Gsang. Les valeurs de Fe_p et Fe_d sont proches de Fe_o , excepté dans le profil Gsang où le Fe_d est assez élevé (maximum 2,26 % en A_1B_2 et A_1B_3). La teneur en Fe_t est faible (0,04 à 0,33 %) et diminue en profondeur hormis une très légère remontée en A_1B_3 de Château-Lambert.

- Cette répartition de Al et Fe avec la profondeur (ventres), d'ailleurs semblable à celle de la plupart des Andosols du monde, est toutefois moins marquée si les valeurs sont rapportées à la fraction minérale uniquement.

- Les teneurs en Si_o sont très faibles (0,02 - 0,4 %) excepté dans les horizons de profondeur de Gsang où elles peuvent atteindre 0,68 %. Les valeurs de Si_d leur sont légèrement supérieures (0,2 - 0,4 %) hormis également dans le bas du profil Gsang.

Tab. 10 - Quelques données des dissolutions sélectives de Château-Lambert et Gsang.

	Horiz.	Prof. (cm)	$Al_o +$ $1/2 Fe_o$	Allo- phanes (%)	Al_p/Al_o	Fe_p/Fe_o	C/Al_p^*	C_p/Al_p^*	$C_p/$ $Al_p + Fe_p^*$
15 Château -Lambert	A_0A_1	0-10	1,27	-	0,8	0,8	123,8	32,0	16,2
	A_1B_1	10-30	2,68	-	0,8	0,8	22,3	9,7	6,1
	A_1B_2	30-50	2,89	0,5	0,9	0,9	15,3	7,7	5,4
	A_1B_3	50-70	2,53	0,7	0,9	0,8	15,1	8,9	6,8
	BC	70-100	1,61	1,4	0,8	0,8	11,8	7,8	6,1
19 Gsang	A_0A_1	0-10	1,64	-	0,8	0,8	50,2	18,1	12,9
	A_1B_1	10-30	2,07	1,4	0,8	0,7	21,9	8,8	6,7
	A_1B_2	30-50	2,41	1,6	0,8	0,7	16,1	6,9	5,4
	A_1B_3	50-70	2,73	2,3	0,7	0,7	13,2	6,4	5,2
	(B)	70-100	2,49	6,8	0,3	0,2	13,3	6,8	6,2
	BC	100-130	1,64	4,0	0,3	0,3	9,1	5,9	5,2
	C	130-150	0,73	1,4	0,4	0,3	5,2	5,2	4,6

* rapports atomiques

3. Formes de Al, Fe et Si

Si l'on fait abstraction des horizons de profondeur de Gsang, les très faibles teneurs en Si_o suggèrent de très faibles quantités, voire l'absence, de composés allophaniques. Ceci est confirmé par les très faibles valeurs calculées qui atteignent au maximum 2,3 %. En outre, les rapports Al_p/Al_o , variant de 0,7 à 0,9, sont en accord avec le caractère non allophanique de ces sols. On peut donc penser

que la majeure partie de l'Al est engagée dans la structure de complexes organo-métalliques plutôt que dans celle de composés allophaniques. La forte acidité de ces sols peut appuyer cette hypothèse : les $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ varient en profondeur de 3,8 à 4,4 et de 4,3 à 4,7 pour Château-Lambert et Gsang respectivement (Tab. 12). En effet, selon MIZOTA & VAN REEUWIJK (1989), la composition binaire des Andosols forme un continuum entre un pôle allophanique en conditions neutres ou faiblement acides et un pôle non allophanique en conditions acides (cf. 1^o partie, chap.III-II). Lorsque l'environnement est peu acide ($\text{pH} > 5$) et pauvre en MO, l'altération est dominée par des acides carboniques. L'Al est alors disponible pour se combiner avec Si et former les composés allophaniques et le fer peut précipiter notamment sous forme de ferrihydrite. Par contre, dans les environnements riches en MO et acides ($\text{pH} < 5$), l'altération est dominée par les acides organiques dont les ligands sont accessibles pour la formation de complexes organo-métalliques. Ici, il ne reste que peu, ou pas, d'Al disponible pour la co-précipitation avec Si sous forme de composés allophaniques.

Il apparaît donc que dans les Andosols des Vosges (et ceci est valable pour les autres profils de Belfahy et Saint-Antoine) la composition de la fraction de terre fine se rapproche plutôt du pôle non allophanique. Elle est dominée par des complexes organo-métalliques au moins dans les 70-100 cm supérieurs des profils, et donc dans la section de contrôle andique.

Les rapports C/Al_p , variant de 11,8 à 22,3 (en ne tenant compte que des horizons A_1B , B et BC), sont un peu plus élevés que ceux reportés par NANZYO *et al.* (1993a) à partir de la banque de données "T.U. Andisols" ($\text{C}/\text{Al}_p \sim 13$). Les rapports C_p/Al_p (5,9 à 9,7) et $\text{C}_p/\text{Al}_p + \text{Fe}_p$ (5,2 à 6,8), particulièrement faibles dans nos Andosols indiquent une très importante charge métallique. Ils correspondent aux valeurs intermédiaires calculées par WADA & HIGASHI (1976) dans les horizons A_1 et uA_1 sur cendres anciennes du Japon ($\text{C}_p/\text{Al}_p + \text{Fe}_p \sim 4,3$ à $8,3$). Par contre, ils sont un peu plus faibles que ceux reportés par SHOJI *et al.* (1985) dans les Andosols non allophaniques du Japon ($\text{C}_p/\text{Al}_p + \text{Fe}_p \sim 5,9$ à $14,3$). Ces auteurs proposent que, dans de tels sols, les propriétés de la MO soient liées à la faible mobilité de Al et Fe. De plus, nos valeurs de $\text{C}_p/\text{Al}_p + \text{Fe}_p$ sont proches du minimum requis (5,8) par MOKMA & BUURMAN (1982) pour l'identification d'horizons spodiques. Cette charge métallique semble trop forte pour que les éléments métalliques soient sous une forme monomérique. INOUE & HIGASHI (1988), avec des rapports semblables aux nôtres ($\text{C}_p/\text{Al}_p \sim 7,1$ et $\text{C}_p/\text{Al}_p + \text{Fe}_p \sim 5,9$), suggèrent que les ions Al et Fe hydroxymonomériques et hydroxypolymériques soient tous deux complexés par la MO.

Les valeurs de Al_d ne sont que très légèrement supérieures à Al_o et les rapports Al_p/Al_o sont voisins de 1, indiquant que l'Al est principalement sous forme de complexes organo-aluminiques. Toutefois, dans la partie inférieure du profil Gsang, on observe en même temps $\text{Al}_o > \text{Al}_d$ et $\text{Si}_o > \text{Si}_d$. Ceci peut être interprété comme la dissolution de composés allophaniques (JEANROY, 1983). Ainsi, quelques allophanes semblent présents dans le bas de ce profil ($\sim 7\%$) en bon accord avec les rapports $\text{Al}_p/\text{Al}_o < 0,5$ et des pH qui remontent un peu. Cette distribution d'allophanes avec la profondeur rappelle celle généralement observée dans les sols acides (HERBILLON, 1994). Dans les

horizons de surface du profil Gsang, la légère supériorité des valeurs de Si_d par rapport à Si_o peut être attribuée à "l'effet phytolithes" (JEANROY, 1983).

Concernant le fer, une grande partie entre dans la formation de complexes organo-ferriques (Fe_p/Fe_o de 0,7 à 0,9). Ces complexes ne semblent pas subir de migrations (Fe_t diminue en profondeur) sauf peut être très légèrement dans le bas du profil Château-Lambert. Dans le profil Gsang, une partie non négligeable du fer est sous forme d'oxydes ($Fe_d \gg Fe_o$) qui sont très probablement hérités de la roche mère. La taille du compartiment fer oxyde ($Fe_d - Fe_o$) est à peu près constante en profondeur dans les deux profils de Gsang et Château-Lambert. Cette invariance a d'ailleurs déjà été observée par JEANROY (1983) dans la série de sols podzolisés des Vosges.

Enfin, la somme $Al_o + 1/2Fe_o$ est supérieure à 2 % dans la majeure partie des profils, sur 10-70 cm pour Château-Lambert et sur 10-100 cm pour Gsang, mais elle reste toujours inférieure à 3 %.

D. CONSTITUANTS ORGANIQUES

Les caractères généraux des constituants organiques des profils de Château-Lambert et Gsang sont illustrés dans les Fig. 15 (C_{org} et C_p) et 16 (C/N et $DOEO$). Les teneurs en C sont élevées et diminuent lentement avec la profondeur. Elles passent ainsi de 27,5 % en surface à ~ 5 % en BC pour Château-Lambert et de 19,4 % en surface à moins de 4 % en B pour Gsang. Les teneurs en C_p suivent la même répartition avec des valeurs plus faibles allant de 7,1 à 3,3 % pour Château-Lambert et de 7,0 à 0,6 % pour Gsang. Le rapport C/N est élevé et augmente fortement en profondeur pour Château-Lambert (19 à 26). Il augmente également en A_1B dans le profil Gsang puis diminue (passant de 18 à 21 puis 15).

Cette richesse en MO, et ce sur une grande profondeur, est en trait courant des Andosols. Ces valeurs sont tout à fait dans la gamme de celles reportées dans la littérature pour les Andosols non allophaniques (SHOJI *et al.*, 1985 ; GARCIA-RODEJA *et al.*, 1987 ; HUNTER *et al.*, 1987 ; MADEIRA *et al.*, 1994 ; BAUMLER & ZECH, 1994). Ces fortes teneurs en MO, en dépit de faibles Da , sont à l'origine des stocks très importants de MO dans les Andosols, estimés à 25,4 kgC/m² dans les premiers 100 cm par BATJES (1996).

Les teneurs en C_p , moins élevées que les teneurs en C mais s'en rapprochant (excepté en surface), suggèrent qu'une partie non négligeable du C est engagée dans des complexes organo-métalliques. La MO, nous l'avons vu, peut inhiber la synthèse de composés allophaniques par complexation des éléments métalliques. Les relations existant entre la teneur en C et le rapport Al_p/Al_o indiquent que l'accumulation de C est plus importante dans les Andosols non allophaniques que dans les Andosols allophaniques. A partir de la banque de données "T.U. Andisols", NANZYU *et al.* (1993a) ont montré que la teneur en C augmente avec l'augmentation de Al_p/Al_o . A la valeur seuil de $Al_p/Al_o = 0,5$ séparant les Andosols allophaniques des non allophaniques correspond une teneur en C de 6 %.

Fig. 15 - Répartition du carbone total (C_{org}) et du carbone extrait au pyrophosphate (C_{pyro}) dans les deux profils de Château-Lambert et Gsang.

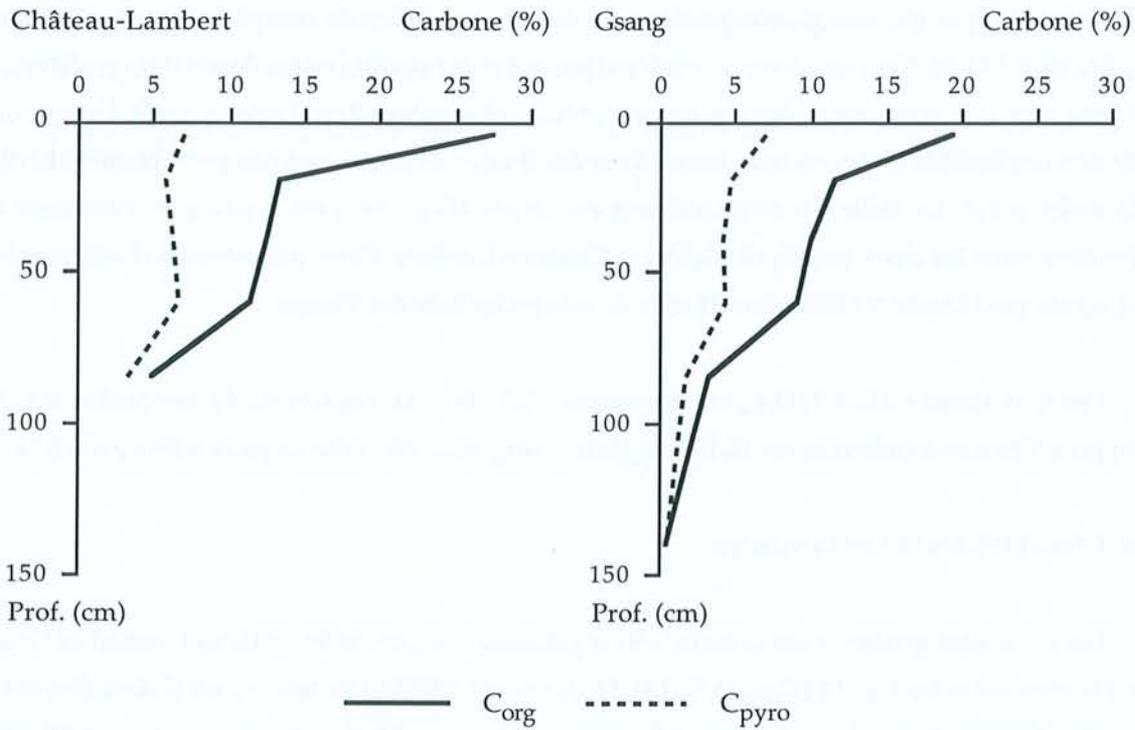
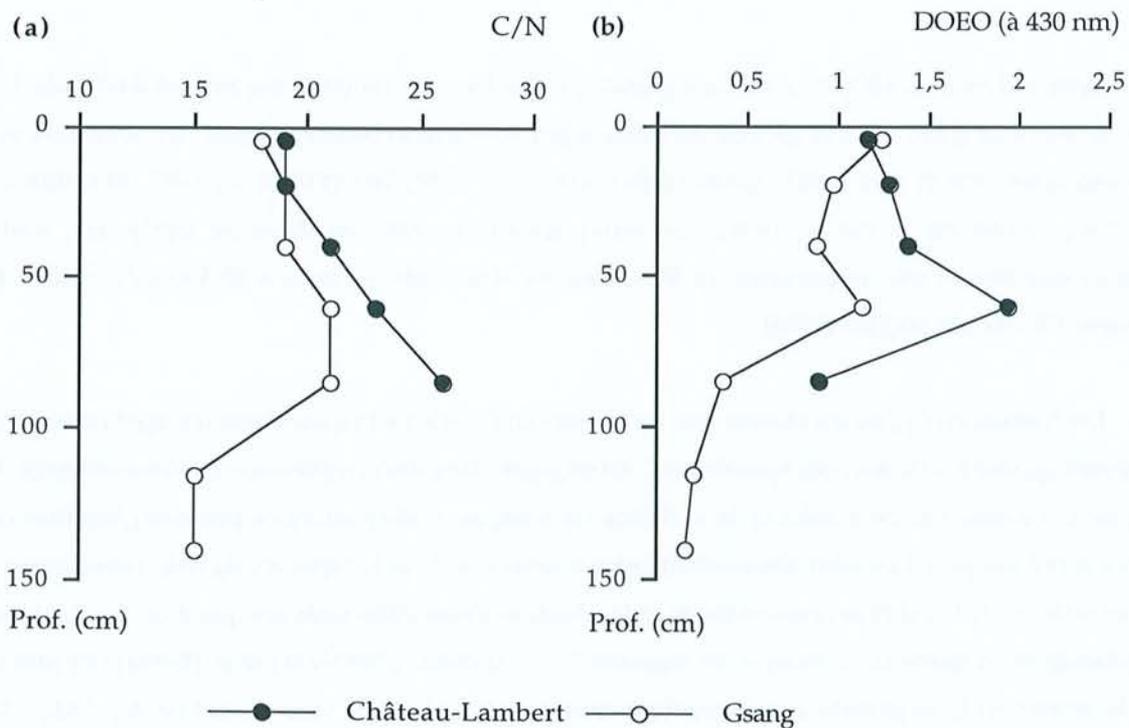


Fig. 16 - Distribution du rapport C/N (a) et de la Densité Optique de l'Extrait Oxalate (DOEO) (b) des deux profils de Château-Lambert et Gsang.



Les rapports C/N (Fig. 16a) présentent des valeurs plus élevées (18 à 26) que celles que l'on note habituellement dans les Andosols (13 - 14 selon BATJES, 1996 ; 11 à 18 pour GARCIA-RODEJA *et al.*, 1987). De plus, les C/N montrent une augmentation avec la profondeur (suivie d'une diminution pour Gsang). MADEIRA *et al.* (1994) reportent des valeurs de C/N très variables dans les Andosols non allophaniques de l'île de Madère. Certains de leurs profils présentent des valeurs assez élevées (jusqu'à 26) et qui augmentent également en profondeur.

L'indice mélanique, utilisé pour la distinction entre les Andosols mélaniques et fulviques, est déterminé par le rapport des absorbances à 450 et 520 nm d'un extrait NaOH (HONNA *et al.*, 1987). Il est relié à la pente du spectre d'absorption des substances humiques et permet de déterminer l'abondance relative des différents types d'acides humiques (AH). Des valeurs de $Im \leq 1,70$, liées à une prédominance d'AH de haut degré d'humification ("type A" des auteurs japonais), sont caractéristiques des Andosols mélaniques développés sous une végétation graminéenne. Les Andosols fulviques, sous végétation forestière, présentent des $Im > 1,70$ traduisant leur richesse en AH de plus faible degré d'humification ("type P") (NANZYO *et al.*, 1993a). Selon SHOJI *et al.* (1988), la végétation a un fort impact sur le développement de tels sols : sous la végétation forestière les apports de MO se font principalement par les litières. La végétation graminéenne est caractérisée par un chevelu racinaire dense et une forte production de MO riche en cellulose contribuant à la formation d'AH de type A. Les valeurs de l' Im des quatre profils (Belfahy, Saint-Antoine, Château-Lambert et Gsang), variant de 1,92 à 2,43 (Tab. 11), témoignent de leur appartenance au type fulvique. Ceci est en accord avec leur environnement (écosystème forestier).

Tab. 11 - Valeurs de l'indice mélanique (Im) et de Al éch. dans les deux niveaux de prélèvement.

		8 Belfahy	10 Saint-Antoine	15 Château- Lambert	19 Gsang
Im	10-20 cm	1,93	2,27	2,25	2,11
	40-50 cm	1,92	2,43	2,27	2,33
Al éch. cmol/kg	10-20 cm	6,2	7,3	10,7	11,8
	40-50 cm	3,7	3,6	7,5	7,8

Le paramètre de DOEO est utilisé pour l'identification d'horizons spodiques. L'oxalate acide est un extractant relativement sélectif de la MO engagée dans la translocation de Al et Fe dans le processus de podzolisation selon DALY (1982). La mesure de la DOEO permet d'estimer les quantités de MO extraites et leur répartition en profondeur. Pour DALY (1982), la valeur du rapport de DOEO des horizons B sur celle des horizons A $> 1,0$ indique une migration de composés organiques associés à Al et Fe. Les exigences sont plus strictes pour la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994) et, pour satisfaire le critère spodique, un horizon doit présenter une $DOEO \geq 0,25$ et moins de la moitié de cette valeur dans les horizons sus-jacents. Au vu des résultats obtenus dans nos deux profils (Fig. 16b) on note que ce critère n'est jamais satisfait : aucun horizon de nos sols ne présente le caractère spodique. Toutefois, l'horizon A₁B₃ de Château-Lambert présente des valeurs presque deux fois plus

élevées que les horizons sus-jacents. Ainsi, ce profil pourrait être affecté par une certaine redistribution modeste des composés humiques.

E. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES

Les données relatives aux propriétés physico-chimiques de nos Andosols sont portées dans les Tab. 11 (Al éch.) et 12 (pH et Rét.P) et dans la Fig. 17 (complexe d'échange).

Tab. 12 - Valeurs du pH (H₂O, KCl et NaF) et de la rétention des phosphates (Rét.P) des profils de Château-Lambert et de Gsang.

	Horiz.	Prof. (cm)	pH			Δ pH	Rét.P (%)
			H ₂ O	KCl	NaF		
15	A ₀ A ₁	0-10	3,8	3,3	7,1	0,5	76
Château-Lambert	A ₁ B ₁	10-30	4,3	4,0	10,1	0,3	93
	A ₁ B ₂	30-50	4,4	4,2	10,8	0,2	96
	A ₁ B ₃	50-70	4,4	4,2	10,7	0,2	95
	BC	70-100	4,4	4,3	10,7	0,1	77
19	A ₀ A ₁	0-10	4,3	3,6	8,7	0,7	84
Gsang	A ₁ B ₁	10-30	4,3	3,9	9,9	0,4	93
	A ₁ B ₂	30-50	4,5	4,1	10,2	0,4	94
	A ₁ B ₃	50-70	4,5	4,1	10,5	0,4	95
	(B)	70-100	4,6	4,4	10,4	0,2	87
	BC	100-130	4,7	4,3	10,1	0,4	70
	C	130-150	4,7	4,2	9,3	0,5	53

Les pH_{H₂O} sont assez bas et augmentent légèrement en profondeur. Ils passent de 3,8 en surface à 4,4 en profondeur dans Château-Lambert et de 4,3 à 4,7 pour Gsang. Les pH_{KCl} varient dans le même sens (3,3 à 4,3 pour Château-Lambert) excepté pour Gsang où ils diminuent dans le bas du profil (3,6 - 4,4 - 4,2). Les pH_{NaF} sont élevés et varient de 7,1 à 10,8. Les teneurs en Al éch. sont élevées (> 3 cmol/kg) dans les quatre Andosols, notamment pour le profil de Gsang et Château-Lambert (> 7 cmol/kg). Ces faibles valeurs de pH_{H₂O} témoignent de la forte acidité de nos sols. On attribue généralement l'acidité des Andosols aux composés allophaniques, aux minéraux 2:1 chloritisés et à la MO. Les Andosols allophaniques pauvres en MO présentent généralement des pH_{H₂O} plus élevés que les Andosols allophaniques riches en MO et plus encore que les Andosols non allophaniques (Tab. 13) (NANZYU *et al.*, 1993a). Nos pH_{H₂O} sont plus faibles encore que dans ces derniers. De même, nos Andosols montrent une réaction plus acide que les Andosols non allophaniques reportés par HUNTER *et al.* (1987), GARCIA-RODEJA *et al.* (1985), MADEIRA *et al.* (1994) et BAHAM &

SIMONSON (1985) (Tab. 13). Par contre, des pH_{H_2O} similaires (3,9 - 4,7) ont été signalés dans des Andosols non allophaniques du Népal (BAUMLER & ZECH, 1994). Les pH_{KCl} de nos sols sont dans la gamme de ceux mentionnés dans la littérature pour les Andosols non allophaniques (Tab. 13). Quant aux ΔpH , ils sont plus faibles que ceux communément rencontrés dans les Andosols non allophaniques ($\Delta pH \sim 1$).

Tab. 13 - Quelques pH_{H_2O} et pH_{KCl} rencontrés dans divers types d'Andosols.

	pH_{H_2O}	pH_{KCl}
Allophaniques pauvres en MO ¹	5,2 - 6,0	5,0 - 5,6
Allophaniques riches en MO ¹	5,0 - 5,7	4,3 - 5,0
Non allophaniques ¹	4,8 - 5,3	3,8 - 4,4
Non allophaniques Washington ²	4,8 - 5,3	3,7 - 4,4
Non allophaniques Galice ³	4,5 - 5,8	
Non allophaniques Madère ⁴	4,5 - 5,9	3,9 - 5,2
Non allophaniques Oregon ⁵	5,1 - 6,0	3,8 - 4,7

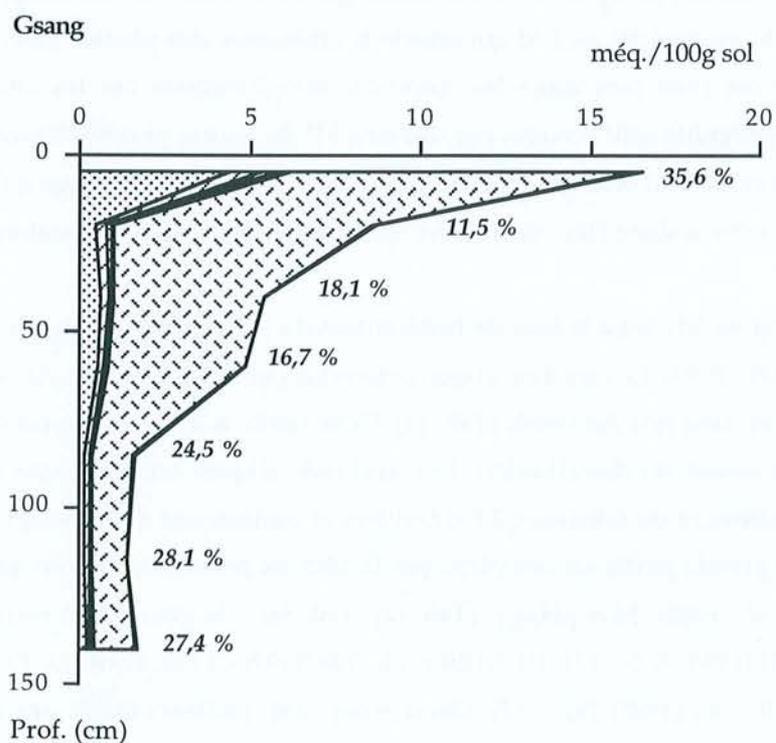
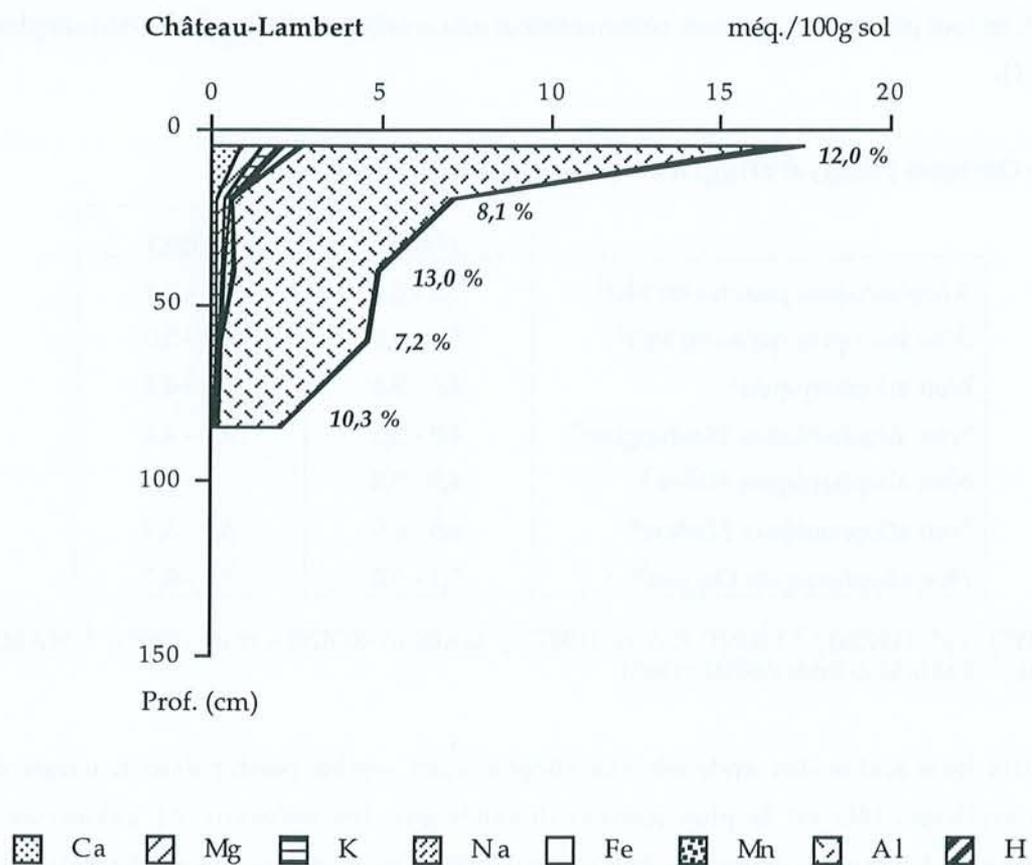
¹ NANZYO *et al.* (1993a) ; ² HUNTER *et al.* (1987) ; ³ GARCIA-RODEJA *et al.* (1985) ; ⁴ MADEIRA *et al.* (1994) ; ⁵ BAHAM & SIMONSON (1985).

Cette forte acidité des Andosols non allophaniques semble résider dans la nature de leur fraction argileuse. Elle est le plus souvent dominée par des minéraux 2:1 chloritisés et des interstratifiés 2:1 hydroxy-alumineux (SHOJI *et al.*, 1985). Des quantités non négligeables d'Al éch. peuvent s'adsorber sur les sites d'échange à charge négative constante de ces minéraux 2:1 et ces teneurs en Al éch. sont la principale source d'acidité dans les Andosols non allophaniques. Ces sols sont ainsi soumis à une toxicité de l'Al qui affecte la croissance des plantes (SAIGUSA *et al.*, 1980). Une telle toxicité est plus rare dans les Andosols allophaniques car les sites d'échange des allophanes et de l'imogolite sont occupés par des ions H^+ de nature plus faiblement acide. En fait, il semble que la mesure de l'Al éch. corresponde plus à une réserve en Al toxique qu'à la toxicité réelle et ces mesures ne doivent donc être considérées que comme des valeurs indicatives (BOUDOT *et al.*, 1994).

La richesse en Al éch. est à la base de la définition du sous-groupe alique de la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994). Le caractère alique déterminé par des teneurs en Al éch. > 2,0 cmol/kg, c'est d'ailleurs le cas dans nos Andosols (Tab. 11). Cette limite à 2,0 cmol/kg est également utilisée dans les autres systèmes de classification. Les Andosols aliques ont ainsi une fraction argileuse composée majoritairement de minéraux 2:1 chloritisés et contiennent de fortes quantités d'Al "actif" (Al_o) dont la plus grande partie est complexé par la MO. Ils présentent un fort pH_{NaF} et une forte Rét.P (OTOWA *et al.*, 1988). Nos pH_{NaF} (Tab. 12) sont dans la gamme de ceux mentionnés par BAUMLER & ZECH (1994) (9,5 - 11), HUNTER *et al.* (1987) (9,8 - 11,8), GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) (9,1 - 11,7) et SHOJI *et al.* (1985) (9,2 - 12). Ces derniers ont d'ailleurs établi une bonne corrélation entre les pH_{NaF} et les teneurs en Al_o dans les horizons humifères ou non d'Andosols non allophaniques du Japon.

Fig. 17 - Distribution des cations échangeables dans les profils de Château-Lambert et Gsang.

En italique : taux de saturation en bases (%).



Ceci confirme que la réaction au NaF n'est pas spécifique des matériaux allophaniques. GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) ont également observé cette corrélation pH_{NaF}/Al_0 ($r = 0,844$) ainsi qu'entre pH_{NaF} et Rét.P ($r = 0,886$). Concernant les valeurs de Rét.P de nos sols, elles sont supérieures au minimum requis (85 %) sur 10-70 cm de profondeur pour Château-Lambert et sur 10-100 cm pour Gsang. Elles diminuent dans les horizons de surface et dans le bas des profils.

Ces Andosols sont caractérisés par de faibles CEC mesurées au pH du sol (< 18 méq./100 g sol), qui diminuent en profondeur parallèlement à la diminution de MO (Fig. 17). L'Al est le cation dominant sur le complexe d'échange et représente généralement plus de 70 % de la CEC. Les autres cations sont représentés par Ca et Mg et, dans une moindre mesure, par K et Na. Ils apparaissent en très faibles quantités, excepté au niveau des horizons de surface, traduisant l'action du cycle biologique. Les taux de saturation en bases (somme des bases Ca, Mg, K, Na $\times 100/CEC$) sont assez faibles (< 30 %), surtout dans le profil de Château-Lambert (< 13 %). Les teneurs en Ca et le taux de saturation en bases sont plus élevés dans le profil Gsang que dans celui de Château-Lambert. Ceci est très probablement en relation avec la présence de petites géodes de calcite dans la roche mère de Gsang. La réaction très acide de nos sols et la faible saturation en bases de leur complexe d'échange reflètent un environnement fortement lixiviant où la majeure partie des cations alcalins et alcalino-terreux sont évacués hors du profil.

F. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Quelques propriétés physiques de nos Andosols sont exposées dans les Fig. 18 et 19 (textures) et dans le Tab. 14 (teneurs en eau).

La distribution des tailles de particules entre les fractions argileuses ($< 2 \mu\text{m}$), limoneuses (limons fins LF : 2 - 20 μm , grossiers LG : 20 - 50 μm) et sableuses (sables fins SF : 50 - 200 μm , grossiers SG : 200 μm - 2 mm) est illustrée dans la Fig. 18. La détermination de la texture dans les Andosols est souvent peu fiable en raison de la dispersion incomplète de leurs particules minérales (WARKENTIN & MAEDA, 1980). Néanmoins, on peut raisonnablement considérer que les divers prétraitements appliqués ici (oxalate à $\text{pH} = 3$ et hypochlorite de Na) permettent d'obtenir une estimation convenable de la texture de nos sols.

On observe ainsi une forte prédominance des fractions d'argiles et de limons fins dans la partie supérieure des profils. Le taux d'argiles varie entre 24-29 % et 30-37 % respectivement dans Château-Lambert et Gsang. De même, les teneurs en limons fins sont d'environ 30-32 % et 29-35 % et les autres fractions se répartissent dans l'ordre : $LG < SF < SG$. Dans le bas des profils on assiste à une forte diminution du taux d'argiles (8-15 % pour Château-Lambert et 8-12 % pour Gsang) et à un développement de la fraction sableuse, surtout des SG (24-41 % pour Château-Lambert et 24-54 % pour Gsang).

Fig. 18 - Granulométrie des profils de Château-Lambert et Gsang.

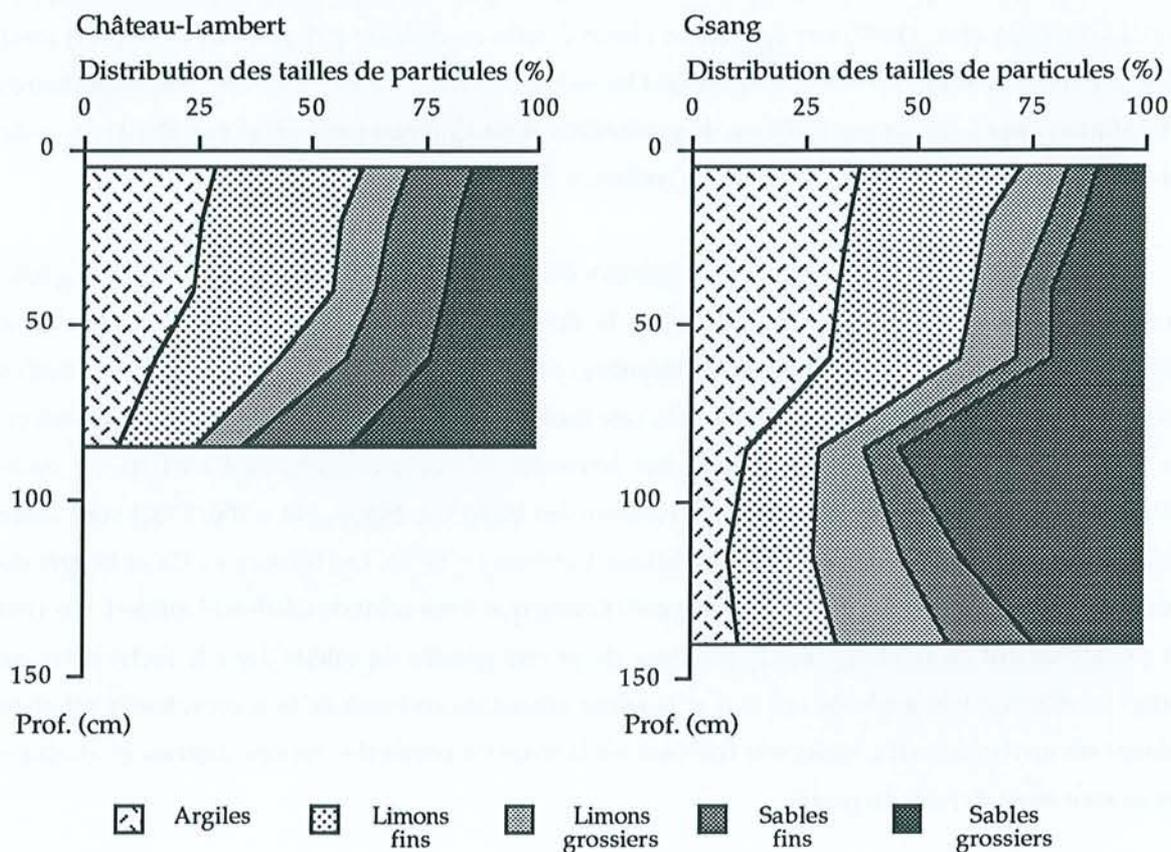
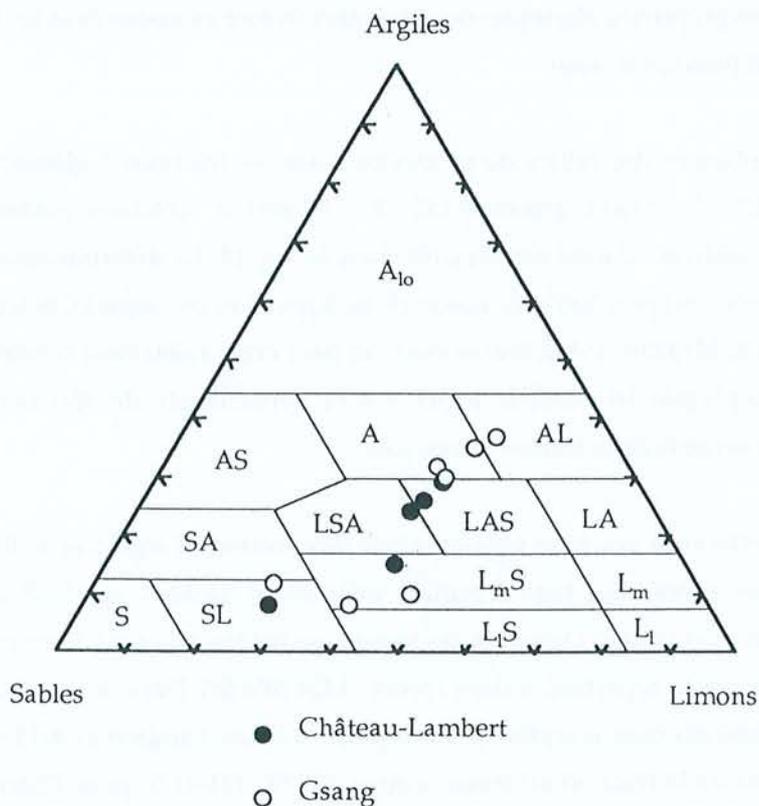


Fig. 19 - Diagramme de texture des profils de Château-Lambert et Gsang.
A : argile ; L : limon ; S : sable ; l : léger ; m : moyen ; lo : lourd.



La fraction limoneuse (LF+LG) ne diminue que faiblement dans le bas du profil de Château-Lambert ; elle se maintient dans le profil Gsang. Pour ce dernier, on note une forte augmentation des SG dans l'horizon B suivie d'une diminution.

Ces quelques données nous permettent de définir les classes texturales de nos Andosols (Fig. 19). Pour Château-Lambert, les horizons de surface et les horizons A₁B présentent globalement des textures limono-argilo-sableuses à limono-sablo-argileuses. L'horizon de profondeur (BC) est caractérisé par une texture sablo-limoneuse. Le profil Gsang montre la même tendance mais une texture plus argileuse : argilo-limoneuse en surface, argileuse en A₁B, sablo-limoneuse en B et limono-sableuse moyenne en BC et C. *Dans l'ensemble, une légère argilisation se développe de la base du profil vers la surface.*

L'examen des analyses granulométriques sans pré-traitements (Tab. IIG en annexe III) montre une forte diminution de la teneur en argiles (4-8 % pour Château-Lambert et 4-19 % pour Gsang) au profit des fractions plus grossières. Cette répartition indique qu'une forte proportion de ces argiles est engagée dans des agrégats de la taille des limons (*pseudo-limons*) et, dans une moindre mesure, dans des agrégats de la taille des sables. Ceci s'observe surtout dans les premiers 100 cm d'épaisseur dans les deux profils.

Les teneurs en eau à 1500 kPa sont moyennement élevées sur les échantillons frais (variant de 22 à 40 %), moindres sur les échantillons séchés puis réhumectés (19 à 31 %). Dans les deux cas, elles montrent peu de variations avec la profondeur et le profil de Belfahy présente les valeurs les plus faibles. HUNTER *et al.* (1987) ont mentionné des teneurs plus élevées dans les Andosols non allophaniques (Etat de Washington) variant de 39 à 81 % sur échantillons frais et de 33 à 46 % sur échantillons séchés puis réhumectés. De même, GARCIA-RODEJA *et al.* (1987) observent des valeurs plus élevées (échantillons séchés : 20 à 44 %) sur les Andosols non allophaniques de Galice.

La forte capacité de rétention en eau des Andosols est liée à leur grand volume poral. Cette propriété est soumise à un fort phénomène d'hysteresis avec le séchage. Ce changement irréversible est plus marqué pour les Andosols allophaniques que les Andosols non allophaniques car les allophanes contribuent largement à ce phénomène (NANZYO *et al.*, 1993b). Nous n'avons d'ailleurs pas observé de fortes variations entre les rétentions en eaux sur échantillons frais et séchés puis réhumectés dans nos Andosols non allophaniques.

Tab. 14 - Teneurs en eau dans les deux niveaux de prélèvement.

		8 Belfahy		10 Saint-Antoine		15 Château-Lambert		19 Gsang	
		H	S	H	S	H	S	H	S
H ₂ O*	10-20 cm	24	22	33	29	38	27	34	31
15 bar (%)	40-50 cm	22	19	30	21	40	27	30	25

* Teneurs en eau mesurées sur échantillons frais (H) et sur échantillons séchés puis réhumectés (S).

G. CONSTITUANTS MINÉRAUX : MINÉRALOGIE DES FRACTIONS FINES

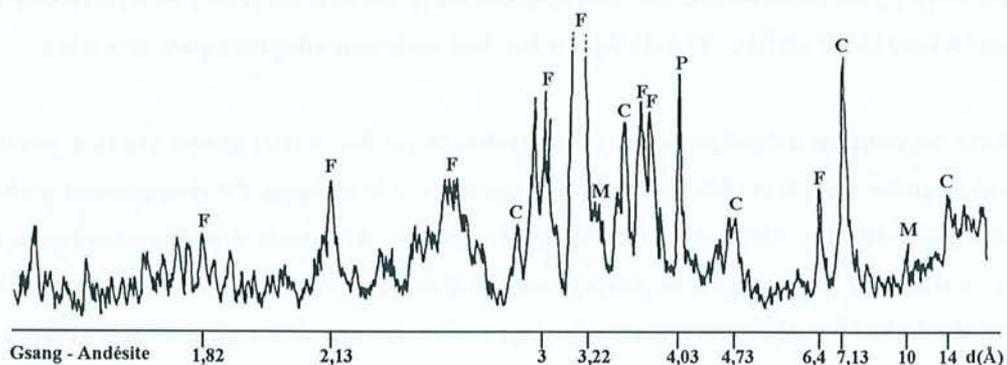
Le nature des constituants minéraux de nos sols a été appréciée grâce aux analyses minéralogiques par diffraction X. Les diagrammes DRX des fractions argileuses (lames orientées) sont portés en Fig. 24 pour Château-Lambert et 22 pour Gsang. Les diagrammes DRX de poudres des fractions limoneuses sont portées en Fig. 23 pour Château-Lambert et 21 pour Gsang. Dans ce dernier, un diagramme de poudre supplémentaire a été réalisé sur un échantillon de roche mère (porphyrite andésitique basique) broyée (Fig. 20).

Les lames orientées d'argiles sont soumises à différents tests. Un passage normal (argiles saturées Mg et température ambiante) permet d'obtenir les distances d_{001} (Å) diagnostiques des minéraux. Le pré-traitement chimique à l'éthylène-glycol est utilisé pour mettre en évidence les minéraux gonflants tels que les smectites (augmentation de d). Le traitement par chauffage conduit à une déshydratation et une deshydroxylation des feuillets et se traduit, dans le cas de minéraux 2:1 hydratés, par une diminution de d.

L'examen du diagramme DRX de la roche mère de Gsang (Fig. 20) révèle une grande abondance de feldspaths caractérisés par leur nombreuses raies de diffraction (RD) à 6,4 Å, entre 3,88 et 3,66 Å *etc...* et surtout par des RD de forte intensité entre 3,22 et 3,19 Å. La plupart d'entre eux appartient aux plagioclases (RD à 4,03 Å). La roche comporte également de la chlorite (RD à 7,13 - 14,1 - 4,73 et 2,84 Å) ainsi que quelques micas (RD à 10 et 3,34 Å).

Fig. 20 - Diagramme DRX de la roche mère de Gsang.

C : chlorite ; F : feldspath ; M : micas ; P : plagioclase.



Dans la fraction de LG de l'horizon de profondeur C de Gsang (Fig. 21), on observe de même beaucoup de feldspaths (mêmes RD que précédemment), des plagioclases en majorité (RD à 4,03 Å). Quelques feldspaths potassiques sont également présents (RD à 3 et 2,9 Å) en petites quantités. Un peu de quartz est présent et montre des RD bien individualisées et très intenses, notamment à 4,26 - 3,35 et 2,46 Å. Par contre celles des micas (10 Å) et de la chlorite (14,2 et 7,13 Å) sont plus ténues. Vers la surface, micas et chlorites diminuent et disparaissent dans les horizons A₁B₂ et A₀A₁

respectivement. La composition de la fraction LF (Fig. 21) est dans l'ensemble très proche de celle des LG. Les chlorites et les micas semblent un peu plus abondants que dans la fraction LG (les autres RD à 4,72 et 3,55 Å pour la chlorite et à 5 Å pour les micas apparaissent) et se maintiennent jusque en surface.

Dans les diagrammes des fractions argileuses de l'horizon de profondeur C de Gsang (Fig. 22), on observe, en passage normal, la prédominance de chlorites (RD à 14 - 7,08 - 4,72 et 3,54 Å) ainsi que des micas (RD à 10 - 5 et 3,32 Å). On note la disparition des plagioclases par rapport aux fractions plus grossières. Le traitement à l'éthylène-glycol ne montre pas de grandes différences avec le passage normal, et ce pour tous les échantillons. Ceci nous permet d'exclure la présence de smectites dans le profil de Gsang. La présence de trois pics à 14 - 11,8 et 10 Å au chauffage (550 °C) révèle non seulement la présence de chlorite (14 Å) mais aussi de vermiculite (10 Å) et d'interstratifiés chlorite-vermiculite (C-V) (11,8 Å). On n'observe pas de grandes variations vers la surface ou peut être une disparition des micas dans les horizons A₀A₁ et B.

En conclusion, le profil de Gsang est caractérisé par *une grande abondance de plagioclases dans les fractions grossières et une concentration des chlorites ainsi que leurs produits de transformation (C-V) dans les fractions fines*, en bon accord avec la description de la roche établie par STUSSI (1970) : présence de phénocristaux de plagioclases labrador à oligoclase abondants, séricitisés et chloritisés et paragenèse d'altération à chlorite, quartz et épidote. Quartz, feldspaths potassiques et micas sont présents en faibles quantités. Les chlorites sont plus ou moins vermiculitisées et les interstratifiés C-V semblent à tendance régulière. On ne note pas d'évolution marquée de cette composition vers la surface ni de minéraux 1:1 ou 2:1 de nature smectitique.

Le profil de Château-Lambert offre une composition peu différente. La fraction de LG (Fig. 23) est caractérisée par une abondance de plagioclases, accompagnés d'amphiboles (RD à 8,45 - 4,53 - 3,13 et 2,72 Å), ainsi qu'un peu de feldspaths potassiques et chlorites, sans évolution vers la surface. La fraction de LF (Fig. 23) présente les mêmes minéraux mais les amphiboles régressent et les chlorites augmentent par rapport à la fraction LG. Quelques micas apparaissent également. En surface (A₀A₁) les amphiboles et la chlorite diminuent fortement. De même que pour Gsang, les fractions argileuses de Château-Lambert (Fig. 24) montrent une abondance de chlorites, vermiculites et interstratifiés C-V, ainsi que des micas. Vers la surface les vermiculites dominent et les chlorites disparaissent. Ces fractions ne présentent pas de smectites ni de minéraux 1:1. Comme pour Gsang, cette composition minéralogique est en accord avec la description de la roche mère effectuée par ANDRE (1983). Cependant on observe quelques transformations vers la surface, comme *la disparition des chlorites et amphiboles et le développement des vermiculites et interstratifiés C-V*.

Ces diagrammes DRX des fractions argileuses de Château-Lambert et Gsang ne nous permettent pas d'exclure totalement la présence d'halloysite. La composition minéralogique de ces deux profils est tout à fait comparable à celle reportée pour divers Andosols non allophaniques par

Fig. 21 - Diagrammes DRX des fractions Limoneuses de Gsang.

C : chlorite ; F : feldspath ; FK : feldspath potassique ; M : micas ; P : plagioclase ; Q : quartz.

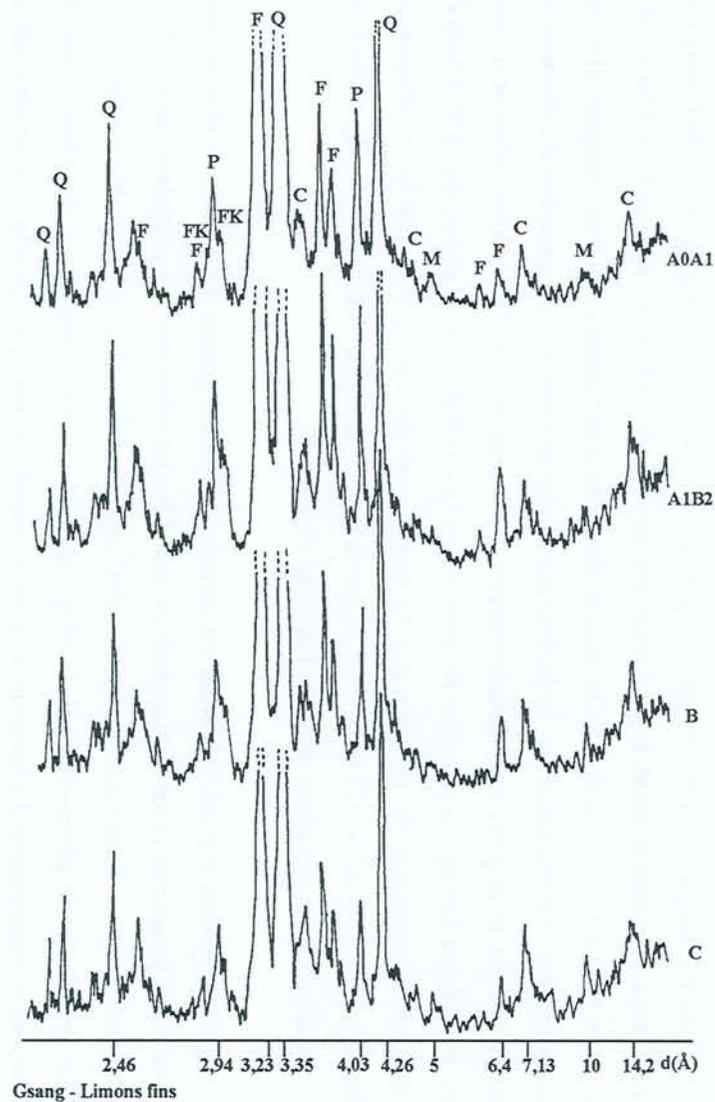
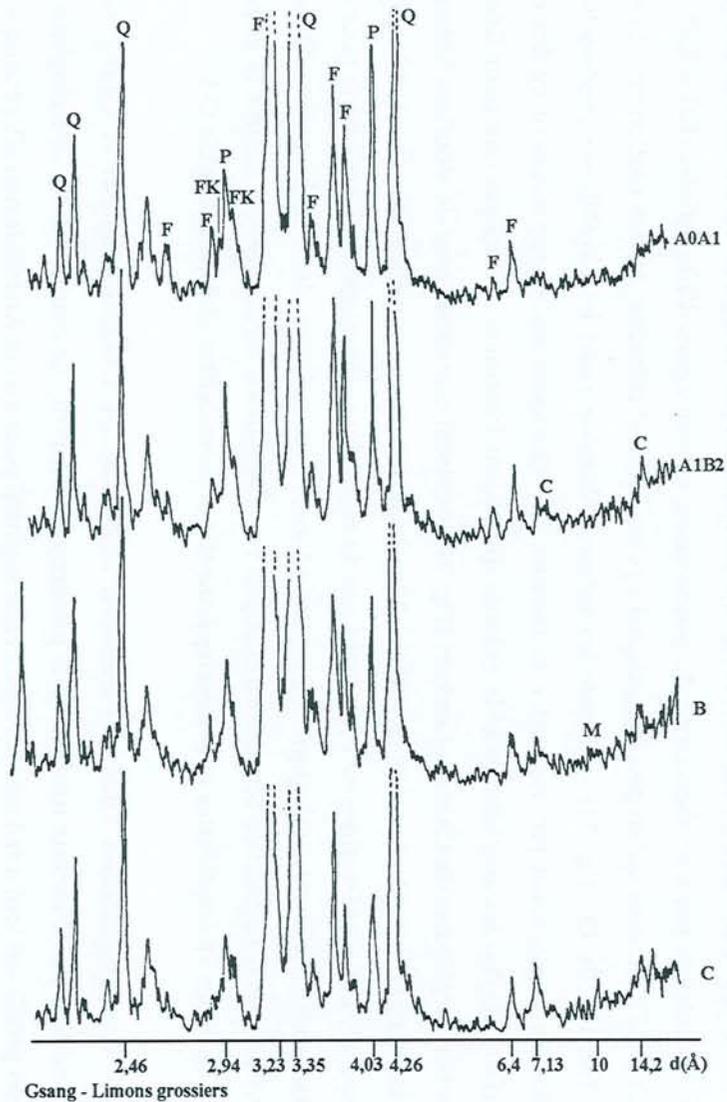


Fig. 22 - Diagrammes DRX des fractions argileuses de Gsang. N: passage normal ; EG: éthylène-glycol ; 550: chauffage à 550 °C. C: chlorite ; V: vermiculite ; C-V: interstratifiés chlorite-vermiculite ; M: micas ; Q: quartz.

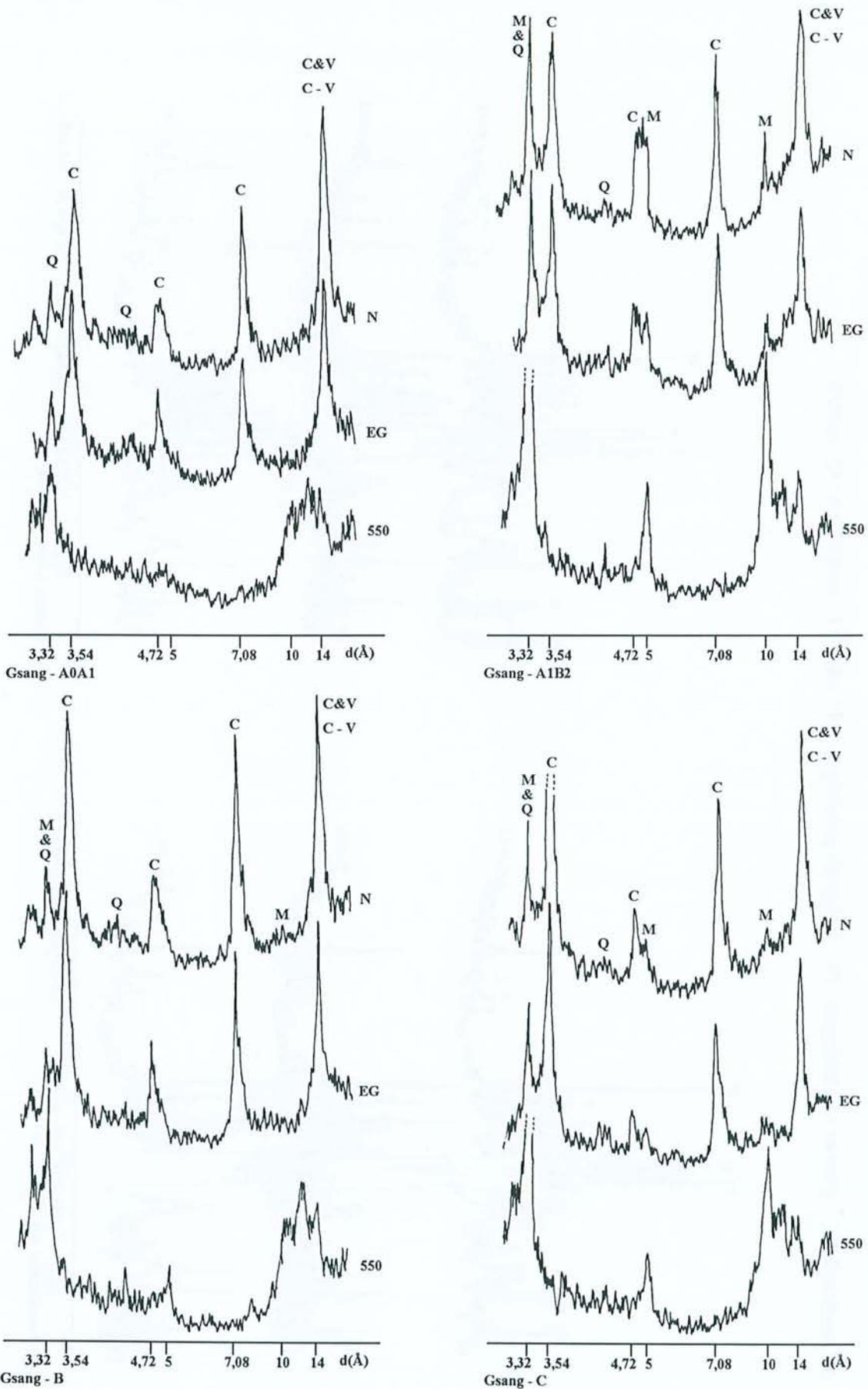


Fig. 23 - Diagrammes DRX des fractions Limoneuses de Château-Lambert.

A : amphibole ; C : chlorite ; F : feldspath ; FK : feldspath potassique ; M : micas ; P : plagioclase ; Q : quartz.

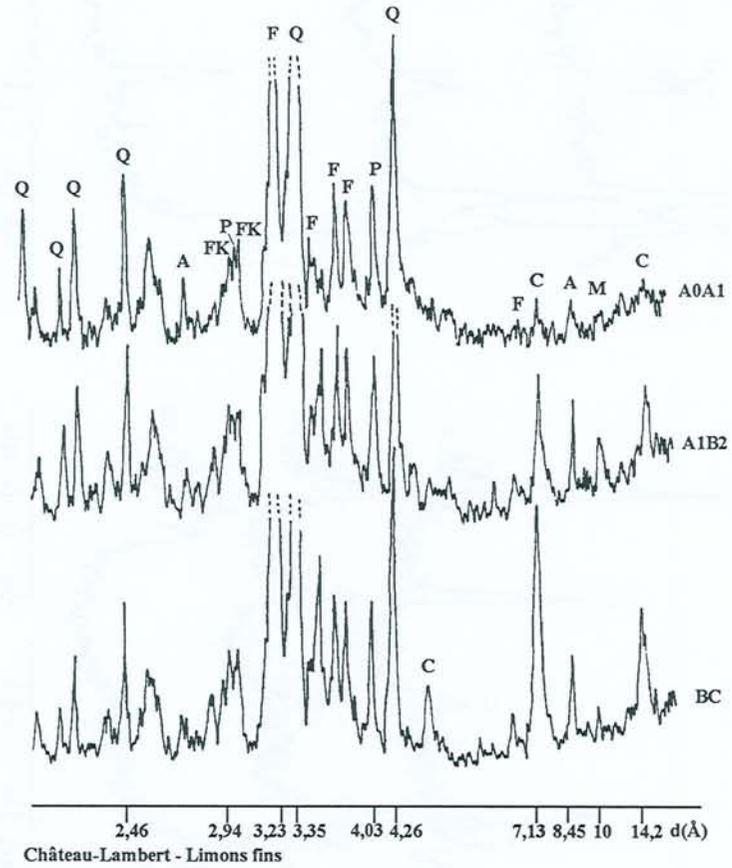
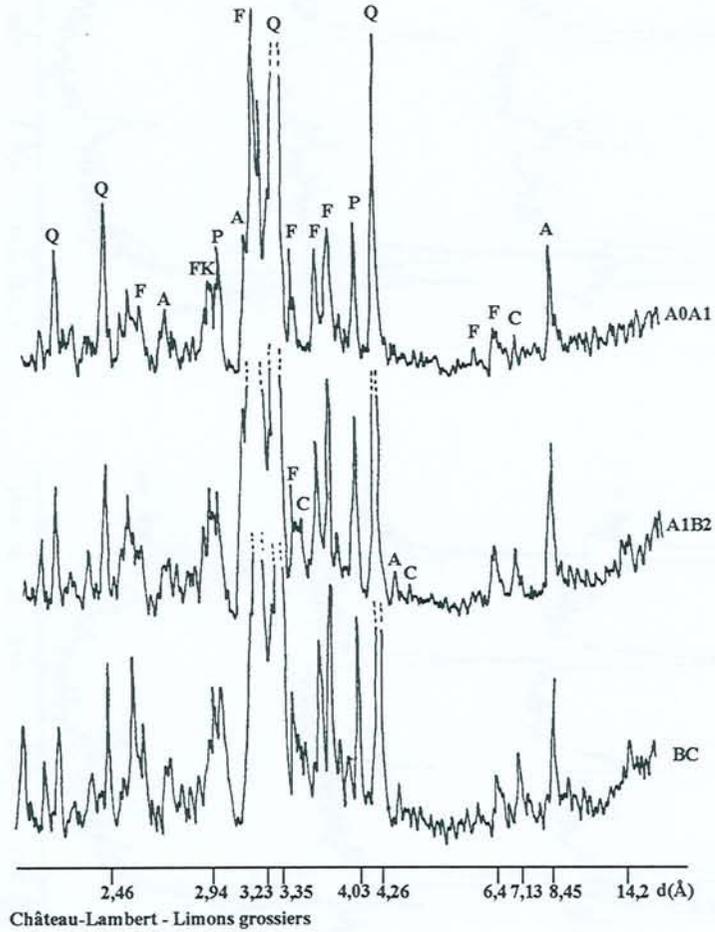
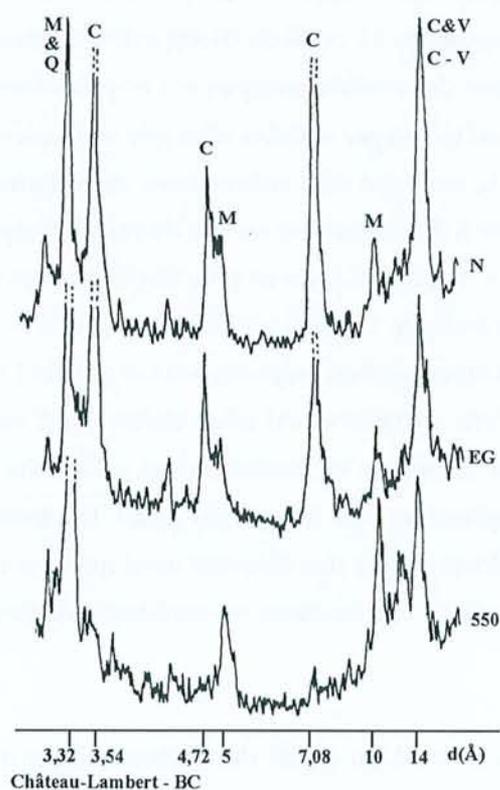
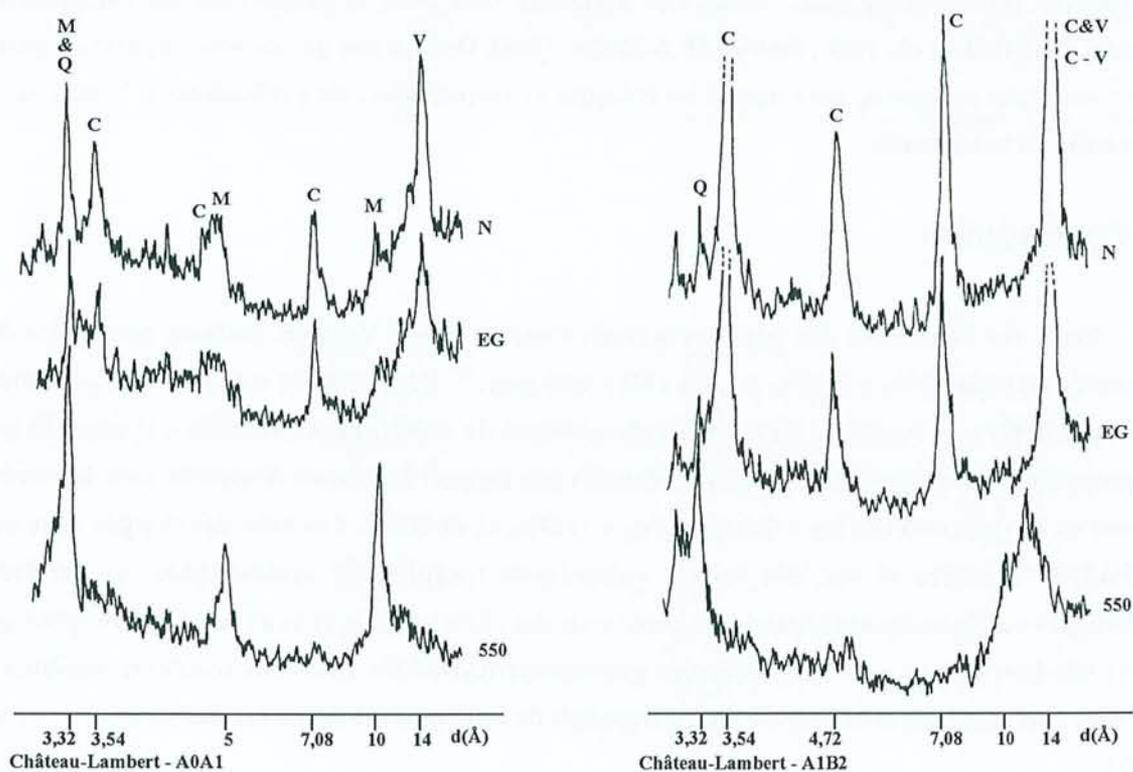


Fig. 24 - Diagrammes DRX des fractions argileuses de Château-Lambert.

N: passage normal ; EG: éthylène-glycol ; 550: chauffage à 550 °C. C: chlorite ; V: vermiculite ; C-V: interstratifiés chlorite-vermiculite ; M: micas ; Q: quartz.



SHOJI & ONO (1978), SHOJI & FUJIWARA (1984), SHOJI *et al.* (1985), GARCIA-RODEJA *et al.* (1987), HUNTER *et al.* (1987) et BAUMLER & ZECH (1994). Ces auteurs décrivent le plus souvent une abondance de minéraux 2:1 plus ou moins chloritisés dont l'origine a d'ailleurs souvent été sujette à controverse (DAHLGREN *et al.*, 1993). Ces minéraux sont pour la plupart hérités du matériau parental (HUNTER *et al.*, 1987 ; BAUMLER & ZECH, 1994). Dans le cas de nos sols, la majeure partie des constituants minéraux, notamment les chlorites et vermiculites, est probablement héritée de la roche mère ou transformée.

III. CONCLUSIONS

Ainsi, sur l'ensemble des profils examinés dans le Massif Vosgien, certains présentent des propriétés andiques ($Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0 \%$; $Da \leq 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$; $Rét.P \geq 85 \%$) suffisamment exprimées pour appartenir aux Andosols dans les divers systèmes de classification. Toutefois, il apparaît que ces propriétés andiques sont assez peu accentuées par rapport à d'autres Andosols dans le monde, surtout en ce qui concerne les valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$ et de Rét.P. Ces sols, développés sous une végétation forestière et sur des roches volcaniques (porphyrites andésitiques ou porphyre trachytique) ou plutoniques (diorite), se situent sous des climats froids et humides. Leur morphologie est en très bon accord avec celle observée généralement dans les Andosols (couleurs sombres et structure microagrégée) et ne montre pas de transferts de composés minéraux ou organiques au sein du profil.

La fraction fine de ces Andosols se rapproche du pôle non allophanique. Elle est dominée par des complexes Al,Fe-matière organique. Le profil de Gsang montre cependant quelques allophanes en profondeur (au-delà de la section de contrôle andique) et une proportion assez importante d'oxydes de fer. Ces sols sont en outre caractérisés par une abondance de composés organiques de type fulvique, diminuant vers le bas du profil, mais qui sont encore assez importants jusqu'à 1 m de profondeur. Cette MO ne semble pas soumise à des migrations au sein du profil, excepté de façon très ténue dans le profil de Château-Lambert. Les rapports C/N sont plus élevés que ceux que l'on rencontre dans les Andosols et augmentent en profondeur. Ces sols présentent une forte acidité ainsi qu'une faible CEC, diminuant en profondeur. Le complexe d'échange est dominé par de l'Al et le taux de saturation en bases est ainsi assez faible. Cette richesse en Al éch. confère à ces sols un caractère alique. Leur texture, dans l'ensemble sablo-limoneuse en profondeur et plus riche en limons fins et argiles en surface, traduit une légère argilisation vers le haut du profil. Les minéraux de ces fractions fines, hérités ou transformés, sont dominés par des chlorites ainsi que leurs produits de transformation (interstratifiés Chlorite-vermiculite). Ces fractions ne semblent pas contenir de minéraux 1:1 ou 2:1 de nature smectitique.

Enfin, un examen plus attentif du profil de Château-Lambert révèle que ce sol pourrait présenter les prémices d'une podzolisation. Quelques points vont effectivement dans ce sens : une végétation acidiphile, un humus de type moder, un pH acide, un C/N élevé et augmentant en

profondeur. De plus, il semble que des transferts de MO et d'éléments métalliques (voir l'évolution de la DOEO et de Fe_t en profondeur) aient lieu dans ce sol. On notera d'ailleurs que ce sol présente également les propriétés andiques les mieux exprimées.

IV. CLASSIFICATION

A. LA SOIL TAXONOMY

Pour appartenir à l'Ordre des Andisols de la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), un sol doit, dans un premier temps, être exclu des Ordres précédents dans la hiérarchie, les Histosols et Spodosols. L'élimination des Histosols est aisée car ils sont décrits comme des sols ne présentant pas de propriétés andiques dans la section de contrôle andique. Concernant les Spodosols, ils sont définis comme possédant un horizon spodique (ou un horizon A_p contenant des matériaux spodiques) constitué d'au moins 85 % de matériaux spodiques. Ces matériaux sont dominés par des composés illuviaux "amorphes" constitués de MO et d'Al, avec ou sans Fe. Nos sols peuvent satisfaire quelques uns des critères spodiques, tels qu'un $pH_{H_2O} \leq 5,9$ et $Corg \geq 0,60$ % par exemple. Mais ils ne vérifient pas totalement les points concernant la redistribution d'éléments métalliques ou organiques estimés par $Al_o + 1/2Fe_o$ ou DOEO, ceci pour les stations de Château-Lambert et Gsang. Nos sols, présentant des propriétés andiques dans la section de contrôle andique (35 cm dans les 60 cm supérieurs du sol minéral), font donc partie de l'Ordre des Andisols.

Au niveau des sous-ordres (SO), on peut rejeter les Aquands, Torrands, Xerands et Ustands car ils présentent des régimes d'humidité différents de nos sols. Des teneurs en eau à 1500 kPa > 15 % (échantillons secs) et > 30 % (échantillons frais excepté Belfahy) nous permettent d'éliminer le SO des Vitrands. Par contre, il nous est plus difficile d'écarter indéniablement le SO des Cryands, défini par un régime de température pergélique ou cryique. Certes, nos sols ne présentent vraisemblablement pas de régime pergélique (température moyenne annuelle du sol < 0 °C), mais le régime cryique pourrait être envisageable ($0 < TMA \text{ sol} < 8$ °C). Comme nous ne possédons pas les données concernant les températures du sol (mesurées à 50 cm de profondeur) mais seulement la température de l'air (estimée à partir des stations de CACHAN, 1974, les plus proches), il est délicat de trancher entre le régime cryique ou mésique ($8 \leq TMA \text{ sol} < 15$ °C). En admettant que nos sols ne rentrent dans aucun des SO précédents, nous considérerons qu'ils appartiennent au SO des Udands.

Concernant les grands groupes (GG), nos sols ne présentent pas d'horizon placique ou cimenté et sont donc exclus du GG des Placudands et Durudands. De même, ils ne répondent pas au critère d' Im de l'épipédon mélanique ($Im \leq 1,70$) et le GG des Mélanudands est ainsi rejeté. Par contre, ils répondent à ses autres critères (profondeur, épaisseur, teneurs en Corg) tout en présentant des $Im > 1,70$ et des couleurs Munsell (humide), valeur et intensité, inférieures ou égales à 3. Ils appartiennent aux GG des Fulvudands.

Enfin, l'absence de contact lithique et la présence de teneurs en Al éch. > 2,0 cmol/kg nous permet de les rattacher au sous groupe Alique. Ainsi, nos sols appartiennent aux *Alic Fulvudands* de la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994).

B. LA CLASSIFICATION FAO - UNESCO

Dans la classification FAO - Unesco (DRIESSEN & DUDAL, 1991), nos sols appartiennent au MSG des Andosols car ils montrent des propriétés andiques sur une profondeur d'au moins 35 cm. Au niveau des unités, les sols étudiés ne répondent pas aux critères de définition des unités Gélique, Gleique ou Vitriques. Par contre, ils offrent toutes les caractéristiques de l'horizon mollique concernant des critères de couleur, Corg, consistance, structure et épaisseur. En revanche, leur taux de saturation en bases est inférieur à 50 % (supérieur dans le cas de l'horizon mollique), caractérisant un horizon umbrique. Ces sols sont donc à rattacher aux *Umbric Andosols* de la classification FAO - Unesco.

C. LE RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE

En examinant les critères du RP (AFES, 1995), nos sols présentent des horizons répondant à la définition des horizons de référence Aluandiques. Ils peuvent être rattachés aux Andosols, ou plus précisément aux Aluandosols. Ils ne présentent pas de caractère perhydrique mais ils montrent des teneurs en Corg supérieures à 6 % et une couleur noire sur plus de 50 cm d'épaisseur. Les profils étudiés peuvent donc être rattachés aux *Aluandosols humiques* du Référentiel Pédologique.

D. LE WORLD REFERENCE BASE

La définition de l'horizon alu-andique dans le WRB (SPAARGAREN, 1994) repose sur les mêmes critères que dans le RP. Les sols étudiés font donc également partie des Andosols du WRB. Ils sont exclus des unités vitriques (présence d'un horizon vitr-andique) et hydraliques (teneurs en eau à 1500 kPa sur échantillons frais ≥ 100 %). Ces sols présentent la couleur sombre de l'horizon umbrique et des teneurs en Corg > 6 % sur une profondeur de 50 cm ; ils appartiennent donc aux *Pachalic Andosols* dans le WRB. Dans la récente révision du WRB (SHOJI *et al.*, 1996), les sols montrent les propriétés des horizons non vitr-andiques et plus précisément celles des horizons alu-andiques. Leurs teneurs en Corg ≥ 6 % (avec un minimum de 4 % dans chaque horizon) nous permettent de les classer dans les *Melano-alu Andosols* pour les plus sombres (couleur Munsell sur échantillons humides, valeur et intensité, ≤ 2) ou dans les *Fulvo-alu Andosols* pour les plus clairs. Enfin, les sols présentant des teneurs en Corg ≥ 6 % sur une épaisseur d'au moins 50 cm sont qualifiés de *Pachic Andosols*.

Au total, quelle que soit la classification ou le référentiel utilisé, les sols étudiés sont toujours à rattacher aux Andosols.

CHAPITRE IV - LES INTERGRADES ANDIQUES

Nous allons maintenant examiner les sols qui ne rencontrent pas toutes les conditions requises dans la définition des Andosols mais qui, nous le verrons, présentent des propriétés andiques suffisamment exprimées pour appartenir aux intergrades andiques définis dans la Soil Taxonomy par une $Da \leq 1 \text{ g.cm}^{-3}$ et une somme $Al_0 + 1/2Fe_0 > 1,0 \%$ (SOIL SURVEY STAFF, 1994). Les sols concernés sont ceux étudiés par ZIDA (1994), soit les 9 profils de Ménard, Ordon, Tête des Sapins, Plain des Boeufs, Langenberg, Rossberg, Schlussekopf, Servaumont et Champ du Feu (voir Tab. 7). Les descriptions morphologiques et les caractéristiques environnementales sont consignées en annexe II dans les fiches de sols, ainsi que les données analytiques, également exposées dans ce chapitre pour plus de clarté dans les Tab. 15 & 16.

I. PROPRIÉTÉS ANDIQUES

Les résultats relatifs aux trois points fondamentaux de la définition des Andosols sont présentés dans les Tab. 7 ($Al_0 + 1/2Fe_0$) et 15 (Da et Rét.P).

Nous avons vu dans le Chap. II que toutes ces stations ne répondaient pas au critère $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2 \%$ dans les deux niveaux de prélèvement. Toutefois, les profils de Ménard et Champ du Feu montrent une moyenne $> 2 \%$. Cette valeur est toujours supérieure à 1% dans les autres profils, particulièrement dans les stations d'Ordon, Tête des Sapins et Langenberg où la moyenne est supérieure à $1,7 \%$.

Le second point de la définition ($Da \leq 0,9 \text{ g.cm}^{-3}$) est toujours satisfait, hormis dans le niveau 40-50 cm de la Tête des Sapins ($Da = 1,2 \text{ g.cm}^{-3}$). Dans les autres profils, les valeurs sont comprises entre $0,7$ et $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$. Seul le profil de Champ du Feu montre des Da particulièrement faibles ($0,5$ à $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$).

Enfin, la valeur de 85% requise pour Rét.P n'est jamais atteinte en même temps dans les deux niveaux de prélèvement. Les valeurs de Rét.P sont généralement $< 81 \%$ et sont particulièrement faibles dans les profils de Rossberg et Schlussekopf (58 à 67%). Seuls les niveaux 40-50 cm des stations de Servaumont et Champ du Feu montrent une Rét.P = 85% .

Ainsi, bien que ces sols ne répondent pas aux critères stricts de la définition des Andosols, certains présentent des valeurs assez proches des limites requises (Champ du Feu et, dans une moindre mesure, Ménard et Servaumont). De plus, presque tous les sols étudiés montrent une somme $Al_0 + 1/2Fe_0 > 1 \%$ et une $Da \leq 0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ leur permettant de satisfaire les critères relatifs aux intergrades andiques dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994).

Tab. 15 - Propriétés physiques et chimiques des profils ne vérifiant pas les critères andiques.

	Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	C (%)	C/N	pH		Δ pH	Al éch. (cmol/kg)
		Humide	Sec					H ₂ O	KCl		
1 Ménard	10-20	10YR2/1	10YR3/2	0,8	77	8,9	13	4,4	3,8	0,6	7,6
	40-50	10YR2/2	10YR5/3	0,9	76	5,1	13	4,4	4,0	0,4	4,7
2 Ordon	10-20	10YR2/1	10YR2/1	0,7	76	10,1	15	4,2	3,8	0,4	7,1
	40-50	10YR2/2	10YR3/2	0,9	79	6,0	17	4,4	4,2	0,2	4,0
3 Tête des Sapins	10-20	10YR2/1	10YR3/3	0,8	78	7,0	15	4,5	4,0	0,5	6,2
	40-50	10YR3/2	10YR5/3	1,2	74	3,1	15	4,5	4,3	0,2	3,1
11 Plain des Boeufs	10-20	10YR2/2	10YR3/3	0,8	66	5,4	17	4,4	3,8	0,6	6,0
	40-50	10YR3/4	10YR5/4	0,8	75	3,8	19	4,4	4,2	0,2	2,7
16 Langenberg	10-20	10YR2/2	10YR3/3	0,8	74	7,8	19	4,3	3,9	0,4	5,8
	40-50	10YR2/2	10YR4/3	0,7	81	6,8	20	4,4	4,2	0,2	4,4
18 Rossberg	10-20	10YR2/2	10YR4/3	0,8	66	6,3	16	4,3	3,8	0,5	12,0
	40-50	7,5YR3/2	7,5YR5/4	0,9	67	3,3	16	4,4	4,1	0,3	8,0
20 Schlüsselkopf	10-20	10YR2/1	10YR4/1	0,8	58	8,6	18	4,9	4,0	0,9	2,7
	40-50	10YR2/2	10YR5/2	0,9	63	2,0	20	4,7	4,0	0,7	6,4
21 Servaumont	10-20	5YR3/2	10YR4/3	0,8	66	2,8	14	4,4	4,0	0,4	9,5
	40-50	5YR3/3	5YR5/4	0,7	85	1,6	15	4,8	4,2	0,6	5,3
22 Champ du Feu	10-20	10YR2/1	10YR3/2	0,5	76	11,7	18	4,0	3,6	0,4	14,7
	40-50	10YR2/2	2,5YR4/4	0,6	85	10,3	18	4,5	4,1	0,4	9,1

Tab. 16 - Données des extractions sélectives des profils ne vérifiant pas les critères andiques.

	Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p (%)	Fe _p	Allophanes	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
1 Ménard	10-20	1,10	1,66	0,07	0,90	1,09	0,8	0,8	0,7
	40-50	1,26	1,80	0,12	1,03	1,19	0,8	0,8	0,7
2 Ordon	10-20	0,92	1,08	0,04	0,88	1,00	0,2	1,0	0,9
	40-50	1,38	1,12	0,18	1,28	1,06	-	0,9	0,9
3 Tête des Sapins	10-20	1,18	1,32	0,06	1,03	1,09	0,6	0,9	0,8
	40-50	1,32	0,90	0,14	1,08	0,63	1,0	0,8	0,7
11 Plain des Boeufs	10-20	0,66	1,18	0,03	0,56	0,91	0,5	0,8	0,8
	40-50	1,10	1,36	0,08	0,94	1,25	0,6	0,9	0,9
16 Langenberg	10-20	1,04	1,18	0,06	0,92	0,99	0,4	0,9	0,8
	40-50	1,30	1,04	0,11	1,14	1,01	0,7	0,9	1,0
18 Rossberg	10-20	0,84	0,95	0,03	0,78	0,70	0,2	0,9	0,7
	40-50	1,08	0,95	0,09	0,90	0,65	0,6	0,8	0,7
20 Schlüsselkopf	10-20	0,77	0,40	0,04	0,80	0,45	-	1,0	1,1
	40-50	0,92	0,45	0,08	0,90	0,50	-	1,0	1,1
21 Servaumont	10-20	0,88	0,45	0,10	0,69	0,35	0,7	0,8	0,8
	40-50	1,50	0,70	0,45	0,46	0,20	4,5	0,3	0,3
22 Champ du Feu	10-20	1,00	1,50	0,04	1,05	1,40	-	1,1	0,9
	40-50	1,55	1,50	0,10	1,50	1,40	-	1,0	0,9

II. AUTRES PROPRIÉTÉS

Les caractéristiques générales de ces 9 profils sont notées dans les Tab. 15 et 16.

Les teneurs en Al_O sont faibles, variant de 0,66 à 1,38 % et augmentent en profondeur. Dans les niveaux 40-50 cm de Servaumont et Champ du Feu, elles atteignent 1,50 à 1,55 %. Les teneurs en Fe_O sont dans l'ensemble du même ordre de grandeur que celles en Al_O et augmentent également en profondeur (excepté pour les profils de Tête des Sapins, Langenberg et Rossberg). De plus, dans les stations de Schlussekopf et Servaumont, elles sont nettement inférieures aux teneurs en Al_O . Les valeurs de Si_O sont très faibles (0,03 à 0,18 %) et augmentent en profondeur. Seul le niveau 40-50 cm de Servaumont montre une valeur plus élevée (0,45 %). Les teneurs en Al_P et Fe_P sont proches de celles en Al_O et Fe_O , se traduisant par des rapports Al_P/Al_O et Fe_P/Fe_O élevés, variant de 0,7 à 1,1. Ainsi, comme dans nos Andosols, les sols étudiés sont caractérisés par la présence de complexes organo-métalliques et ne contiennent pas de composés allophaniques excepté dans le niveau 40-50 cm de Servaumont qui présente quelques allophanes (4,5 %).

Les teneurs en C sont assez élevées, mais moindres que celles observées dans nos Andosols (significativement à $p = 0,0538$ à $0,0534$). Elles diminuent en profondeur et varient de 2,0 à 10,1 %. Les valeurs les plus faibles se rencontrent dans le profil de Servaumont (< 3 %) et les plus élevées dans celui de Champ du Feu (11,7 à 10,3 %). Les rapports C/N ne montrent pas de variations ou augmentent légèrement en profondeur. Ils sont assez faibles dans les stations de Ménard, Ordon, Tête des Sapins, Rossberg et Servaumont (13 à 17) et plus élevés dans les autres (17 à 20), se rapprochant de la gamme obtenue pour nos Andosols.

Les pH_{H_2O} sont acides, varient de 4,0 à 4,9 et augmentent en profondeur, excepté pour Ménard, Tête des Sapins et Plain des Boeufs où ils ne varient pas et pour Schlussekopf où ils diminuent. Les pH_{KCl} sont légèrement plus faibles, ceci se traduisant par un ΔpH généralement < 0,6. Il est plus élevé dans le profil de Schlussekopf (0,9 à 0,7). Les teneurs en Al éch. sont élevées (2,7 à 14,7 cmol/kg), diminuent en profondeur (hormis pour Schlussekopf) et sont toujours supérieures à 2,0 cmol/kg.

III. CLASSIFICATION

Ces sols présentent des valeurs de $Al_O + 1/2Fe_O$ et de Rét.P inférieures à la limite requise dans la définition des Andosols. Mais ces critères ne concernent que le premier volet de cette définition dans les divers systèmes de classification (cf. 1^o partie, chap. I) et nous devons donc examiner les autres points pour pouvoir exclure définitivement nos sols de l'ordre des Andosols. Ainsi, dans le RP (AFES, 1995) ou dans le WRB (SPAARGAREN, 1994), ces sols ne répondent pas aux exigences requises pour les horizons alu(-)andiques ou sil(-)andiques. Par contre, ils pourraient vérifier les critères des horizons vitr(-)andiques, caractérisés notamment par des valeurs de $Al_O + 1/2Fe_O$ plus faibles (entre 0,4 et 2 %) et par d'importantes quantités de verres volcaniques. On pourrait, à ce sujet, nous

reprocher de ne pas avoir déterminé la teneur en verres volcaniques de nos sols. Or, les roches mères de ces profils, toujours compactes et anciennes, présentent une mésostase le plus souvent finement cristallisée et ne contiennent vraisemblablement pas, ou plus, de verres. Ainsi, nos sols ne peuvent satisfaire les critères des horizons vitr(-)andiques.

De même, les autres points de la définition des Andosols dans la classification FAO (DRIESSEN & DUDAL, 1991) ou dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), reposant également sur des teneurs en verres importantes pour des valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$ comprises entre 0,4 et 2 %, ne sont pas vérifiées. Enfin, dans la version révisée du WRB (SHOJI *et al.*, 1996), ces sols sont exclus des horizons vitr-andiques comme des non vitr-andiques. Dans ces derniers, la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ peut s'abaisser à 1,2 % mais dans ce cas, elle doit également être associée à des teneurs en verres.

Ainsi, nous considérerons que ces 9 profils montrent des propriétés andiques trop faiblement exprimées pour appartenir aux Andosols. Il est difficile de les rattacher sans conteste à un autre ordre car nous ne disposons que d'un nombre limité de données les concernant. Pourtant, *en raison de leurs caractéristiques morphologiques et de leur contexte écologique, nous pouvons présumer de leur appartenance aux sols bruns*. Dans la classification FAO-Unesco (DRIESSEN & DUDAL, 1991), tout comme dans le WRB (SPAARGAREN, 1994), ces sols appartiennent aux Cambisols. Dans ces classifications, il n'existe pas de qualificatif qui rende compte de propriétés andiques peu exprimées. Nous pouvons rattacher les sols étudiés aux *Cambisols humiques ou dystriques*. Par contre, dans le RP (AFES, 1995), le qualificatif andique peut être appliqué dans certains cas pour exprimer des caractères andiques atténués. Nos sols peuvent être rattachés soit aux *Alocrisols humiques*, soit aux *Brunisols oligosaturés andiques*. Enfin, dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), les sols peuvent être inclus dans l'ordre des Inceptisols et plus particulièrement dans les Haplumbrepts. Le sous-groupe andique y est défini de façon précise par l'existence d'un horizon d'une épaisseur d'au moins 18 cm dans les 75 cm supérieurs du sol présentant une $Da \leq 1 \text{ g.cm}^{-3}$ et une somme $Al_0 + 1/2Fe_0 > 1,0 \%$. Nos sols peuvent ainsi rentrer dans le sous-groupe des *Andic Haplumbrepts*.

IV. CONCLUSIONS

Les 9 profils examinés ici montrent une manifestation des propriétés andiques trop modeste pour répondre aux critères de classification des Andosols. Cependant, elles sont suffisamment exprimées pour que ces sols appartiennent aux sous-groupes andiques prévus dans d'autres classes de sols de certaines classifications. Ces sols font ainsi partie des intergrades andiques, probablement des sols bruns. Ces 9 profils présentent certaines propriétés comparables à celles des Andosols étudiés dans le chap. III, soit une forte acidité, une richesse en Al éch. et un caractère non allophanique. Par contre, ils s'en démarquent par leurs teneurs en carbone plus faibles et surtout par une expression plus modérée des critères de $Al_0 + 1/2Fe_0$ et de Rét.P. Le point concernant la Da est quant à lui presque toujours respecté.

CHAPITRE V - LIMITES ET FACTEURS DE L'ANDOSOLISATION DANS LE MASSIF VOSGIEN

Au vu des résultats exposés dans les chapitres précédents, nous pouvons à présent nous pencher sur les facteurs régissant l'apparition des propriétés andiques dans le Massif Vosgien. Nous allons ainsi examiner l'effet des conditions climatiques (reportées dans les fiches de sols en annexe II) et de la nature des roches mères (cf. 1^o partie et annexe I) sur la manifestation des propriétés andiques et plus particulièrement sur l'évolution de la somme $Al_O + 1/2Fe_O$ (Tab. 7). Bien que nous ne disposions pas de caractéristiques climatiques précises pour chacune de nos stations (nos données ont été estimées à partir des stations météorologiques les plus proches de CACHAN, 1974) ni des analyses chimiques de toutes les roches mères (la plupart proviennent de la littérature), nous pouvons néanmoins dégager quelques conclusions générales.

Concernant les roches volcaniques, nous allons examiner dans un premier temps les sols développés sur porphyrite andésitique basique (stations de Saint-Antoine, Masevaux, Rossberg, Gsang et Schlussekopf). Sur cette andésite, décrite par STUSSI (1970) comme une roche microlitique porphyrique à plagioclases et pyroxènes dominants et ne contenant pas de verres, deux stations (Saint-Antoine et Gsang) présentent une somme $Al_O + 1/2Fe_O > 2,2$ %. Nous ne disposons de l'analyse chimique de la roche mère uniquement pour les stations de Rossberg et Gsang, indiquant, pour cette dernière, une roche basique ($SiO_2 = 49,82$ %), assez riche en Fe_2O_3 (8,84 %), en MgO (2,94 %) et surtout en CaO (6,78 %). L'andosolisation peut donc se manifester dans ces deux stations, également soumises à un environnement très humide (altitude > 1000 m, exposition NO, 1800-2000 mm/an). La station de Rossberg, localisée sur le même massif que Gsang, montre cependant une somme $Al_O + 1/2Fe_O = 1,44$ %. Ici, les deux facteurs, climat et roche mère, sont moins propices au développement de propriétés andiques : la roche est plus acide ($SiO_2 = 54,62$ %) et moins riche en CaO (0,89 %) et une exposition SO entraîne des conditions plus sèches. Ceci s'accroît encore dans la station de Masevaux ($Al_O + 1/2Fe_O = 1,01$ %) où une plus faible altitude et une exposition S-SE favorisent également l'assèchement. Quant à la station de Schlussekopf, on peut évoquer sa position, à une faible altitude, sur le versant alsacien beaucoup moins arrosé (1200 mm/an). Dans ces deux derniers profils, nous ne pouvons pas nous prononcer quant à l'effet de la roche mère, sachant que le climat apparaît comme facteur limitant.

Une dernière station vérifie les critères andiques, celle de Belfahy, mais les propriétés andiques y sont assez limitées par rapport à nos autres Andosols (en particulier $Al_O + 1/2Fe_O = 2,06$ %). En effet, ce profil se développe à partir d'une roche mère plus acide ($SiO_2 \sim 60$ %), moins riche en Fe_2O_3 (5,93 %) et en alcalino-terreux (environ 3 %). Sa situation à une plus faible altitude (835 m) et à une exposition E-SE induisent des conditions moins humides (1700 mm/an).

Pour les autres stations ne vérifiant pas les critères andiques, on peut évoquer, pour certaines, une roche mère certes favorable (Ménard, Champ du Feu et surtout Servaumont et Evaux-B) mais soumise à des conditions trop peu humides (< 1500 mm/an). Dans le cas des stations d'Ordon et de Tête des Sapins, ce sont à la fois des conditions également peu humides associées à des roches de chimisme intermédiaire (SiO_2 de 57,6 à 64,79 %) qui limitent le développement de l'andosolisation. Pour les stations de Schirmeck, Grendelbruch et Donon, on peut attribuer la faible expression des propriétés andiques (voire trop faibles dans les deux premières stations pour appartenir aux intergrades andiques : $\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0 < 1\%$), probablement au facteur roche mère, mais aussi aux conditions climatiques (altitudes plus faibles).

Considérons à présent le cas des roches mères plutoniques, soit les stations de Plain des Boeufs (syénodiorite), Langenberg (Syénogabbro), Neuntelstein (diorite) et Tête Niqueuse, La Pransière et Château-Lambert (diorite mésocrate). Elles sont soumises à des conditions climatiques dans l'ensemble comparables et *a priori* favorables au développement de propriétés andiques : hautes altitudes (≥ 900 m) et expositions N ou N-O induisant des températures fraîches et surtout de fortes précipitations (2000 mm/an), sans longues périodes d'assèchement. Dans ces conditions climatiques, les sols présentent, à divers degrés, des propriétés andiques. On remarque donc que l'andosolisation peut se manifester sur ces roches entièrement cristallisées à condition qu'elles soient suffisamment riches en minéraux altérables. C'est notamment le cas de la diorite mésocrate à pyroxène de chimisme basique ($\text{SiO}_2 = 48,08\%$), riche en Fe_2O_3 (12,23 %) et en alcalino-terreux ($\text{MgO} = 5\%$; $\text{CaO} = 8,34\%$), présentant une texture souvent microgrenue. Sur cette roche, deux stations (Tête Niqueuse et Château-Lambert) montrent une somme $\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0 > 2,5\%$, suffisante pour appartenir aux Andosols. Dans ces deux stations, la contribution de Fe_0 n'est pas négligeable dans la valeur de la somme $\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0$ (respectivement dans les niveaux 10-20 et 40-50 cm $1/2\text{Fe}_0 = 0,53$ et $0,9\%$ pour la station de Tête Niqueuse et 1 et $0,95\%$ pour Château-Lambert), soulignant l'importance des minéraux ferro-magnésiens altérables. Une troisième station (La Pransière) ne vérifie pas le critère ($\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0 < 1,5\%$) alors qu'elle se situe dans un environnement comparable. Ceci pourrait être attribué à des variations dans la composition de la roche mère. Concernant les stations de Plain des Boeufs et Langenberg, il semble que le facteur limitant réside également dans la roche mère. En effet, les conditions climatiques sont tout à fait favorables (2000 mm/an) mais ces roches sont légèrement plus acides (51,6 à 51,9 % de SiO_2), moins riches en Fe_2O_3 (8,51 %) et en alcalino-terreux (en particulier pour Plain des Boeufs : $\text{MgO} = 3,91\%$ et $\text{CaO} = 7,58\%$). Enfin, la station de Neuntelstein présente une expression limitée des propriétés andiques ($\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0 = 1,18\%$) en raison d'une exposition défavorable (O-SO) induisant de plus faibles précipitations (1500 mm/an). De plus, sa roche mère, comparable à la diorite mésocrate pour les teneurs en alcalins et alcalino-terreux, est moins riche en Fe_2O_3 (10,58 %) et de chimisme intermédiaire ($\text{SiO}_2 = 52,3\%$).

Ainsi, ces quelques exemples nous permettent-ils d'évaluer l'influence des facteurs roche mère et climat sur le développement du processus d'andosolisation dans cet environnement de moyenne montagne qu'est le Massif Vosgien.

Le facteur roche mère joue notamment par la composition chimique des roches. Nous avons vu que l'andosolisation se manifestait préférentiellement sur des roches de chimisme basique, voire intermédiaire. Ces roches présentent de fortes teneurs en Fe_2O_3 et en alcalino-terreux. Il est plus difficile d'apprécier l'influence de la teneur en Al_2O_3 et en alcalins. Pour être propices à la manifestation de propriétés andiques, les roches doivent disposer de teneurs en Al et Fe suffisantes pour conduire aux valeurs de $\text{Al}_0 + 1/2\text{Fe}_0$ requises. Mais ces réserves doivent de plus être accessibles aux agents d'altération. De ce fait, la nature des assemblages minéralogiques de la roche est primordiale et c'est une composante majeure de l'altérabilité de la roche. Les roches mères des sols étudiés ici présentent une abondance de minéraux altérables (olivine, pyroxène, biotite, plagioclases calciques) et une texture moyennement ou finement grenue pour les roches cristallines, microlitique pour les roches volcaniques. Nous avons vu dans la première partie de cette étude que l'andosolisation se rencontrait de préférence sur des matériaux pyroclastiques récents, riches en verres volcaniques. Or, nos roches mères sont très anciennes, dures et compactes, et ne contiennent que peu, ou plus de verres et ceci n'est que partiellement compensé par leur richesse en minéraux altérables et leur texture finement cristallisée.

Le facteur climatique intervient par le maintien d'une forte humidité. Ici, on retrouve cette condition aux plus hautes altitudes et aux expositions O-NO, où les précipitations sont plus importantes et où les sols sont moins soumis à la dessiccation. A de plus faibles altitudes ou aux expositions S-SE, les températures remontent et les précipitations diminuent provoquant un assèchement plus important. Enfin, le versant alsacien, plus doux et moins arrosé que le versant lorrain, est également moins favorable. Ce facteur climatique (humidité constante et importante) joue sur les composés minéraux et sur les composés organiques. Nous avons vu dans la première partie de ce mémoire que les Andosols se rencontraient préférentiellement dans des régions humides. En effet, des périodes sèches prolongées provoquent une évolution de la phase minérale "amorphe" vers des composés plus cristallisés. On passe ainsi d'Andosols à allophanes à des sols andiques, sols bruns, sols ferrallitiques où les allophanes disparaissent et où se développent des halloysites, kaolinites, smectites... Les fortes pluviométries, associées à des conditions de drainage suffisant, favorisent l'évacuation de la silice et la formation de composés allophaniques. Le climat intervient également sur l'évolution des matières organiques. Cet environnement climatique froid et humide des Vosges ralentit l'activité biologique et la décomposition des litières et favorise la formation de composés organiques qui se fixent aux éléments métalliques sous forme de complexes organo-métalliques. Ces complexes, dans le cas d'Andosols non allophaniques, sont responsables, nous l'avons vu, des propriétés andiques de ces sols. Ces composés organiques, fixés aux éléments métalliques, bloquent ainsi la cristallisation des phases "amorphes" et inhibent de ce fait les néoformations d'argiles.

Enfin, nous pouvons aborder le facteur temps - durée de la pédogenèse. En climat tempéré, les sols atteignent leur degré d'andosolisation maximum en 4 à 5000 ans (HETIER, 1975). Ces Andosols sont stables tant que les conditions du milieu n'évoluent pas, et ce pendant quelques millénaires tout au plus (MOINEREAU, 1977). Pour HETIER (1975), cette période de stabilité ne dépasse guère 2 à 3000 ans. Les Andosols peuvent alors évoluer vers la brunification par diminution du stock organique et argilisation, correspondant à une "désandosolisation" (MOINEREAU, 1977). Ils peuvent également présenter une tendance podzolique sur des roches plus acides, dures et anciennes. Dans le Massif Vosgien, ce facteur temps semble avoir une grande influence sur la pédogenèse. D'une part, nous avons vu que nos roches mères, en raison de leur ancienneté, ne contiennent très probablement plus de verres, matériel favorable à l'andosolisation car s'altérant très rapidement. D'autre part, la pédogenèse débute, dans les Vosges, après la dernière glaciation du Würm, c'est-à-dire il y a environ 10000 ans. Par rapport à la durée de l'andosolisation sur pyroclastes, cette période est assez longue et les Andosols formés durant ce laps de temps pourraient avoir perdu leurs caractères andiques et seuls les sols situés dans les conditions environnementales les plus favorables auraient conservé ces caractères. Par contre, cette période peut être considérée comme courte si on tient compte de la nature de nos roches mères moins favorable à une altération rapide par rapport à un matériel pyroclastique, cendreux, ou riche en verres. Nos roches, dures et compactes, anciennes et dévitrifiées, s'altèrent beaucoup moins facilement et donc moins rapidement que les précédentes. Les caractères andiques faiblement exprimés de nos Andosols seraient ainsi liés à l'altération plus lente et plus faible des roches mères par rapport à des matériaux plus favorables.

Les autres facteurs (topographie et végétation) ne semblent pas exercer ici une influence essentielle. Tout au plus le choix de sites localisés dans les hauts de versants pour éviter remaniements et colluvionnement conduit à des profils un peu plus acidifiés. On peut rappeler l'effet du colluvionnement favorisant une évolution vers la brunification dans les Vosges et celui d'un drainage insuffisant permettant la formation d'argiles (cf. 1^o partie).

Ainsi, des propriétés andiques peuvent se manifester, à divers degrés, dans le Massif Vosgien, lorsque les conditions sont favorables : roches basiques et fortes précipitations. Ce processus s'exprime pleinement lorsqu'on rencontre conjointement les roches les plus basiques ($\text{SiO}_2 \leq 51\%$), riches en minéraux altérables et finement cristallisées, associées à des conditions fortement humides (généralement $> 1800 \text{ mm/an}$) sans longues périodes sèches, correspondant à des expositions O ou NO à de fortes altitudes ($\geq 900 \text{ m}$). Ces conditions sont favorables à une altération rapide de la roche qui libère massivement des éléments métalliques (Al et Fe). Ces derniers fixent les substances organiques pour former les associations organo-métalliques responsables de leurs propriétés andiques. Les facteurs limitants sont un environnement moins humide avec des périodes sèches (expositions S ou SE, faibles altitudes) ou des roches plus acides (de chimisme acide voire intermédiaire). Les sols présentent alors une tendance vers la brunification ou la podzolisation.

A ce stade, nous pouvons nous interroger sur l'adéquation des critères de définition des Andosols à ce milieu vosgien. Rappelons ici que ces critères ont été définis assez tôt dans l'élaboration de la classification et les limites alors proposées ont été sensiblement conservées dans les classifications actuelles. A cette époque, le concept central de la définition des Andosols reposait sur leur développement à partir de matériaux volcaniques finement divisés (cendres, pyroclastes) et sur la présence, en leur sein, de composés "amorphes" ou vitreux. Les Andosols non allophaniques ou dérivés de matériaux non volcaniques n'étaient pas pris en compte dans cette définition. Si de tels sols ont par la suite été reconnus dans les classifications, notamment dans le WRB (SPAARGAREN, 1994) ou le RP (AFES, 1995) par l'intermédiaire d'un horizon alu-andique où les complexes Al-composés organiques dominent sur les composés allophaniques, les valeurs limites permettant leur accès dans l'ordre des Andosols sont restées quasiment inchangées ($Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0 \%$; $Da \leq 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$; $Rét.P \geq 85 \%$). On peut à ce sujet constater la très grande rigidité imposée par la plupart des systèmes de classification à ces limites, par exemple au niveau de la décimale de la somme $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0 \%$ dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), la FAO (DRIESSEN & DUDAL, 1991) et la version révisée du WRB (SHOJI *et al.*, 1996), alors que dans le RP (AFES, 1995) seule l'unité est considérée ($Al_0 + 1/2Fe_0 > 2 \%$).

Lors de l'inventaire réalisé sur le terrain pour la sélection des profils, un certain nombre de sols présentaient des morphologies en tout point comparables à celle des Andosols. Si certains de ces sols ont trouvé confirmation de leur appartenance aux Andosols par les méthodes analytiques (Belfahy, Saint-Antoine, Château-Lambert et Gsang), d'autres en ont été exclus. C'est le cas des stations de Ménard, Langenberg et Champ du Feu, dont la morphologie présentait pourtant les caractères communs aux Andosols (structure microagrégée, floconneuse, sol friable, très léger, meuble et poreux). Tous ces sols sont caractérisés par une $Da \leq 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ mais la valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ n'est pas suffisamment élevée pour dépasser 2,0 % dans les deux niveaux de prélèvement. On peut d'ailleurs observer que, bien que les systèmes de classification imposent une épaisseur et une profondeur minimales pour la reconnaissance de propriétés andiques, elles ne donnent aucune indication quant à la méthode d'échantillonnage. Ainsi, nous avons considéré qu'un sol répond aux critères si les valeurs limites sont atteintes en même temps dans les deux niveaux de prélèvement. Si nous nous étions limités à la moyenne calculée à partir de ces deux niveaux, les stations de Ménard et Champ du Feu auraient pu remplir la condition $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0 \%$. Par contre, quelle que soit la méthode utilisée, les trois stations présentent des $Rét.P < 85 \%$. Ces $Rét.P$ sont toutefois $> 70 \%$, valeur limite requise dans la dernière révision des critères andiques du WRB (SHOJI *et al.*, 1996). Ainsi, ces profils, qui de toute évidence pourraient appartenir aux Andosols, soulignent les difficultés voire les limites dans l'utilisation stricte de paramètres chiffrés définis par convention et valables universellement.

CONCLUSIONS

La deuxième partie de cette étude avait notamment pour objet l'élargissement et la confirmation des travaux de ZIDA (1994) : il existe bien, dans le Massif Vosgien, des sols présentant des propriétés andiques suffisamment exprimées ($Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0 \%$, $Da \leq 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ et $Rét.P \geq 85 \%$) pour répondre aux nouveaux critères de définition des Andosols dans les divers systèmes de classification. Ces Andosols sont de type non allophanique et en offrent les caractères généraux : prédominance de complexes Al,Fe - matière organique sur les composés allophaniques, minéraux de type chlorite, vermiculite et interstratifiés C-V dans la fraction argileuse. Ils présentent en outre les propriétés suivantes :

- des humus de type mull à moder, des couleurs sombres sur une grande profondeur, éventuellement la présence d'un horizon (B) plus jaunâtre, une structure grumeleuse, microagrégée et une texture argilo-limoneuse en surface à sablo-limoneuse en profondeur.

- de fortes teneurs en matière organique de type fulvique, sur une grande épaisseur, et des rapports C/N élevés.

- une réaction assez acide, une prédominance de l'Al sur le complexe d'échange, un faible taux de saturation en bases et un caractère alique.

Ces Andosols se rencontrent aux plus hautes altitudes, exposés à O-NO, dans des conditions fortement et constamment humides. Leurs roches mères sont riches en minéraux altérables, offrent une texture microlitique ou microgrenue et font partie des plus basiques. La conjonction de ces deux facteurs est favorable au développement du processus d'andosolisation car elle permet une altération rapide du matériau parental et une libération massive d'éléments métalliques. Comme l'avaient montré GARCIA-RODEJA *et al.* (1987), l'andosolisation peut se manifester sur des roches entièrement cristallisées à condition qu'elles soient suffisamment riches en minéraux altérables. C'est le cas de notre station de Château-Lambert, sur une diorite mésocrate à pyroxène, qui présente d'ailleurs les propriétés andiques les mieux affirmées.

Notons également que ces Andosols des Vosges sont caractérisés par une expression limitée de leurs propriétés andiques par rapport aux Andosols d'autres régions, même non allophaniques. Ceci pourrait être attribué à la nature de leurs roches mères, certes favorables, mais compactes, dures et anciennes.

Quant aux stations ne vérifiant pas les normes requises, elles présentent cependant des propriétés andiques suffisamment affirmées pour appartenir aux intergrades andiques (probablement des sols bruns andiques). Si le critère de Da est presque toujours respecté, il n'en est pas de même pour les deux autres points de la définition. Les autres caractéristiques de ces sols sont dans l'ensemble comparables aux Andosols des Vosges, excepté leurs faibles teneurs en carbone. Les facteurs limitants sont ici la roche mère, par un chimisme plus acide, et/ou le climat trop peu humide.

L'existence d'Andosols satisfaisant les nouvelles règles de classification de ces sols est ainsi confirmée dans le Massif Vosgien bien que certains Andosols signalés autrefois ne répondent plus à ces nouvelles normes (station de Servaumont étudiée par HETIER, 1968). De plus, quelques profils sont également exclus de l'ordre des Andosols bien qu'ils en présentent les caractéristiques morphologiques et des valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$ très proches de la limite requise. *Ceci suggère que les critères de définition des Andosols actuellement en vigueur, et surtout $Al_0 + 1/2Fe_0$ et Rét.P, sont très stricts et sans doute trop stricts. Dans les situations très proches des limites-seuil, d'autres caractères devraient pouvoir être pris en compte pour affiner le diagnostic (morphologie, humus...).*

Dans le Massif Vosgien, l'andosolisation se manifeste sur les matériaux les plus facilement et rapidement altérables et sous des conditions fortement et constamment humides. Elle est limitée dans les environnements moins humides et présentant des périodes sèches, ou sur des roches moins facilement altérables ou plus acides. La pédogenèse s'oriente alors vers la brunification ou la podzolisation, processus habituels de cette région. Dans la suite de ce mémoire, nous examinerons la place et le fonctionnement des Andosols en comparaison de ceux des sols brunifiés et des sols podzolisés dans ce milieu vosgien.

Troisième partie

***ETUDE COMPARÉE DES
ANDOSOLS ET DES AUTRES SOLS DES VOSGES***

INTRODUCTION

Dans le Massif Vosgien, nous avons ainsi pu mettre en évidence l'existence d'Andosols répondant aux nouvelles normes de définition des différents systèmes de classification. Si ces sols sont assez peu représentés dans cet environnement vosgien, leur originalité pédogénétique est cependant remarquable dans un contexte général de brunification et de podzolisation prévalant dans ce massif de moyenne montagne (SOUCHIER, 1971 ; BONNEAU *et al.*, 1978).

Le but de cette troisième partie sera donc d'examiner les particularités de ces Andosols par rapport aux sols plus habituels des Vosges, les sols de la lignée sols bruns - podzols. Pour cette étape de comparaison, les sols ont été sélectionnés dans un environnement bioclimatique comparable mais sur des roches mères volcaniques différentes. Les conditions climatiques sont ainsi fixées pour centrer l'étude sur l'effet du facteur roche mère. Les propriétés de ces sols sont également confrontées à celles des sols de la série sols bruns - podzols sur roches cristallines (granites) plus typiques des Vosges. Enfin, il nous a paru utile d'examiner la place de ces Andosols vosgiens par rapport à un Andosols choisi comme "étalon" ou "référence", sélectionné sous un climat similaire et développé à partir de matériaux volcaniques récents très favorables au développement de l'andosolisation (scories basaltiques).

Cette étude comparée porte successivement sur les éléments "actifs", l'état du complexe d'échange, les constituants minéraux et organiques. Cette comparaison, essentiellement abordée d'un point de vue statique (propriétés des différents sols), nous permettra d'examiner la place et les particularités de l'Andosolisation dans le Massif Vosgien par rapport aux autres sols de cette région et de déterminer les différences et les analogies existant entre les différents processus de pédogenèse.

CHAPITRE I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

I. INVENTAIRE ET ÉCHANTILLONNAGE

Une nouvelle phase de prospection a été nécessaire préalablement à cette étape de comparaison des Andosols des Vosges aux sols représentatifs des autres processus de pédogenèse de cette région. Lors de la première phase de prospection (cf. 2° partie), nous avons réuni principalement des représentants des Andosols, sols bruns andiques et sols bruns développés à partir de roches volcaniques de chimisme basique à intermédiaire. Pour l'acquisition de sols de la série sols bruns ocreux, sols ocres podzoliques et podzols, nous avons prospecté plus spécialement des roches volcaniques plus acides (SiO_2 de 67,55 à 83,53 %, cf. 1° partie et annexe I) et dans des environnements comparables (végétation forestière, climats humides). Nous avons ainsi sélectionné et échantillonné dans les Vosges méridionales des sols sur tufs kératophyriques (Plancher-les-Mines : stations de Tête de Charborue versants Est et Ouest), brèche du Crémillot (Plancher-les-Mines : Croix du Choléra et Planche des Belles Filles) et kératophyres quartziques (Plancher-les-Mines : Goutte des Saules et Tête de Demesy). Dans les Vosges septentrionales on a prélevé sur des orthokératophyres quartziques (Les Evaux), rhyolite hyperacide (Turquestein : Blanc Rupt), rhyolite "normale" (Turquestein : Malcôte) et tufs pyroclastiques acides (Wisches : Schliffstein).

Enfin, pour l'étape de comparaison des Andosols des Vosges aux Andosols "de référence", se développant à partir de roches plus favorables à l'andosolisation que les roches anciennes, dures et massives des Vosges, nous avons prospecté trois sites déjà connus par des travaux antérieurs :

- dans le Massif Central (station de Puy de Mercoeur) sur scories basaltiques d'âge compris entre 6000 et 4500 ans (HETIER, 1975),
- en Ardèche (stations de Suc de Bauzon et Pub du Volcan) sur des basaltes scoriacés, pouzzolanes et projections bréchiques d'âge quaternaire récent.

Tous les horizons de ces sols ont fait l'objet d'analyses de caractérisation comportant des mesures de pH H_2O et KCl, des dosages de carbone et d'azote, de Al_0 , Fe_0 , Si_0 , Mn_0 et la mesure de la DOEO (à 430 nm). Sur quelques profils (Charborue Ouest, Planche des Belles Filles, Gouttes des Saules, Tête de Demesy, Rossberg, Schliffstein, Blanc Rupt et Mercoeur) des mesures supplémentaires de leurs teneurs en Al_p , Fe_p , Fe_t ont été réalisées. Pour la description de ces méthodes d'analyses, on se reportera au chap. I de la 2° partie de ce mémoire.

II. CHOIX DES STATIONS

Parmi les sites reconnus et sommairement caractérisés, nous avons sélectionné quelques profils qui nous ont paru bien représentatifs des principaux stades de développement des processus de

pédogenèse étudiés. Comme représentant de l'andosolisation sur roche volcanique dans le Massif Vosgien, nous avons conservé le profil de Gsang, sur porphyrite andésitique basique. Il présente en effet les propriétés andiques les mieux exprimées et a déjà fait l'objet d'analyses dans la 2^o partie de ce mémoire. Le profil de Rossberg (sol brun andique), développé à partir de la même roche mère et situé sur le même massif mais à une exposition différente a également été choisi. Nous avons enfin sélectionné un sol brun ocreux sur kéraatophyre (Goutte des Saules), comme intergrade entre la brunification et la podzolisation, et un podzol (Charborue Ouest). Concernant l'Andosol "de référence", nous avons choisi le profil de Mercoeur, présentant des propriétés andiques fortement exprimées. Toutes les données relatives aux autres sols non retenus sont consignées dans les fiches de sols en annexe II. Les caractéristiques environnementales et morphologiques des sols sélectionnés sont reportées dans les fiches de sols des pages suivantes.

III. MÉTHODES D'ÉTUDE

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à compléter les résultats obtenus dans les diverses stations afin de les comparer au profil de Gsang.

A. ANALYSE DES ÉLÉMENTS TOTAUX

L'analyse des éléments totaux a été réalisée sur quelques horizons seulement ainsi que sur les roches mères. Les échantillons (200 mg) finement broyés sont portés à 1100 °C dans un four avec 1 g de métaborate de lithium. Après fusion, la dissolution s'effectue dans une solution nitrique (1 ml HNO₃ 65 % pour 100 ml d'eau). Tous les éléments sont dosés par ICP (Inducted Coupled Plasma), excepté Na et K, dosés par SAA. Les résultats concernant les éléments totaux de la roche mère de la station de Mercoeur ont également été empruntés aux travaux de HETIER (1975). La perte au feu est déterminée par la perte de poids de l'échantillon après calcination à 1000 °C.

B. CARACTÉRISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Nous avons établi une caractérisation globale des différentes fractions organiques des sols en procédant à un fractionnement granulométrique suivi d'une extraction des composés organiques par un réactif alcalin (Fig. 25). Ces fractionnements n'ont été réalisés que sur quelques horizons.

1. Fractionnement physique

Dans un premier temps, les racines sont extraites du sol (< 2 mm) pour éviter les contaminations qu'elles pourraient apporter (très riches en C et d'âge très récent) dans les analyses ultérieures. Pour obtenir une bonne dispersion, 35 g de sol frais < 2 mm et 200 ml d'eau sont agités pendant 2 h avec 5 billes d'agate (Fig. 25).

Profil n° 5 - Podzol : Tête de Charborue versant Ouest

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 932,5 ; y = 316,9

Altitude : 1050 m.

Topographie : 60 m sous sommet.

Pente : Forte.

Exposition : O.

Drainage : Bon.

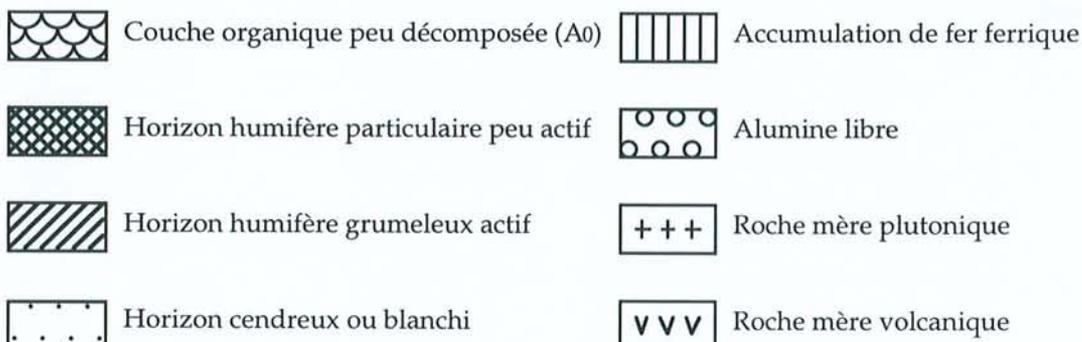
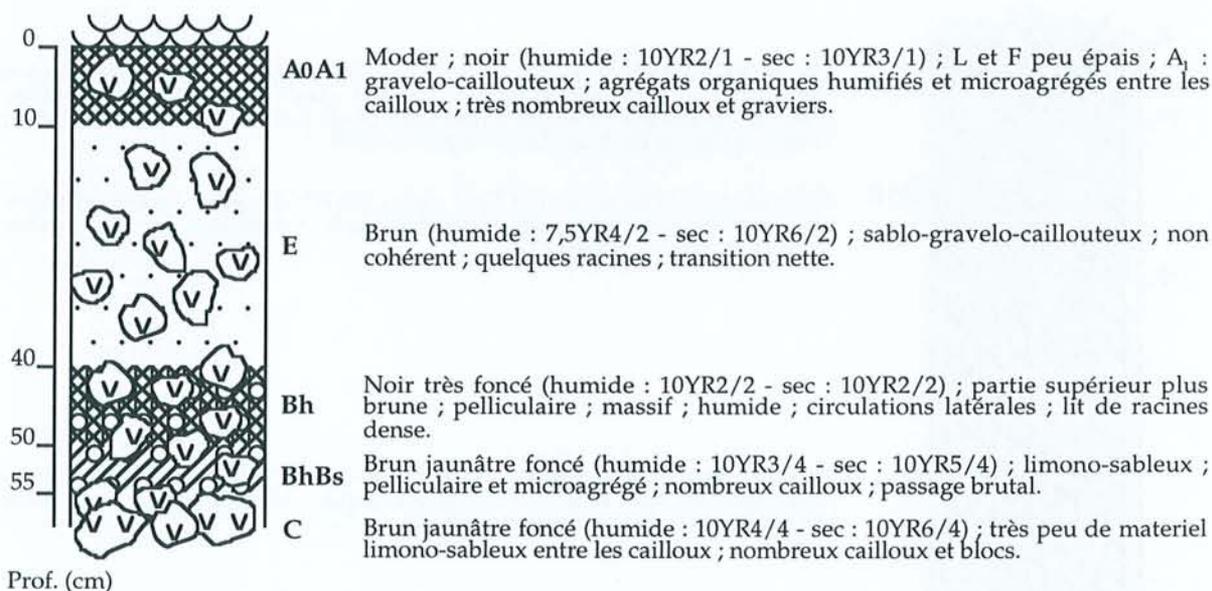
Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1700 mm.

Roche mère : Tufs kératophyriques.

Végétation : Hêtraie, quelques rares sapins ; luzule, quelques canches ; polytric.

Description



Profil n° 9 - Sol brun ocreux : Goutte des Saules

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 932,1 ; y = 319,4

Altitude : 780 m.

Topographie : Replat.

Pente : Moyenne.

Exposition : S.

Drainage : Circulations latérales.

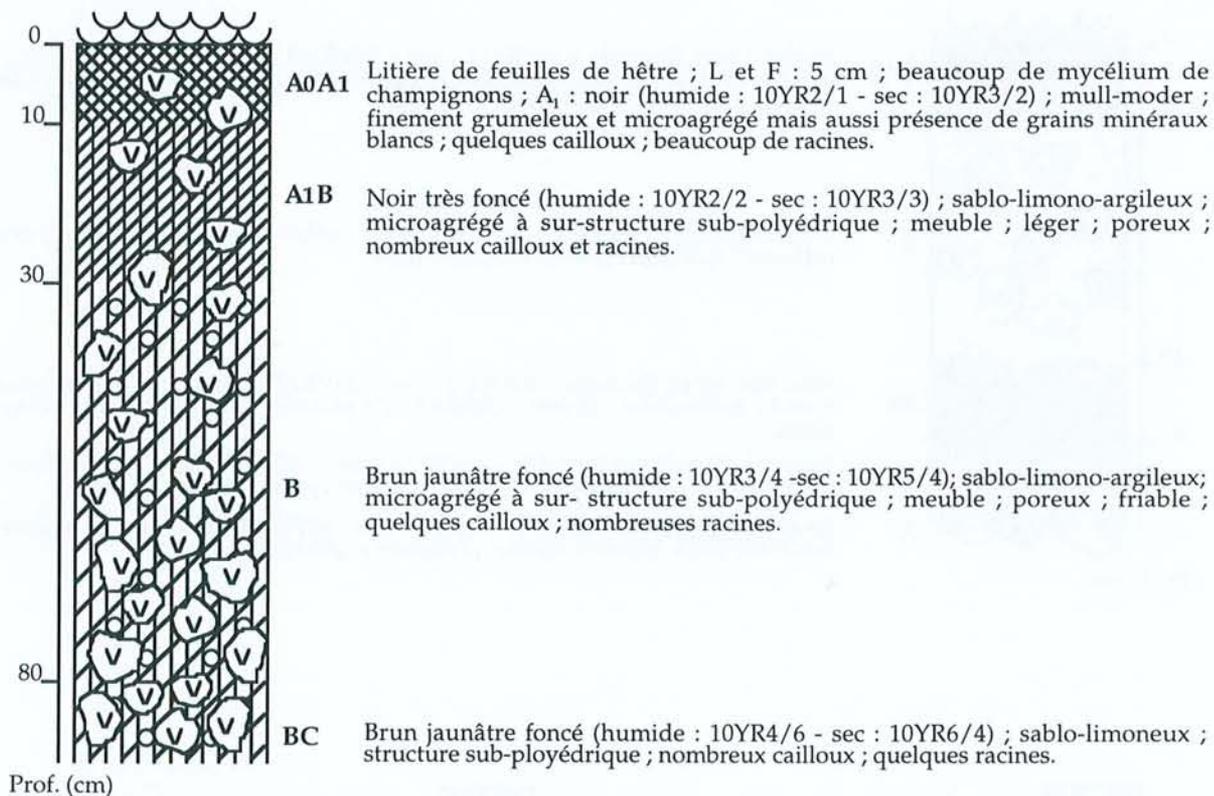
Température (moyenne annuelle) : ~ 7,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Kératophyres quartziques.

Végétation : Hêtraie - sapinière ; myrtille, canche, grande luzule.

Description



Profil n° 18 - Sol brun andique : Rossberg

Localisation : Masevaux 1:25000 - x = 949,2 ; y = 323,3.

Altitude : 1100 m.

Topographie : 20 m sous crête.

Pente : Forte.

Exposition : SO

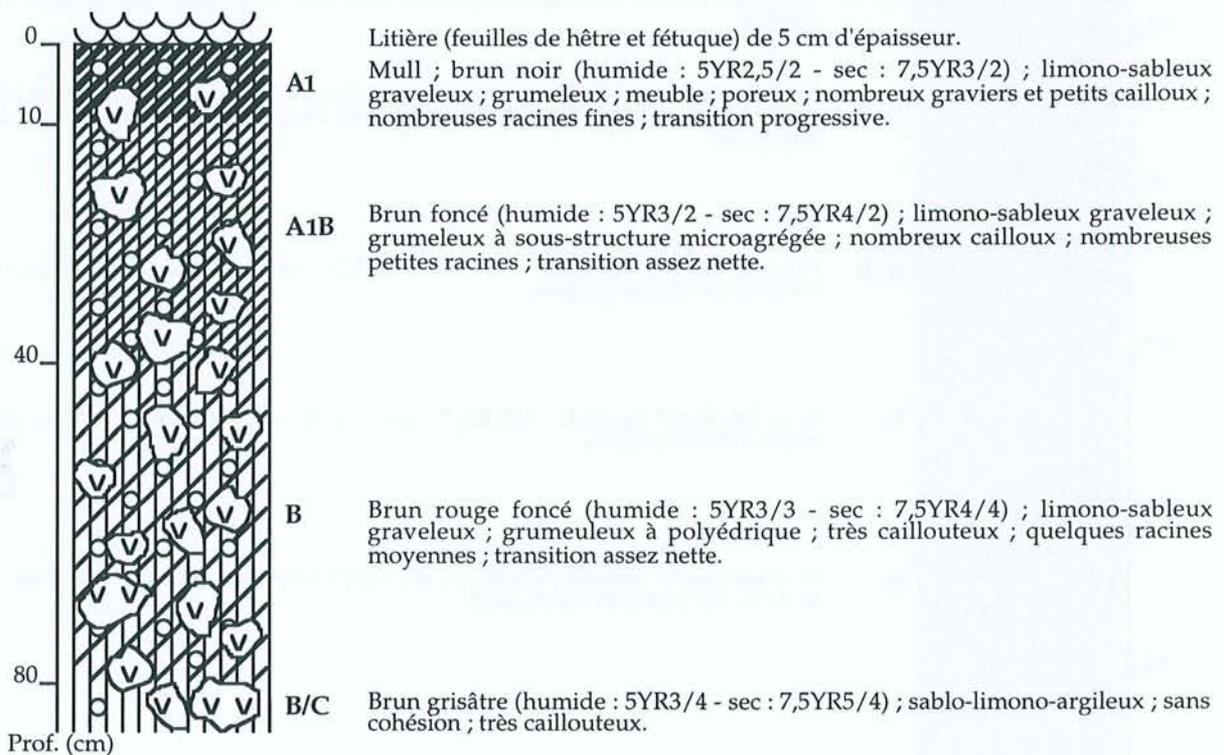
Drainage : Bon.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1800-2000 mm.

Roche mère : Porphyrite andésitique basique.

Végétation : Hêtraie, rares épicéas et très rares sapins ; tapis de fétuque, nombreuses anémones, quelques framboisiers.

Description

Profil n° 32 - Andosol : Puy de Mercoeur (HETIER, 1975)

Localisation : Veyre Monton 1:50000 - N 50G80' ; E 0G64'80".

Altitude : 1150 m.

Topographie : Mi-pente.

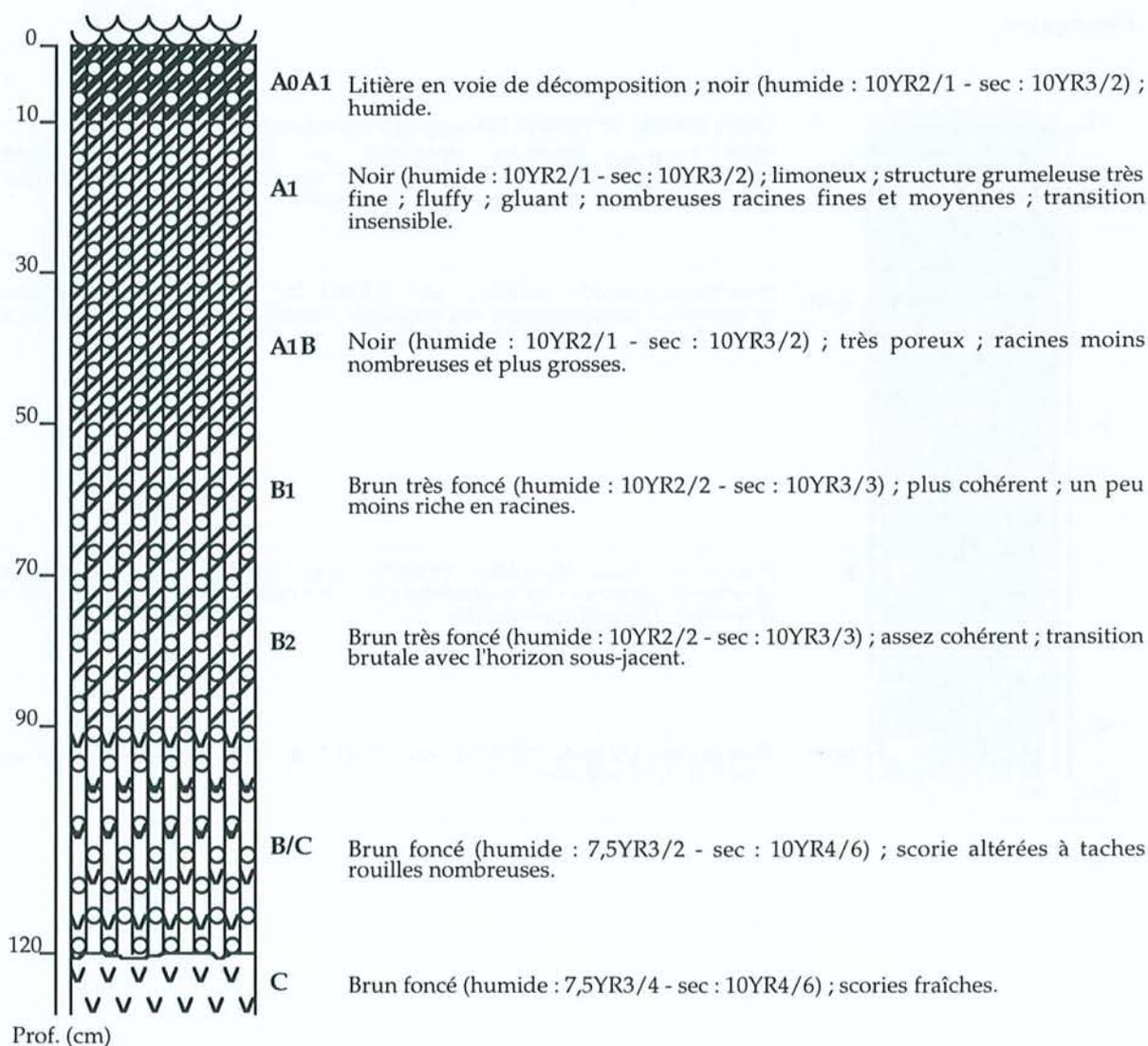
Pente : Faible.

Exposition : NE.

Drainage : Bon.

Roche mère : Scories basaltiques.

Végétation : Hêtraie à flore mésophile et nitratophile.

Description

Le sol est ensuite tamisé à 50 μm sous un faible jet d'eau. La fraction > 50 μm est séchée à l'étuve à 40 °C, pesée et broyée. La fraction < 50 μm est centrifugée 10 min à 3000 tr/min après floculation des argiles. Le culot est séché à l'étuve à 40 °C, pesé et broyé. Sur cette fraction < 50 μm ont ensuite été réalisées des datations au ^{14}C (cf. 4^e partie) et des extractions chimiques des composés organiques.

2. Extraction des composés organiques

La fraction < 50 μm broyée (5 g) est agitée 1 h avec 100 ml de soude NaOH N/10 ou d'un mélange de soude N/10 et de pyrophosphate de sodium $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 1 % (Fig. 25). Cette extraction est répétée jusqu'à épuisement (5 fois). Après centrifugation pendant 15 min à 10000 tr/min, le culot (1) est lavé avec de l'eau puis 100 ml de HCl 0,1 N sont ajoutés pour éviter une carbonatation de l'échantillon. Le surnageant (1) est centrifugé pendant 15 min à 10000 tr/min après floculation des argiles. Le culot (2) obtenu et le culot (1) sont mélangés, lavés à l'eau, séchés à l'étuve à 40 °C, pesés et broyés. Cette fraction renferme l'humine. Le surnageant (2) est constitué de composés alcalino-solubles que l'on sépare chimiquement en abaissant le pH à 2 à l'aide d'HCl 2 N. Après centrifugation pendant 15 min à 10000 tr/min, ces composés se partagent en une fraction insoluble dans le culot (acides humiques) et une fraction soluble dans le surnageant (acides fulviques).

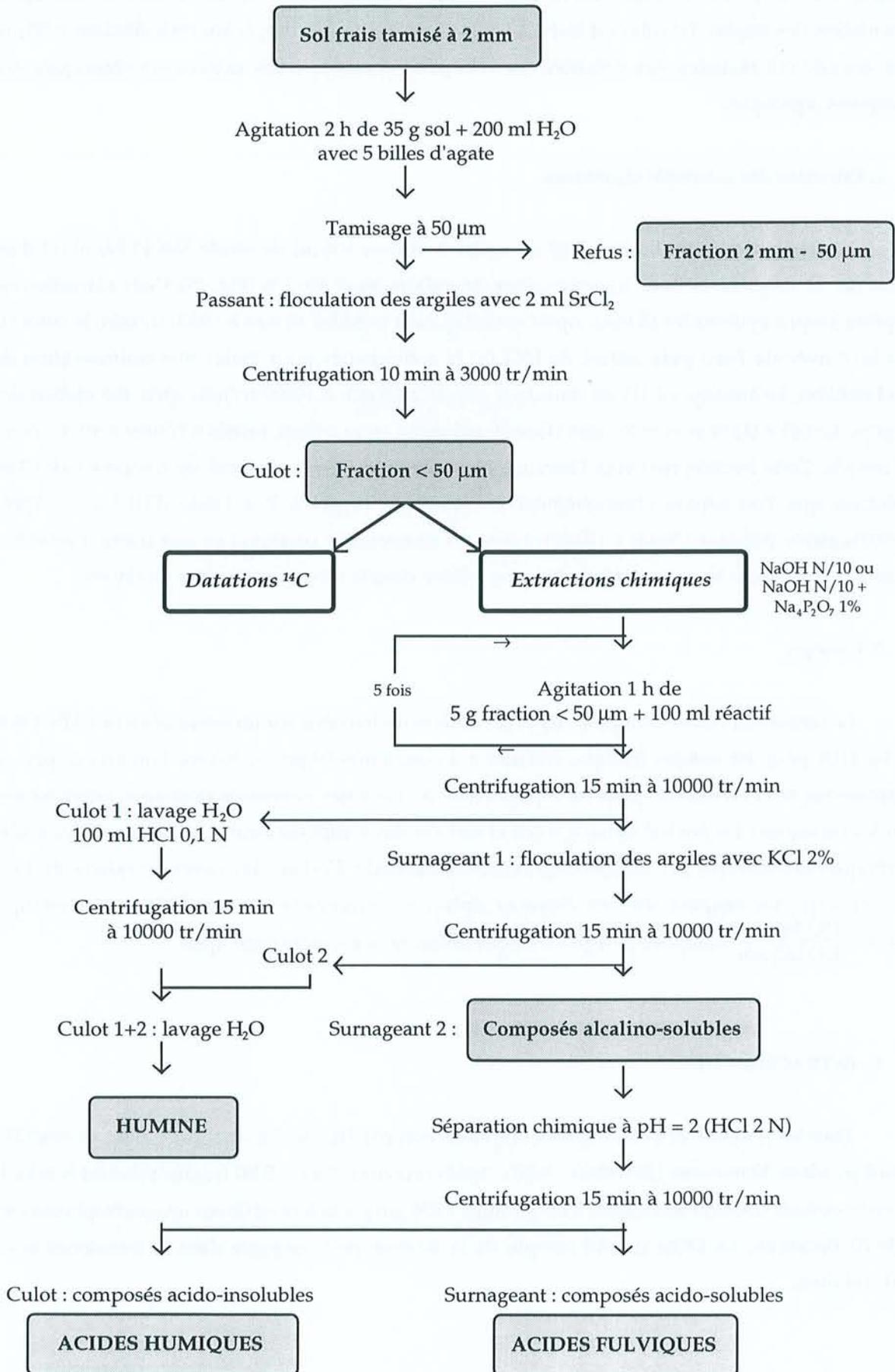
3. Dosages

Le carbone et l'azote sont dosés dans ces différentes fractions sur un autoanalyseur CHN Carlo Erba 1108 pour les solides (racines, fraction < 2 mm, 2 mm-50 μm , < 50 μm , humine) et par un Carmograph 12 (Wösthoff) pour les liquides (eau de tamisage, composés alcalino-solubles totaux, acides fulviques). La densité optique à 465 et 665 nm des composés alcalino-solubles et des acides humiques est mesurée sur un spectrophotomètre Beckman 25 dans des cuves en quartz de 1 cm d'épaisseur. Le rapport de ces densités optiques correspond au coefficient chromatique $Q_{4/6} = \frac{\text{DO } 465 \text{ nm}}{\text{DO } 665 \text{ nm}}$ indiquant le degré de condensation des substances organiques.

C. EXTRACTION HCl

Tous les horizons ont été soumis à une extraction par HCl N (1 g de sol et 100 ml de réactif) à froid pendant 30 minutes (JEANROY, 1983). Après centrifugation à 5000 tr/min pendant 5 min, la densité optique (DO) du surnageant a été mesurée à 430 nm par colorimétrie sur un spectrophotomètre DU-70 Beckman. La DO_{HCl} rend compte de la fraction de C engagée dans la translocation de l'aluminium.

Fig. 25 - Organigramme du fractionnement des matières organiques des sols.



CHAPITRE II - CONSTITUANTS ET PROPRIÉTÉS

Dans ce chapitre, nous allons reprendre les propriétés générales de l'Andosol vosgien et les confronter à celles d'un Andosol de "référence" du Massif Central (Chaîne des Puys) et à celles de sols plus habituels des Vosges, c'est à dire appartenant à la lignée des sols bruns, sols bruns ocreux et podzols. Enfin, plus succinctement, nous mettrons en parallèle la pédogenèse sur roches volcaniques avec celle, plus courante dans les Vosges, s'exerçant sur des roches cristallines en nous appuyant, pour cette dernière, sur des exemples choisis dans la littérature.

I. EXTRACTIONS CHIMIQUES SÉLECTIVES

Les données relatives aux extractions sélectives sont portées dans le Tab. 17 et la Fig. 26 ainsi qu'en annexe III (Tab. III).

A. ANDOSOL DE RÉFÉRENCE (Chaîne des Puys)

Ce profil est caractérisé par de fortes teneurs en Al_0 (2,14 à 6 %) et Fe_0 (2,54 à 3,96 %), légèrement moindres en Si_0 (0,82 à 2,52 %) (Fig. 26). Les valeurs de Al_0 et Fe_0 sont maximales au niveau des horizons A_1B_1 , B_1 et B_2 , et jusqu'en B/C pour Si_0 . Les teneurs en Al_p et Fe_p , après une légère remontée en A_1 , diminuent régulièrement avec la profondeur. Elles sont un peu plus faibles que les valeurs de Al_0 et Fe_0 dans le haut du profil et cette différence s'accroît en profondeur. Ceci se traduit par des rapports Al_p/Al_0 et Fe_p/Fe_0 supérieurs à 0,5 jusqu'à 30 cm de profondeur, puis inférieurs à 0,3 vers le bas du profil. Les valeurs de Fe_t sont très faibles (< 0,04 %) et diminuent avec la profondeur (Tab. 17).

Ces teneurs importantes en Si_0 , associées à de faibles rapports Al_p/Al_0 , témoignent de la présence de composés allophaniques dans ce sol. Les teneurs en allophanes calculées peuvent atteindre ici jusqu'à 16 %. Ceci est en bon accord, nous le verrons, avec la faible acidité de ce sol ($pH_{H_2O} > 5$). Le profil présente également de fortes valeurs de Al_0 et Fe_0 se traduisant par une somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ très élevée dans l'ensemble du profil (de 3,4 à 8 %).

Ce sol répond donc pleinement au critère $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2\%$ requis dans la définition des Andosols dans les divers systèmes de classification. Les rapports atomiques C/Al_p varient de 10,5 à 13,8 (à l'exclusion de l'horizon de surface) et sont tout à fait dans la gamme de ceux reportés par NANZYO *et al.* (1993a) à partir de la banque de données "T.U. Andisols". Enfin, ce sol ne semble pas être affecté de translocations d'éléments métalliques comme le montre par exemple la diminution régulière de très petites quantités de Fe_t en profondeur.

Tab. 17 - Quelques données des extractions sélectives des sols sur roche volcanique.

	Horiz.	Prof. (cm)	Fe _t	Al _o + 1/2Fe _o (%)	Allophanes	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o	C/Al _p *
Andosol vosgien	A ₀ A ₁	0-10	0,12	1,64	-	0,8	0,8	50,2
	A ₁ B ₁	10-30	0,09	2,07	1,4	0,8	0,7	21,9
	A ₁ B ₂	30-50	0,04	2,41	1,6	0,8	0,7	16,1
	A ₁ B ₃	50-70	0,04	2,73	2,3	0,7	0,7	13,2
	B	70-100		2,49	6,8	0,3	0,2	13,3
	BC	100-130		1,64	4,0	0,3	0,3	9,1
	C	130-150		0,73	1,4	0,4	0,3	5,2
Andosol Chaîne des Puys	A ₀ A ₁	0-10	0,04	4,73	4,9	0,7	0,6	23,5
	A ₁	10-30	0,02	6,70	10,1	0,5	0,5	13,0
	A ₁ B ₁	30-50	0,01	7,98	15,4	0,3	0,3	12,1
	B ₁	50-70	0,01	7,88	16,0	0,2	0,2	13,1
	B ₂	70-90	0,01	7,48	16,0	0,2	0,2	13,8
	B/C	90-120	0,00	4,64	12,6	0,1	0,0	10,5
	C	> 120		3,41				
Sol brun andique	A ₁	0-10	0,08	1,08				
	A ₁ B	10-40	0,09	1,17	-	1,1	0,8	20,2
	B	40-80	0,04	1,37	0,6	0,9	0,8	10,2
	B/C	> 80	0,02	0,79				
Sol brun ocreux	A ₀ A ₁	0-10	0,36	0,74	-	0,8	1,2	144,7
	A ₁ B	10-30	0,53	1,57	-	0,7	1,0	56,8
	B	30-80	0,17	1,54	-	0,8	1,0	18,5
	BC	> 80	0,06	1,76	1,6	0,7	0,7	13,5
Podzol	A ₀ A ₁	0-10	0,01	0,08	-	1,2	0,8	420,4
	E	10-40	0,02	0,09	-	0,8	0,8	102,4
	Bh	40-50	0,25	2,70	-	1,1	1,0	20,2
	BhBs	50-55	0,04	3,92	6,6	0,6	0,7	8,6
	C	> 55	0,01	0,96	2,0	0,4	0,3	7,6

* rapport atomique

Tab. 18 - Quelques données des extractions sélectives des sols sur roche cristalline (d'après JEANROY, 1983).

	Horiz.	Prof. (cm)	Fe _t	Al _o + 1/2Fe _o (%)	Allophanes	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o	C/Al _p *	C _p /Al _p +Fe _p *
Sol brun mésotrophe	A ₁	0-10	0,01	0,29	0,2	0,7	0,4	69,4	12,0
	(B ₁)	10-40	0,01	0,37	-	0,5	0,4	9,4	3,3
	(B ₂)	40-100	0,00	0,31	-	0,5	0,3	5,6	2,9
	C	> 100	0,00	0,09	0,1	0,6	0,4	7,5	5,4
Sol brun ocreux	A ₁₁	0-5	0,36	0,71	0,2	0,8	0,9	147,9	17,1
	A ₁₂	5-10	0,19	0,95	0,3	0,8	0,8	26,0	6,0
	(B ₁)	10-30	0,13	0,99	0,2	0,9	0,7	17,5	4,5
	(B ₂)	30-60	0,05	1,05	0,5	0,9	0,7	6,5	2,6
	(B ₃)	60-95	0,02	0,90	0,4	0,8	0,7	4,1	2,0
	(B)/C	> 95	0,02	0,79	0,4	0,8	0,6	3,9	1,6
Sol ocre podzolique	A ₁	0-10	0,23	0,42	0,1	1,0	1,0	184,1	24,0
	Bh	10-20	0,51	0,74	0,1	0,9	1,0	54,4	8,5
	BFe	20-45	0,12	1,06	-	1,0	1,0	18,3	2,8
	Bs	45-90	0,05	1,09	1,1	0,7	0,7	6,7	4,0
	C	> 90	0,01	0,51	0,7	0,6	0,6	6,1	3,9
Podzol humo- ferrugineux	A ₁	0-15	0,01	0,07	-	1,2	1,0	205,7	36,7
	E	15-52	0,01	0,07	-	1,1	1,0	41,5	12,1
	Bh	52-57	0,41	1,26	-	1,0	1,0	15,2	7,8
	Bs	57-80	0,14	1,89	1,3	0,8	0,9	10,3	6,1
	C	> 80	0,01	0,19	0,2	0,8	0,9	5,2	4,4

* rapport atomique

Ainsi, ce profil que nous avons choisi comme "référence", montre bien la très forte accumulation, caractéristique des Andosols, d'éléments "actifs" (engagés ici dans la structure de composés allophaniques) sur une grande épaisseur et ce, sans redistributions. Notre Andosol vosgien présente dans l'ensemble les mêmes caractères mais atténués et s'en démarque par sa nature non allophanique (prédominance d'associations organo-métalliques). Ceci souligne une fois encore le caractère quelque peu limite de ces Andosols des Vosges.

B. SOLS DU MASSIF VOSGIEN

1. Sur roches volcaniques

a. Sol brun andique

Ce profil présente des teneurs plus faibles en Al_O et Fe_O (0,62 à 0,98 % et 0,34 à 0,86 % respectivement) et plus encore en Si_O (< 0,11 %) (Fig. 26). La distribution de ces éléments ne montre pas de fortes variations avec la profondeur. Les teneurs en Al_P et Fe_P sont voisines de celles en Al_O et Fe_O , résultant en des rapports Al_P/Al_O et Fe_P/Fe_O proches de 1 ($\geq 0,8$). Le Fe_t est présent en très faibles quantités et diminue en profondeur (Tab. 17). Ce profil est caractérisé par de trop faibles valeurs de la somme $Al_O + 1/2Fe_O$ pour être rattaché aux Andosols. Ces valeurs sont cependant suffisamment élevées (> 1,0 %) pour que ce profil puisse répondre à la définition du sous-groupe andique de l'Ordre des Inceptisols dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994) (cf. 2^o partie), il appartient ainsi à la lignée des sols bruns andiques. La teneur en allophanes est ici très faible (0,6 %) et le sol est dominé par des complexes organo-métalliques (Al_P/Al_O et $Fe_P/Fe_O \sim 1$). La diminution régulière de Fe_t en profondeur suggère que ces composés ne présentent pas de redistributions dans le profil. Cette répartition rappelle, en très atténué, celle que l'on observe dans les profils de l'Andosol vosgien et de l'Andosol de référence de la Chaîne des Puys.

b. Sol brun ocreux

Les teneurs en Al_O sont ici également faibles (0,39 à 1,08 %) ainsi que celles en Si_O (< 0,10 %). Par contre, les teneurs en Fe_O sont un peu plus élevées (0,7 à 1,82 %) (Fig. 26). Les valeurs de Al_P et Fe_P sont assez proches de celles de Al_O et Fe_O , ceci se traduisant par des rapports Al_P/Al_O et Fe_P/Fe_O voisins de 1 ($\geq 0,7$). Les teneurs en Fe_t sont un peu plus élevées que précédemment (0,06 à 0,53 %) et, après être passées par un maximum en A_1B , diminuent en profondeur (Tab. 17). Les valeurs de Fe_O et Fe_P montrent la même répartition avec la profondeur. Par contre, la distribution de Al_O et Al_P présente une augmentation vers le bas du profil.

Ce profil montre ainsi des teneurs en Fe_O et Fe_P plus élevées que précédemment (sol brun andique). Les rapports Fe_P/Fe_O proches de 1 indiquent une prédominance de complexes organo-ferriques qui sont affectés d'une certaine redistribution au sein du profil (Fe_t maximum en A_1B). Le

haut de ce profil semble donc être soumis à des phénomènes de migrations. En revanche, la distribution de Al est un peu plus surprenante car il augmente en profondeur et atteint même des valeurs de $Al_0 > 1\%$ en BC. Ceci pourrait être relié à la position topographique de ce sol. En effet, la station est proche du sommet mais située sur une pente et il est probable que des transferts d'éléments aient lieu depuis le sommet vers le bas de ce profil. Parallèlement, la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ augmente plus ou moins régulièrement en profondeur et elle est supérieure à 1 % sur une épaisseur suffisante pour que ce sol réponde à la définition du sous-groupe andique. Toutefois, ces valeurs de $Al_0 + 1/2Fe_0$ sont au moins deux fois plus importantes en A₁B, B et BC que dans l'horizon sus-jacent A₀A₁. Ceci fait partie des critères imposés par la Soil Taxonomy, le WRB et le RP (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994 ; AFES, 1995) dans la définition des horizons spodiques. L'horizon A₁B vérifie par ailleurs les autres points de la définition des horizons spodiques dans ces classifications (valeurs de pH, couleurs, épaisseur, profondeur *etc.*). Ce profil serait ainsi affecté par un processus de podzolisation mais ici peu accentué, correspondant au stade sol brun ocreux. Rappelons d'ailleurs que, dans la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), les exigences concernant la définition des sous-groupes andiques sont différentes dans l'Ordre des Spodosols par rapport aux autres ordres. Dans les ordres autre que les Spodosols, les sous-groupes andiques doivent présenter des propriétés andiques définies par une $Da \leq 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ et $Al_0 + 1/2Fe_0 > 1,0\%$ sur une épaisseur minimale de 18 cm dans les 75 cm supérieurs du sol minéral. Dans l'Ordre des Spodosols, le sous-groupe andique doit présenter des propriétés andiques sur une épaisseur minimale de 25 cm dans les 75 cm supérieurs du sol minéral. Mais à ce niveau, ces propriétés andiques doivent être équivalentes à celles requises dans l'Ordre des Andisols, soit $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0\%$, $Da \leq 0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ et $Rét.P \geq 85\%$, ce qui n'est pas vérifié dans ce profil.

c. Podzol

Les teneurs en Al_0 et Si_0 , assez faibles en surface (0,06 et $< 0,05\%$ respectivement), présentent un maximum en BhBs (3,8 et 0,66 % respectivement) puis diminuent en profondeur. Les teneurs en Fe_0 suivent la même distribution mais passent par un maximum en Bh (1,32 %) (Fig. 26). Les valeurs de Al_p et Fe_p montrent dans l'ensemble la même répartition que celles de Al_0 et Fe_0 et les rapports Al_p/Al_0 et Fe_p/Fe_0 sont proches de 1 excepté dans l'horizon de profondeur ($< 0,5$). Les teneurs en Fe_t sont peu élevées et passent par un maximum en Bh (0,25 %) (Tab. 17).

Ce profil est marqué par une redistribution nette de Al et Fe qui s'accumulent en BhBs ou en Bh. Les complexes organo-métalliques dominant ici également et sont soumis à des migrations au sein du profil (Fe_t maximum en Bh). De ce fait, les horizons Bh et BhBs présentent une somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ au moins deux fois plus importante que les horizons sus-jacents A₀A₁ et E, vérifiant ainsi une partie de la définition des horizons spodiques de la Soil Taxonomy, du WRB et du RP (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994 ; AFES, 1995). Les autres critères de définition des matériaux spodiques sont également vérifiés pour l'horizon Bh. Ce profil est donc soumis à un processus de podzolisation.

Fig. 26 - Distribution de Al, Fe et Si extraits par l'oxalate dans les sols sur roche volcanique.

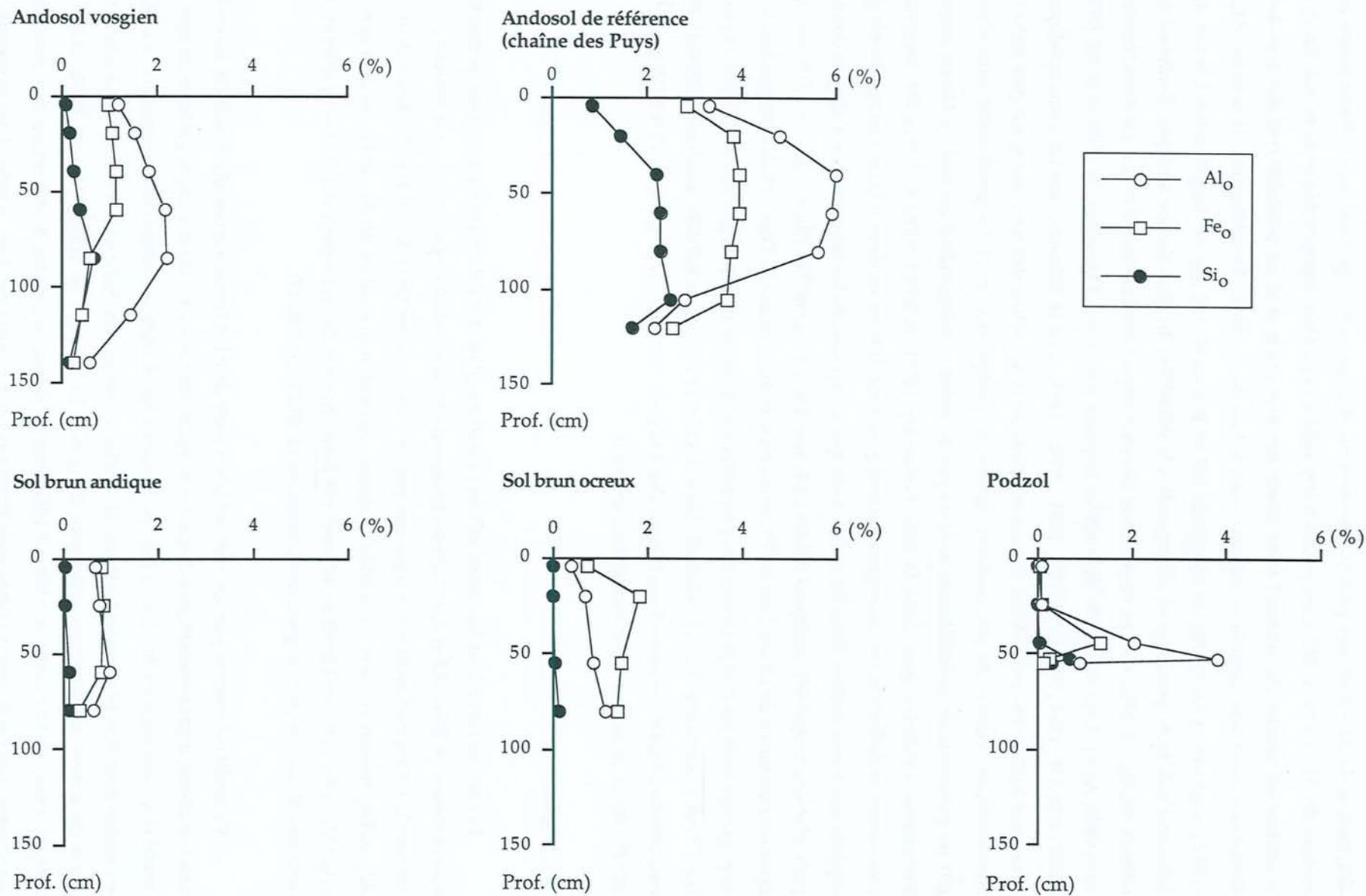
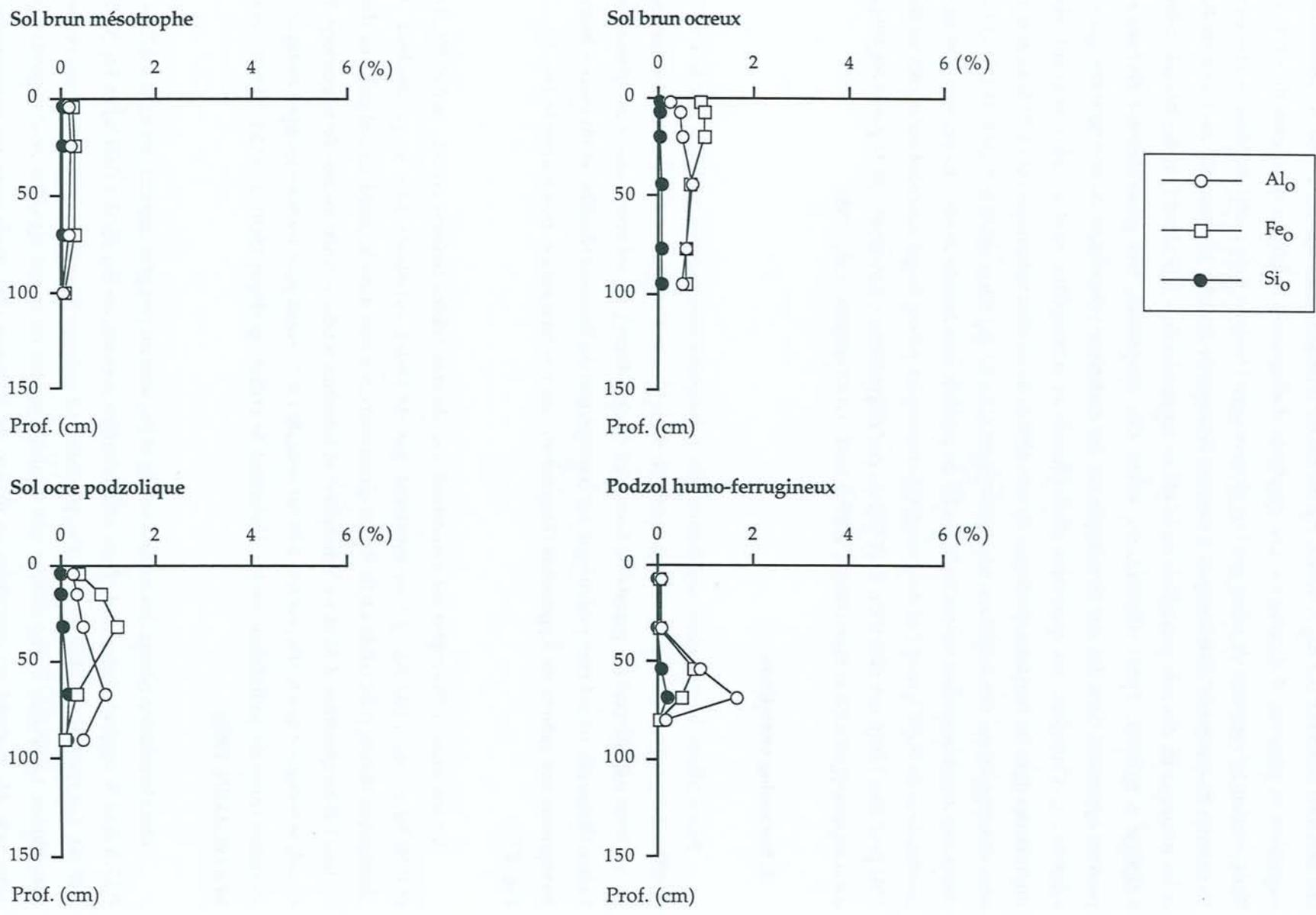


Fig. 27 - Distribution de Al, Fe et Si dans l'extrait oxalate des sols sur granite (d'après JEANROY, 1983).



Les rapports C/Al_p sont très élevés dans les horizons de surface (A_0A_1 : 420,4 ; E : 102,4) et plus faibles dans les horizons spodiques (Bh : 20,2 ; BhBs : 8,6) (Tab. 17). MOKMA & BUURMAN (1982) considèrent que ce rapport peut être utilisé pour séparer les horizons éluviaux ($C/Al_p > 40-45$) des horizons illuviaux ($C/Al_p < 40-45$). Au niveau de l'horizon BhBs, les teneurs en Si_O remontent, suggérant la présence d'allophanes. Les quantités d'allophanes calculées sont ainsi de 6,6 % en BhBs, valeurs très proches de celles que l'on observe dans l'horizon B du profil de l'Andosol vosgien. L'existence de composés allophaniques a souvent été reportée dans les horizons (B) des sols brunifiés et les horizons Bs des sols podzolisés où le pH se rapproche de ~ 5 (PARFITT, 1986 ; WADA, 1989 ; FARMER & RUSSEL, 1990 ; HERBILLON, 1994). Ces allophanes, très généralement alumineux, peuvent apparaître dans des sols développés sur des matériaux volcaniques ou non (granites, gneiss, schistes...). Toutefois, les quantités d'allophanes et d'imogolite sont le plus souvent plus importantes dans les horizons spodiques de sols dérivés de cendres volcaniques (41 à 70 ‰) que dans ceux développés sur des matériaux non volcaniques (13 à 42 ‰) selon SHOJI & YAMADA (1991). Ces composés allophaniques dans les horizons Bs de podzols sont formés *in situ* ; ils proviennent de la combinaison de H_4SiO_4 avec l'Al des complexes organiques qui ont migré et se sont accumulés en Bhs. L'Al peut être libéré par altération (H_2CO_3) ou par dégradation microbienne de la partie organique du complexe (UGOLINI & DAHLGREN, 1987 et 1991 ; GUSTAFSSON *et al.*, 1995).

2. Sur roches cristallines

Nous allons ici examiner rapidement les principales observations réalisées par JEANROY (1983) sur des sols de la série sols bruns - podzols dans le massif vosgien et plus particulièrement sur un sol brun mésotrophe sur granite de Gunsbach (Hohrodberg), un sol brun ocreux sur granite des Crêtes (Robinot), un sol ocre podzolique sur leucogranite du Bramont (Rudlin) et un podzol humo-ferrugineux sur granite de Kagnenfels (Kligenthal). Ses résultats sont exposés dans le Tab. 18 et la Fig. 27.

Le sol brun mésotrophe est caractérisé par de très faibles teneurs en Al_O ($\leq 0,22$ %), Fe_O ($\leq 0,30$ %) et Si_O (0,02 %), qui ne montrent pas de fortes variations avec la profondeur. La distribution du Fe_t (très faible $\leq 0,01$ %) est quasiment constante dans le profil. Ce sol présente donc de très faibles quantités d'Al et Fe "amorphes" et l'absence totale de phénomènes de migrations. De ce fait, la somme $Al_O + 1/2Fe_O$ est très loin du seuil de 1,0 % requis pour les sous-groupes andiques et sa distribution en profondeur exclut également le critère spodique (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994).

Dans le sol brun ocreux, les teneurs en Al_O et Fe_O sont un peu plus importantes (0,26 à 0,72 % et 0,57 à 0,98 % respectivement) et, dans une moindre mesure, en Si_O (0,03 à 0,08 %) et Fe_t (0,02 à 0,36 %). Les rapports Al_p/Al_O et Fe_p/Fe_O proches de 1 indiquent la présence de complexes organo-métalliques. Le Fe (Fe_O et Fe_t) montre une diminution plus ou moins régulière avec la profondeur alors que Al_O marque un maximum au niveau de l'horizon (B_2), traduisant un comportement

différentiel des deux éléments. Ce sol ne satisfait ni les critères des sous-groupes andiques ni ceux des horizons spodiques (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994) malgré l'ammorce de redistribution de l'Al (cryptopodzolisation).

Dans le cas du sol ocre podzolique, les teneurs en Al_0 (0,23 à 0,91 %), Fe_0 (0,09 à 1,17 %), Si_0 (0,01 à 0,18 %) et Fe_t (0,01 à 0,51 %) augmentent un peu et leur redistribution est plus marquée. En effet, l'accumulation de Fe se fait en deux étapes : Fe_t est maximal en Bh et Fe_0 culmine en B_{Fe} . Quant à Al_0 et Si_0 , ils présentent les valeurs les plus élevées en Bs. Ici, la valeur de la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ est deux fois plus importante (et $\geq 0,50$ %) en B_{Fe} et Bs (1,06 et 1,09 %) qu'en A_1 (0,42 %), vérifiant ainsi un des points requis dans certaines classifications (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994) pour la définition de l'horizon spodique. Enfin, on observe que le compartiment "fer oxyde bien cristallisé" prend ici valeur d'invariant et que quelques allophanes (1,1 %) sont présents en Bs.

Cette invariance du fer oxyde et ces allophanes se retrouvent également dans le podzol humo-ferrugineux où la redistribution et le comportement différentiel de Fe et Al s'accroît. Le Fe est maximal en Bh sous forme de complexe hydroxyferriques très mobiles ($Fe_0 = 0,75$ % et $Fe_t = 0,41$ %) et Al s'accumule principalement en Bs ($Al_0 = 1,63$ %). La définition de l'horizon spodique (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994) est vérifiée au niveau des horizons Bh et Bs ($Al_0 + 1/2Fe_0 = 1,26$ et $1,89$ % en Bh et Bs et $0,01$ % en A_1 et E). Les rapports C/Al_p sont en accord avec les limites établies par MOKMA & BUURMAN (1982) pour la séparation des horizons éluviaux et illuviaux. De même, dans les horizons Bh et Bs, les rapports C_p/Al_p+Fe_p sont supérieurs au minimum requis par ces auteurs (5,8) dans la définition des horizons spodiques (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994).

C. CONCLUSIONS

Ces premiers résultats permettent d'examiner la place de l'Andosol des Vosges par rapport aux autres sols étudiés. Ainsi, *cet Andosol est caractérisé par des teneurs assez élevées en Al et Fe "amorphes" (extraits par l'oxalate) qui ne sont pas redistribués au sein du profil*. Ceci est tout à fait en accord avec ce que l'on observe dans l'Andosol de référence de la Chaîne des Puys, qui présente cependant des teneurs plus élevées. De plus, *cet Andosol de référence est riche en allophanes alors que dans le profil de l'Andosol vosgien, l'Al et Fe "amorphes" sont principalement sous forme de complexes Al,Fe - matière organique (Andosol non allophanique)*.

Tous les autres sols vosgiens examinés ici montrent également cette prédominance d'associations organo-métalliques, plus ou moins abondantes. Il semble que les quelques allophanes présents dans l'horizon B du profil de l'Andosol vosgien ont la même origine que ceux des horizons B et B/C des sols podzolisés vosgiens, provenant probablement de la resiliification de l'Al des complexes organiques accumulés en profondeur. *Le sol brun andique montre une répartition similaire à*

celle des Andosols mais avec des teneurs plus faibles. Elles sont toutefois suffisamment élevées pour répondre aux critères des sous-groupes andiques. Dans les sols podzolisés, ces teneurs sont plus élevées et les complexes organo-métalliques migrent à travers le profil.

Comparés à la pédogenèse sur roche cristalline, plus courante dans le Massif Vosgien, les sols développés sur une large gamme de roches volcaniques présentent des quantités d'éléments "amorphes" qui semblent un peu plus importantes. Néanmoins on retrouve les mêmes termes de l'évolution pédogénétique sur les roches volcaniques plus ou moins acides que sur les roches cristallines.

II. COMPLEXE D'ÉCHANGE

Les données relatives au complexe d'échange sont portées dans le Tab. 19 (pH) et dans la Fig. 28 (CEC et taux de saturation), dont le détail est reporté en annexe III (Tab. II).

A. ANDOSOL DE RÉFÉRENCE (Chaîne des Puys)

Les pH_{H_2O} de ce profil varient de 5,1 à 6,5 et augmentent avec la profondeur (Tab. 19). Les pH_{KCl} sont plus faibles d'environ une unité pH (ΔpH : 0,7 à 1,0). La CEC est assez élevée dans l'horizon de surface (~ 18 méq./100g) et diminue plus ou moins régulièrement en profondeur, avec des valeurs allant de ~ 8 à 4 méq./100g (Fig. 28). La garniture cationique est largement dominée par Ca (~ 3 à 13 méq./100g) et, dans une moindre mesure, par Mg (~ 1 à 3 méq./100g). Le K et Na sont présents en faibles quantités et Fe et Mn ainsi que les cations acides Al et H sont très peu représentés (excepté dans l'horizon de surface). Les taux de saturation en bases sont de ce fait très élevés et varient de 87 à 99 %.

L'acidité très modérée de ce profil est assez habituelle dans les Andosols allophaniques. En effet, nous avons vu que les allophanes se formaient dans les environnements peu acides ($pH > 5$). Ces pH_{H_2O} se rapprochent plutôt des valeurs obtenues par (NANZYO *et al.*, 1993a) à partir de la banque de données "TU Andisol" pour les Andosols allophaniques pauvres en MO (cf. 2^o partie), par contre, les ΔpH (proches de 1) sont plus élevés. La capacité d'échange de ce profil est à relier aux teneurs élevées en MO, au moins dans les 70 cm supérieurs. La dissociation des groupements silanols peut également contribuer à augmenter la CEC dans les Andosols allophaniques (NANZYO *et al.*, 1993a). Ces valeurs de la CEC sont assez modestes si on les compare à celles d'autres Andosols allophaniques comme en Islande (ARNALDS *et al.*, 1995) où elles varient de ~ 10 à 45 méq./100g et de ~ 16 à 67 méq./100g en Italie (LORENZONI *et al.*, 1995). Notons cependant que ces mesures ont été effectuées à $pH \sim 8$. Les taux de saturation sont au contraire nettement plus importants dans ce profil, surtout par rapport à l'Andosol vosgien, et nous verrons plus loin que ceci est en relation avec la roche mère.

Tab. 19 - Acidité des sols sur roches volcaniques étudiés.

Profil	Horiz.	Prof. (cm)	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	ΔpH
Andosol vosgien	A ₀ A ₁	0-10	4,3	3,6	0,7
	A ₁ B ₁	10-30	4,3	3,9	0,4
	A ₁ B ₂	30-50	4,5	4,1	0,4
	A ₁ B ₃	50-70	4,5	4,1	0,4
	B	70-100	4,6	4,4	0,2
	BC	100-130	4,7	4,3	0,4
	C	130-150	4,7	4,2	0,5
Andosol Chaîne des Puys	A ₀ A ₁	0-10	5,1	4,4	0,7
	A ₁	10-30	5,6	4,8	0,8
	A ₁ B ₁	30-50	6,1	5,2	0,9
	B ₁	50-70	6,0	5,2	0,8
	B ₂	70-90	6,1	5,3	0,8
	B/C	90-120	6,5	5,5	1,0
	C	> 120	6,4	5,5	0,9
Sol brun andique	A ₁	0-10	4,3	3,6	0,7
	A ₁ B	10-40	4,3	3,8	0,5
	B	40-80	4,5	4,1	0,4
	B/C	> 80	4,6	4,1	0,5
Sol brun ocreux	A ₀ A ₁	0-10	3,3	2,6	0,7
	A ₁ B	10-30	3,8	3,1	0,7
	B	30-80	4,1	3,5	0,6
	BC	> 80	4,3	3,9	0,4
Podzol	A ₀ A ₁	0-10	3,5	2,8	0,7
	E	10-40	3,6	3,2	0,4
	Bh	40-50	4,1	3,7	0,4
	BhBs	50-55	4,3	4,2	0,1
	C	> 55	4,5	4,5	0,0

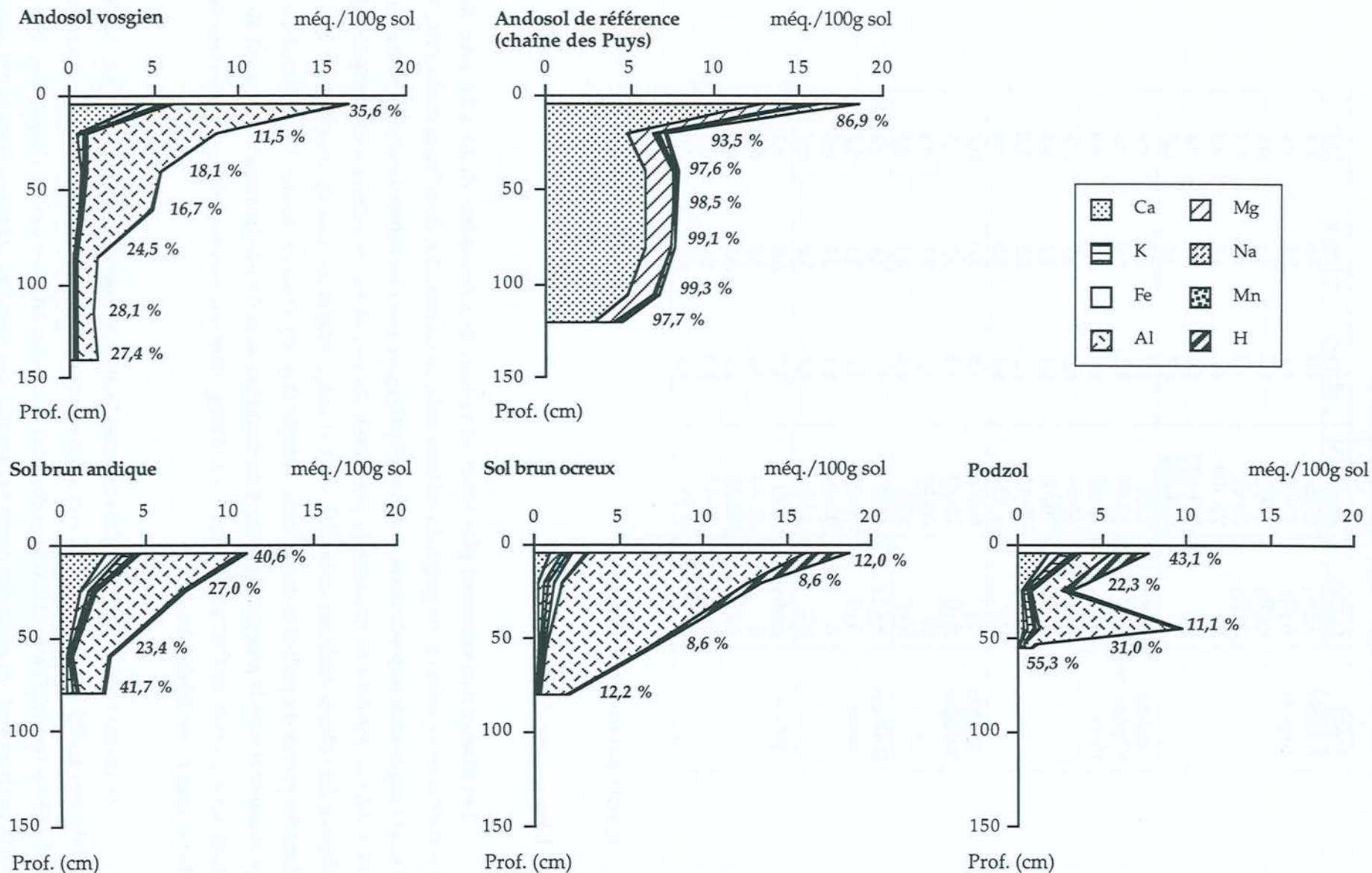
B. SOLS DU MASSIF VOSGIEN

1. Sur roches volcaniques

Les pH_{H₂O} sont nettement plus faibles et varient, dans l'ensemble, de 4,6 à 3,3 avec, dans l'ordre d'acidité croissante, les profils du sol brun andique, du podzol et du sol brun ocreux (Tab. 19). Ces pH augmentant en profondeur, ainsi que les pH_{KCl}, un peu plus faibles. Les ΔpH sont d'environ 0,4 à 0,7, excepté dans les horizons de profondeur du podzol où ces valeurs sont très faibles. On observe des valeurs similaires de la CEC (~ 2 à 11 méq./100g) et des taux de saturation (11 à 59 %) dans les profils du podzol et du sol brun andique (Fig. 28). Dans ce dernier, la CEC diminue en profondeur et dans le premier elle marque un maximum au niveau de l'horizon Bh. Le profil du sol brun ocreux montre des CEC plus élevées (~ 2 à 19 méq./100g) qui diminuent en profondeur et des taux de saturation très faibles (8 à 12 %).

Ces sols sur roches volcaniques dans le Massif Vosgien montrent une réaction très acide. La CEC reflète cette acidité avec une garniture cationique constituée principalement de cations acides comme Al (sol brun andique) ou Al et H (sols podzolisés). Les autres cations sont minoritaires, sauf dans les horizons de surface, en raison des cycles biologiques. Les variations de la valeur de la CEC vers la profondeur suggèrent une forte contribution de la MO.

Fig. 28 - Distribution des cations échangeables dans les sols étudiés.
En italique : taux de saturation en bases (%).



2. Sur roches cristallines

Nous n'allons pas ici détailler l'état du complexe d'échange des sols sur roches cristallines des Vosges mais seulement en rappeler les traits principaux. Si on se réfère par exemple aux quatre sols déjà cités précédemment (JEANROY, 1983), on distingue deux groupes. Le profil du sol brun mésotrophe présente des $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ variant de 4,9 à 5,5, des CEC moyennes (~ 6 à 15 méq./100g) et des taux de saturation de 13 à 62 %. Les autres sols sont plus acides (3,5 à 4,9) et montrent des CEC plus élevées (~ 7 à 47 méq./100g) mais moins saturées (1 à 5 %).

C. CONCLUSIONS

L'Andosol non allophanique des Vosges est caractérisé par un complexe d'échange qui montre plus d'analogies avec les autres sols vosgiens qu'avec l'Andosol de référence de la Chaîne des Puys. En effet, ce dernier, de type allophanique, présente des taux de saturation en bases très élevés, dus à une forte proportion de Mg et surtout de Ca sur le complexe d'échange. *Les autres sols vosgiens, qu'ils se développent sur roche volcanique ou plutonique, offrent tous des taux de saturation plus faibles et le complexe d'échange est dominé par des cations acides comme Al*, ou, dans les horizons de surface des sols podzoliques, Al et H. Les pH montrent la même tendance. L'Andosol vosgien et les autres sols vosgiens présentent une réaction très acide. *Ceci reflète un environnement agressif et fortement lixiviant de cette région qui favorise une désaturation du complexe d'échange.* L'acidité plus faible de l'Andosol de référence est probablement à relier à sa richesse en allophanes et à la nature de sa roche mère (cf. paragraphe suivant).

III. CONSTITUANTS MINÉRAUX

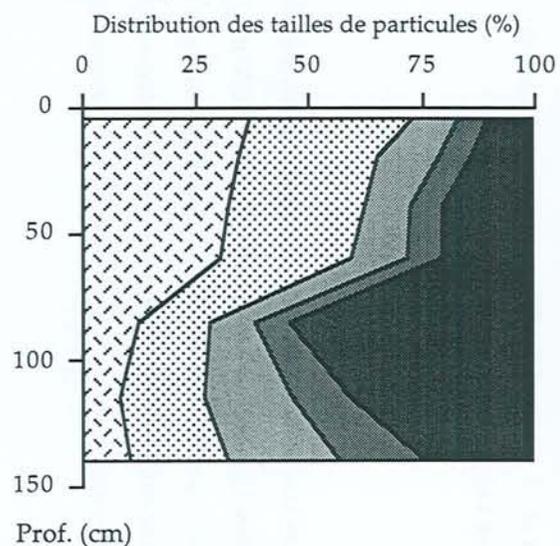
Nous allons ici examiner rapidement la distribution des particules minérales dans les différentes classes granulométriques (Fig. 29 et Tab. II en annexe III) puis nous consacrer aux résultats des analyses des éléments totaux (Tab. 20 et Tab. IV en annexe III).

A. TEXTURE

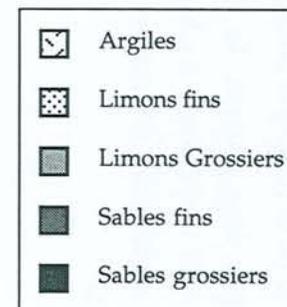
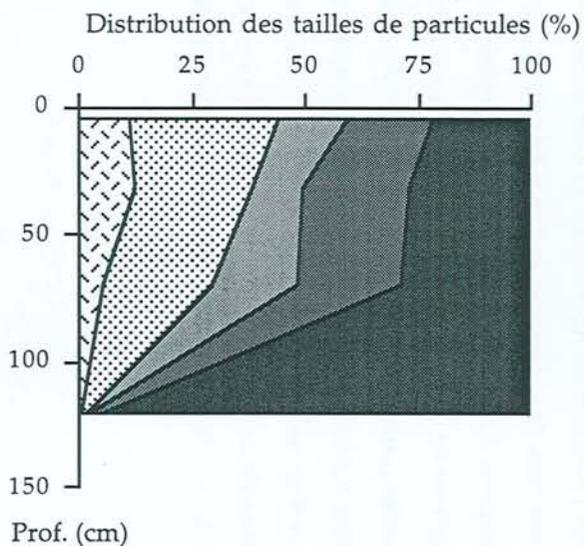
La répartition des particules minérales dans les fractions argileuses (< 2 μm), limoneuses fines (2-20 μm) et grossières (20-50 μm) et sableuses fines (50-200 μm) et grossières (200-2000 μm) est exposée dans la Fig. 29 (pour le détail des données on se reportera aux Tab. II en annexe III). Rappelons que ces fractions sont exprimées en pourcentage de la fraction minérale obtenue après destruction des ciments organiques et minéraux. Les données concernant l'Andosol de référence de la Chaîne des Puys ont été empruntées à HETIER (1975).

Fig. 29 - Répartition des particules dans les différentes classes granulométriques des sols étudiés (Profil de Mercoeur : d'après HETIER, 1975).

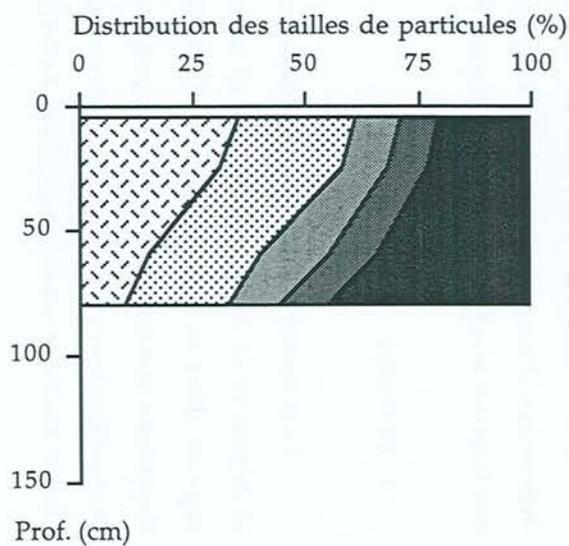
Andosol vosgien



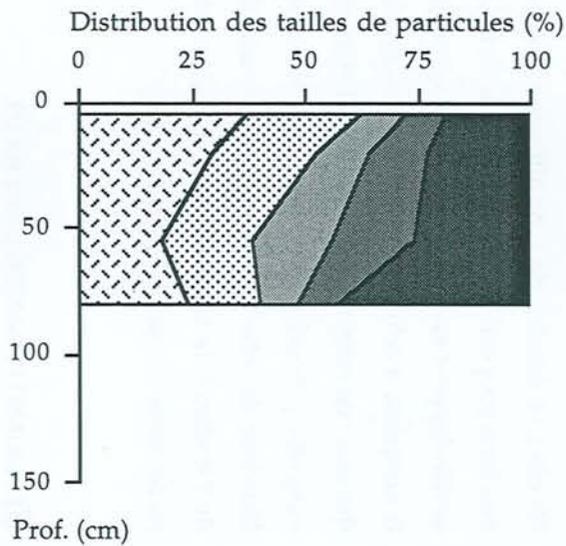
Andosol de référence (Chaîne des Puys)



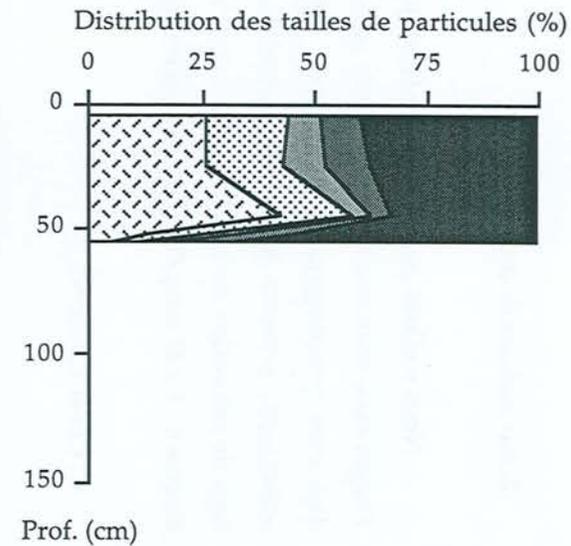
Sol brun andique



Sol brun ocreux



Podzol



1. Andosol de référence (Chaîne des Puys)

Ce profil présente une prédominance des fractions limoneuses et surtout des LF dans l'horizon A₀A₁ (~ 47 %). Cette fraction diminue faiblement en profondeur jusqu'en B₂ (~ 43 %). Parallèlement, la fraction sableuse augmente progressivement vers le bas du profil (~ 41 à 52 %). Par contre, l'horizon C est constitué principalement de sables, SG en majorité (95 % SG). On se trouve ici en présence de scories basaltiques assez grossières. La fraction argileuse, beaucoup moins abondante, diminue en profondeur (de ~ 12 à 0,6 %). Ce profil est donc caractérisé par une texture plutôt limoneuse dans sa partie supérieure, plus sableuse vers la roche mère (scories).

2. Sol brun andique

Ce profil est caractérisé par une assez forte proportion d'argiles qui diminuent régulièrement en profondeur (35 à 10 %) au profit de la fraction de SG (21 à 45 %). Les autres fractions (où les LF dominant) ne montrent pas de fortes variations avec la profondeur. On observe donc une légère argilisation vers la surface et une augmentation des fractions grossières vers la roche mère.

3. Sol brun ocreux

La distribution des tailles de particules est ici très semblable au sol brun andique, avec une très légère augmentation de la teneur en argile vers les horizons de profondeur.

4. Podzol

Dans ce profil, les fractions SG et argiles prédominent dans les horizons supérieurs (37 à 40 % et ~ 26 % respectivement). Ces argiles passent par un maximum (~ 42 %) au niveau de l'horizon Bh, traduisant un léger lessivage d'argiles. La texture devient beaucoup plus grossière vers la roche mère (C : ~ 82 % de sables).

5. Conclusions

Dans l'ensemble, la texture de l'Andosol vosgien est assez comparable à celle du sol brun andique, au moins dans sa partie supérieure. Elle traduit une légère argilisation vers la surface du profil. Ces sols développés sur roches volcaniques dans les Vosges présentent tous des textures où les argiles sont relativement abondantes. Par rapport aux sols sur roches cristallines, on peut rappeler les travaux de SOUCHIER (1971) qui a noté une texture plus argileuse dans les sols bruns et ocreux que dans les podzols. L'argilisation apparaît plus importante dans tous les sols vosgiens sur toutes les roches mères que sur les pyroclastes vitreux récents de la Chaîne des Puys. Ceci est lié à une durée de pédogenèse un peu plus longue dans les Vosges et à la présence de minéraux susceptibles de subir des transformations (notamment des phyllites) dans roches mères des sols vosgiens.

B. ÉLÉMENTS TOTAUX

Les résultats des analyses des éléments totaux sont consignés dans le Tab. IV en annexe III. Ces analyses ont porté sur toutes les roches mères et sur quelques horizons seulement (A₁B, E, B, Bh). Les données de la roche mère de l'Andosol de référence de la Chaîne des Puys ont été empruntées à HETIER (1975). Pour l'étape de comparaison de ces résultats avec des sols développés sur roches cristallines dans le Massif Vosgien, nous nous sommes basés sur les données de LELONG & SOUCHIER (1970). Ces auteurs ont défini des bilans minéralogiques et chimiques d'altération sur une séquence de sols sur granite dans les Vosges. Ces analyses ont porté sur plus d'une centaine d'échantillons appartenant à neuf stations principales regroupées en trois grandes catégories de sols. Parmi ces stations on retrouve notamment les profils précédemment cités et étudiés par JEANROY (1983), soit des profils appartenant aux catégories "sols bruns acides" (Hohrodberg), "sols à podzolisation faible ou modérée" (Rudlin) et "sols à podzolisation accentuée" (Kligenthal), définies par LELONG & SOUCHIER (1970).

1. Perte au feu

Dans le cas des roches mères, la perte au feu (Tab. IV) est généralement assimilée à un indice d'altération car elle correspond à la perte en eau, éléments légers et volatils de la roche. Elle est moyennement élevée dans les granites. Concernant les roches volcaniques, la perte au feu est assez moyenne également pour le kéraatophyre quartzique du sol brun ocreux (~ 1 à 1,5 %) ; elle augmente dans les tufs kéraatophyriques du podzol et dans la porphyrite andésitique basique du sol brun andique (~ 2,1 à 2,6 %) et plus encore dans celle de l'Andosol vosgien où elle atteint des valeurs élevées d'environ 4 %. La perte au feu mesurée sur les horizons représente la perte en eau et surtout en matière organique. On observe une assez bonne relation entre la teneur en carbone et la perte au feu des horizons qui montrent donc des valeurs très diverses, variant de 2,73 % (horizon C des sols à podzolisation accentuée) à près de 49 % dans l'horizon Bh du podzol sur roche volcanique.

2. Roches mères

Nous examinerons ici les teneurs en éléments totaux rapportés à la fraction minérale (Tab. IV en annexe III). Concernant les roches volcaniques, les teneurs en SiO₂ montrent une augmentation lorsque l'on passe de la roche mère de l'Andosol de référence (scorie basaltique ~ 47 % SiO₂) à celles de l'Andosol vosgien (porphyrite andésitique basique ~ 52 %), du sol brun andique (même roche ~ 59 %), du sol brun ocreux (kéraatophyre quartzique ~ 75 %) et du podzol (tuf kéraatophyrique ~ 79 %). On observe donc une augmentation de l'acidité des roches mères des Andosols vers les sols bruns et les podzols. Les analyses de LELONG & SOUCHIER (1970) montrent la même distribution pour les sols de la série "bruns acides" (~ 69 %), "à podzolisation modérée" (~ 74 %) ou "accentuée" (~ 74,6 %) sur granite.

Cette discrimination entre les groupes de sols se rencontre aussi avec Al_2O_3 et surtout Fe_2O_3 dans la série des sols sur granite. En effet, les sols bruns acides se développent sur des roches mères plus riches en Al_2O_3 et Fe_2O_3 (14,7 et 3,2 % respectivement) que celles des sols à podzolisation modérée (13,6 et 2,3 %) ou accentuée (14,9 et 1,2 %). Dans le cas des roches volcaniques, cette répartition est un peu moins accentuée. Les Andosols et sols andiques se rencontrent ainsi sur des roches plus riches en Al_2O_3 (16,6 à 19,9 %) et Fe_2O_3 (9,2 à 11,1 %) que les sols podzolisés (Al_2O_3 : 12,5 à 14,5 % ; Fe_2O_3 : 1,6 à 3,6 %).

Dans le cas des alcalino-terreux, on note une nette différence entre la roche mère de l'Andosol de référence, très riche en CaO (10,3 %) et MgO (7 %) par rapport à celle de l'Andosol vosgien (~ 7 et 3 % respectivement) et du sol brun andique (~ 1 et 2,1 %). Ces teneurs sont plus faibles encore dans les sols podzolisés sur roches volcaniques (< 1 %) et dans les autres sols vosgiens sur granite (< 2 %). Concernant les teneurs en alcalins, elles sont assez moyennes dans l'ensemble des roches mères. Une exception cependant, la roche mère du sol brun ocreux sur roche volcanique, plus riche en K_2O (~ 8 %) que les autres roches.

Dans l'ensemble, ces données soulignent l'importance de la composition chimique de la roche mère sur l'orientation de la pédogenèse. *L'andosolisation se manifeste sur des roches mères moins siliceuses et plus riches en Fe_2O_3 , MgO et CaO que celles qui conduisent à la brunification et plus encore à la podzolisation.*

3. Variations vers les horizons

Nous pouvons à présent étudier les gains ou pertes ayant lieu entre les roches mères et les horizons sus-jacents, en ne considérant que les écarts les plus importants (Tab. IV).

Dans l'*Andosol vosgien*, on observe de très fortes pertes en CaO entre la roche mère et les horizons A_1B_2 et B (environ - 84 %). Des pertes encore importantes concernent K_2O (- 35 %) et MgO (- 31 %). Ces pertes peuvent être attribuées à l'*altération des plagioclases (notamment calciques) et des pyroxènes ferro-magnésiens et calciques (augite) ainsi que des chlorites* présents dans la roche mère (porphyrite andésitique basique).

Dans l'*Andosol de référence*, les pertes touchent principalement K_2O (- 80 %), Na_2O (- 52 %), CaO (- 31 %) et SiO_2 (- 25 %). Elles correspondent vraisemblablement à l'*altération des verres des scories basaltiques*, verres qui ont la composition des minéraux virtuels qui n'ont pas eu le temps de cristalliser (feldspaths notamment). L'augmentation relative des autres composés (Al_2O_3 et Fe_2O_3) est beaucoup plus accentuée (de + 49 à + 66 %), et traduit sans doute une faible altération des minéraux silicatés ferro-magnésiens.

Le sol brun andique présente dans l'ensemble un comportement qui rappelle celui de l'Andosol vosgien mais en très atténué. Dans le cas du podzol, on observe des variations plus prononcées entre les horizons. Les pertes touchent CaO et MgO, notamment en E, indiquant une altération portant en priorité sur les minéraux ferro-magnésiens et peut-être les plagioclases.

4. Réserve totale en bases

La réserve totale en bases (RTB) peut être calculée à partir des analyses totales des roches mères et des horizons. Elle est définie par la somme des cations alcalins et alcalino-terreux (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}), exprimée en méq./100 g et rapportée à la fraction minérale. La RTB correspond non seulement aux cations appartenant aux minéraux primaires grossiers mais aussi à ceux localisés sur les sites d'échange et probablement dans les minéraux de la fraction argileuse (HERBILLON, 1989). Nos valeurs de la RTB sont portées dans le Tab. 20.

Dans le cas des roches mères, les valeurs de la RTB sont plus élevées dans celles de l'Andosol de référence (787 méq./100 g) et de l'Andosol vosgien (508 méq./100 g) que dans les autres avec, dans l'ordre décroissant, les roches mères volcaniques du sol brun andique (272 méq./100 g), du sol brun ocreux (109 méq./100 g) et du podzol (92 méq./100 g). On observe également cette succession dans les sols sur roches cristallines avec les sols bruns acides (271 méq./100 g) puis les sols à podzolisation modérée (177 méq./100 g) ou accentuée (142 méq./100 g). *Ainsi, les Andosols se développent sur des roches mères riches en bases et qui montrent donc les RTB les plus élevées. Les sols dérivant de roches moins riches en bases présentent une évolution vers la brunification ou vers la podzolisation sur des roches plus pauvres encore.* Dans les deux Andosols, il apparaît que Mg^{2+} et surtout Ca^{2+} contribuent pour la plus grande part à cette réserve en bases, suivis de Na^+ et K^+ (Tab. 20). Dans les autres sols, on n'observe pas cette richesse en Ca^{2+} de la réserve totale. Ainsi, c'est plutôt Mg^{2+} qui participe pour la plus forte part à la RTB des sols bruns alors que les alcalins, et surtout K^+ , l'emportent dans les sols podzolisés.

On retrouve dans la RTB les variations entre les roches mères et les horizons observées précédemment. Dans l'andosol de référence, l'altération touche principalement les éléments vitreux des scories basaltiques. La RTB y est très élevée et constituée en majorité de Ca^{2+} et Mg^{2+} , en bon accord avec l'abondance de silicates calciques et magnésiens peu altérés et la garniture cationique du complexe d'échange de ce sol. Dans l'Andosol vosgien, l'altération concerne les minéraux facilement altérables (plagioclases et ferro-magnésiens). La RTB est encore très élevée mais plus faible que pour l'Andosol de référence. Cette RTB diminue dans le sol brun andique où l'altération porte toujours sur les silicates les plus altérables mais qui sont en quantités moindre que dans l'Andosol vosgien. Enfin, la RTB est minimale dans le podzol où les minéraux altérables sont en très faibles quantités. On observe une bonne analogie entre les sols vosgiens sur roches volcaniques et leurs homologues sur roches plutoniques.

Tab. 20 - Valeurs de la Réserve Totale en Bases (RTB), rapportée à la fraction minérale, des horizons et roches mères étudiés.

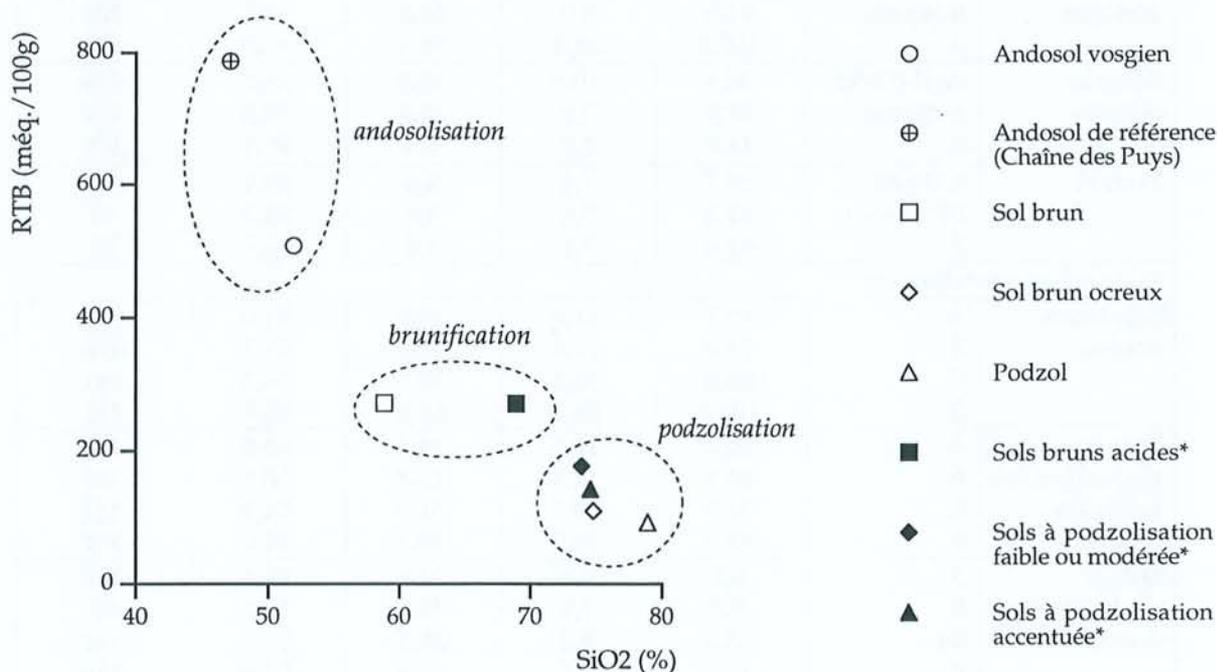
Profil	Horizons (Prof. cm)	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	RTB
		(méc./100 g)				
Sur roches volcaniques						
Andosol vosgien	A ₁ B ₂ (30-50)	101,5	37,0	68,7	13,6	221
	B (50-70)	109,2	45,9	72,5	14,2	242
	R	152,1	252,1	82,4	21,0	508
Andosol Chaîne des Puis	A ₁ B ₁ (30-50)	373,5	245,8	26,7	3,2	649
	B ₁ (50-70)	349,9	263,7	27,9	3,1	645
	R*	347,4	366,5	57,3	15,5	787
Sol brun andique	A ₁ B (10-40)	92,1	15,7	58,6	42,7	209
	B (40-80)	94,5	9,9	54,8	42,5	202
	R	105,9	34,2	92,1	40,0	272
Sol brun ocreux	A ₁ B (10-30)	48,4	10,6	38,8	28,5	126
	B (30-80)	57,2	7,6	34,4	29,3	128
	R	14,9	2,6	3,3	87,9	109
Podzol	E (10-40)	28,7	2,4	3,6	53,1	88
	Bh (40-50)	32,2	5,6	3,6	52,3	94
	R	47,6	7,1	3,6	33,9	92
Sur roches cristallines**						
Sols bruns acides	A	68,7	11,6	35,9	54,6	171
	B	75,2	11,6	35,5	55,7	178
	C	88,8	33,2	39,1	56,3	211
	R	103,7	56,7	46,8	63,8	271
Sols à podzolisation faible ou modérée	A	20,2	11,6	26,8	48,9	107
	B	24,3	12,4	27,7	50,5	115
	C	35,0	10,7	31,0	54,3	131
	R	33,6	38,5	50,4	54,0	177
Sols à podzolisation accentuée	A	6,7	6,1	24,1	65,4	102
	E	3,7	7,5	28,1	57,2	97
	B ₁	13,3	3,2	29,3	59,7	105
	B ₂	15,4	6,1	31,0	57,8	110
	C	19,5	3,0	23,2	62,0	108
	R	21,2	17,8	48,5	54,5	142

* d'après les données de HETIER (1975) ; ** d'après les données de LELONG & SOUCHIER (1970).

DELVAUX *et al.* (1989) ont utilisé cet indice sur une séquence d'altération (Andept - Udalf - Udult) développée sur des pyroclastes basaltiques quaternaires au Cameroun. Ils ont mis en évidence de fortes valeurs de la RTB dans les horizons B des Andepts (> 350 méq./100 g). MADEIRA *et al.* (1994) ont obtenu des valeurs de la RTB beaucoup plus variables pour les Andosols de l'île de Madère. Elles varient de 60 à 370 méq./100 g avec les valeurs les plus faibles pour les sols sur matériaux pyroclastiques et les plus élevées pour ceux sur basaltes. Ces différences sont essentiellement dues à de fortes variations de leurs teneurs en Mg et Ca. La RTB dépend étroitement de la classe texturale à laquelle appartiennent les échantillons (HERBILLON, 1989). MADEIRA *et al.* (1994) ont en effet noté que les valeurs de la RTB diminuent lorsque la teneur en argiles augmente. Nous observons globalement la même tendance pour nos sols.

Ainsi, la RTB permet d'évaluer l'altérabilité des roches mères en donnant une estimation de leur teneur en minéraux altérables. Cet indice, combiné à la teneur de la roche en SiO_2 , nous permet d'obtenir une séparation convenable des roches mères "favorables" au développement d'un processus d'andosolisation, c'est-à-dire présentant un chimisme basique et une RTB élevée, de celles à l'origine de phénomènes de podzolisation, plus acides et caractérisées par une faible RTB (Fig. 30).

Fig. 30 - Relations entre la réserve totale en bases (RTB) et la teneur en SiO_2 (toutes deux rapportées à la fraction minérale) dans les roches mères.



* d'après LELONG & SOUCHIER (1970)
 symboles blancs : sols sur roches volcaniques ; symboles noirs : sols sur granite.

IV. CONSTITUANTS ORGANIQUES

Afin de préciser la nature et la distribution des composés organiques dans les sols étudiés, nous allons dans un premier temps nous pencher sur les teneurs en C et N, puis sur l'évolution en profondeur de la densité optique de différents extraits (oxalate et HCl) pour enfin nous attacher à l'étude de la nature des substances humiques.

A. CARBONE ET AZOTE

Les données relatives aux teneurs en C et N sont portées dans le Tab. 21 (et dans les Tab. I en annexe III).

L'Andosol de référence présente de fortes teneurs en C en surface (23 %) qui diminuent assez régulièrement en profondeur. Les rapports C/N sont peu élevés dans la partie supérieure du sol (13 à 16) et augmentent vers le bas du profil pour atteindre des valeurs assez élevées (23). Ce profil est très semblable à celui de l'Andosol vosgien bien que les teneurs en C soient supérieures et les rapports C/N moins élevés en surface et plus élevés en profondeur. Nous avons vu dans la 2^e partie de ce mémoire que ces teneurs importantes de MO (ici plus de 40 % en surface et encore ~ 10 % à 1 m de profondeur) sont caractéristiques de la plupart des Andosols. Par contre, les rapports C/N sont plus élevés que ceux que l'on rencontre généralement dans les Andosols. De même, leur variation en profondeur rappelle plus celle observée dans les podzols (augmentation) que dans les Andosols (diminution).

Le sol brun andique offre des caractéristiques proches de l'Andosol vosgien mais un peu plus atténuées : les teneurs en C sont un peu plus faibles (11,4 à 1,1 %) et diminuent régulièrement en profondeur. Les rapports C/N sont peu élevés (14 à 18) et augmentent également vers le bas du profil. Ces rapports sont plus élevés que ceux habituellement observés dans les sols bruns où ils diminuent en profondeur. Les teneurs en C sont plus élevées dans le sol brun ocreux, allant de 19,3 % en surface à 4,5 % en profondeur. Les rapports C/N sont très élevés (19 à 35) et augmentent fortement vers le bas du profil. Le podzol montre une distribution des teneurs en C avec la profondeur caractéristique des podzols. Ces teneurs, élevées en surface (13,1 %), diminuent brusquement en E (2,3 %) puis remontent en Bh (19,4 %) pour diminuer ensuite vers la roche mère. Cette répartition du C en profondeur indique des transferts de MO au sein du profil. De même, les fortes valeurs des rapports C/N (16 à 33), augmentant en profondeur, sont tout à fait en accord avec ce que l'on rencontre généralement dans les podzols.

A l'exception du sol brun andique, les caractères des sols vosgiens sont ceux de sols à activité biologique plutôt modérée à faible (teneurs importantes en MO et C/N élevés), en bon accord avec le climat froid et l'acidité du milieu.

Tab. 21 - Teneurs en C et rapport C/N des sols sur roches volcaniques étudiés.

Profil	Horiz.	Prof. (cm)	C (%)	C/N	
Andosol vosgien	A ₀ A ₁	0-10	19,4	18	
	A ₁ B ₁	10-30	11,7	19	
	A ₁ B ₂	30-50	10,0	19	
	A ₁ B ₃	50-70	9,1	21	
	B	70-100	3,3	21	
	BC	100-130	1,7	15	
	C	130-150	0,6	15	
Andosol de référence	A ₀ A ₁	0-10	23,0	13	
	A ₁	10-30	13,3	14	
	A ₁ B ₁	30-50	8,4	16	
	B ₁	50-70	7,8	16	
	Chaîne des Puys	B ₂	70-90	6,4	15
	B/C	90-120	0,9	23	
	C	> 120	0,9	23	
Sol brun andique	A ₁	0-10	11,4	14	
	A ₁ B	10-40	7,0	16	
	B	40-80	4,1	17	
	B/C	> 80	1,1	18	
Sol brun ocreux	A ₀ A ₁	0-10	19,3	19	
	A ₁ B	10-30	11,9	22	
	B	30-80	5,3	25	
	BC	> 80	4,5	35	
Podzol	A ₀ A ₁	0-10	13,1	18	
	E	10-40	2,3	16	
	B _h	40-50	19,4	22	
	B _h B _s	50-55	8,8	33	
	C	> 55	1,1	28	

B. DENSITÉS OPTIQUES DES EXTRAITS OXALATE ET HCL

Les valeurs des densités optiques des extraits à l'oxalate pH = 3 (DOEO) et à HCl N (DO_{HCl}) sont exposées dans la Fig. 31 et les données sont détaillées dans le Tab. III en annexe III. La DOEO est utilisée pour estimer les teneurs en carbone engagé dans les transferts de Al et Fe dans le processus de podzolisation (cf. 2^e partie) (DALY, 1982). Rappelons que l'identification des matériaux spodiques repose notamment sur ce paramètre de DOEO qui doit être $\geq 0,25$ et au moins deux fois plus élevé que dans un horizon sus-jacent (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994 ; AFES, 1995). La DO_{HCl} permet d'évaluer la teneur en C extrait par HCl N (acides fulviques principalement). Cette fraction joue un rôle majeur dans la translocation de l'Al et est particulièrement élevée dans les horizons illuviaux (ANDERSON *et al.*, 1977). Grâce à la forte corrélation entre C et Al dans HCl, JEANROY (1983) a d'ailleurs pu assimiler cette extraction HCl à un test diagnostique des horizons d'accumulation d'Al liés à la MO.

Dans l'Andosol de référence, la DOEO et surtout la DO_{HCl} montrent une diminution régulière avec la profondeur. Seule la DOEO présente une diminution un peu plus marquée au niveau de l'horizon A₁. Ces valeurs sont assez élevées, tant pour la DOEO (2,2 à 0,31) que pour la DO_{HCl} (1,02 à 0,23).

Le sol brun andique offre une répartition des DO en profondeur tout à fait comparable à celle de l'Andosol de référence (diminution progressive). Par contre, les valeurs sont un peu plus faibles, 0,63 à 0,11 et 0,32 à 0,07 respectivement pour la DO_{EO} et la DO_{HCl}. Dans le sol brun ocreux on assiste à un début de redistribution. En effet, la DO_{EO} passe de 0,47 en surface à 0,69 en A₁B puis diminue jusqu'à 0,31. De même, la DO_{HCl} passe par un maximum en A₁B. Cette redistribution s'accroît dans le podzol avec une très faible DO_{EO} en surface (< 0,08) et maximale en Bh (3,24). La DO_{HCl}, toujours un peu plus faible, marque également un maximum en Bh (2,28). Les horizons Bh et BhBs vérifient ainsi le point concernant la DO_{EO} dans la définition des horizons spodiques (SOIL SURVEY STAFF, 1994 ; SPAARGAREN, 1994), soit une DO_{EO} ≥ 0,25 et une valeur au moins deux fois plus faible dans un horizon sus-jacent.

Concernant les sols sur granite, nous pouvons examiner les résultats de JEANROY (1983). Nous ne disposons pas de leurs DO_{EO} ni DO_{HCl} mais par contre la teneur en C a été mesurée dans les extraits HCl (Fig. 32). Dans le sol brun mésotrophe, les teneurs en C_{HCl} sont très faibles (< 0,17 %) et diminuent régulièrement en profondeur. Une légère redistribution apparaît dans le sol brun ocreux, où les teneurs en C_{HCl} passent par un maximum en A₁₂ (~ 0,75 %) et elle devient un peu plus complexe dans le sol ocre podzologique avec deux maxima (0,8 en Bh et 1,1 en Bs). Elle est plus marquée encore dans le podzol humo-ferrugineux avec des teneurs très faibles en surface (< 0,1 %) et très élevées en Bh et surtout en Bs (3,5 %).

Ainsi, la DO_{EO} et la DO_{HCl} (ou C_{HCl}) permettent d'estimer les quantités de MO, acides fulviques principalement, impliquées dans les translocations d'éléments métalliques, l'extraction HCl étant plus spécifique de la liaison Al - acides fulviques (JEANROY, 1983). Ces teneurs, très élevées dans le cas des Andosols, plus faibles dans le sol brun andique, diminuent régulièrement vers le bas du profil. La redistribution apparaît au stade sol brun ocreux (sur granites comme sur roches volcaniques), s'accroît dans les sols ocres podzologiques et est maximale dans les podzols. L'horizon d'accumulation des fulvates aluminés se situe à des profondeurs de plus en plus importantes au fur et à mesure de l'évolution pédogénétique (JEANROY, 1983). L'Andosol vosgien offre une position assez particulière. Il présente en effet des valeurs assez élevées dès la surface, intermédiaires entre celles de l'Andosol de référence et du sol brun andique, mais il présente également une légère redistribution au niveau de l'horizon A₁B₃ (50-70 cm), très éloignée cependant des valeurs requises pour un horizon spodique. Dans l'ensemble, ces deux mesures de DO, dans l'extrait oxalate et dans HCl, montrent une distribution semblable dans les sols bruns et les Andosols (sans migrations), très différente de celle des podzols (avec redistributions).

C. CARACTÉRISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Les résultats du fractionnement physique et des extractions alcalines des MO sont résumés dans le Tab. 22 (détaillés dans le Tab. V en annexe III) et illustrés dans la Fig. 33.

Fig. 31 - Evolution des densités optiques des extraits oxalate (DOEO) et HCl N (DO HCl) des sols étudiés.

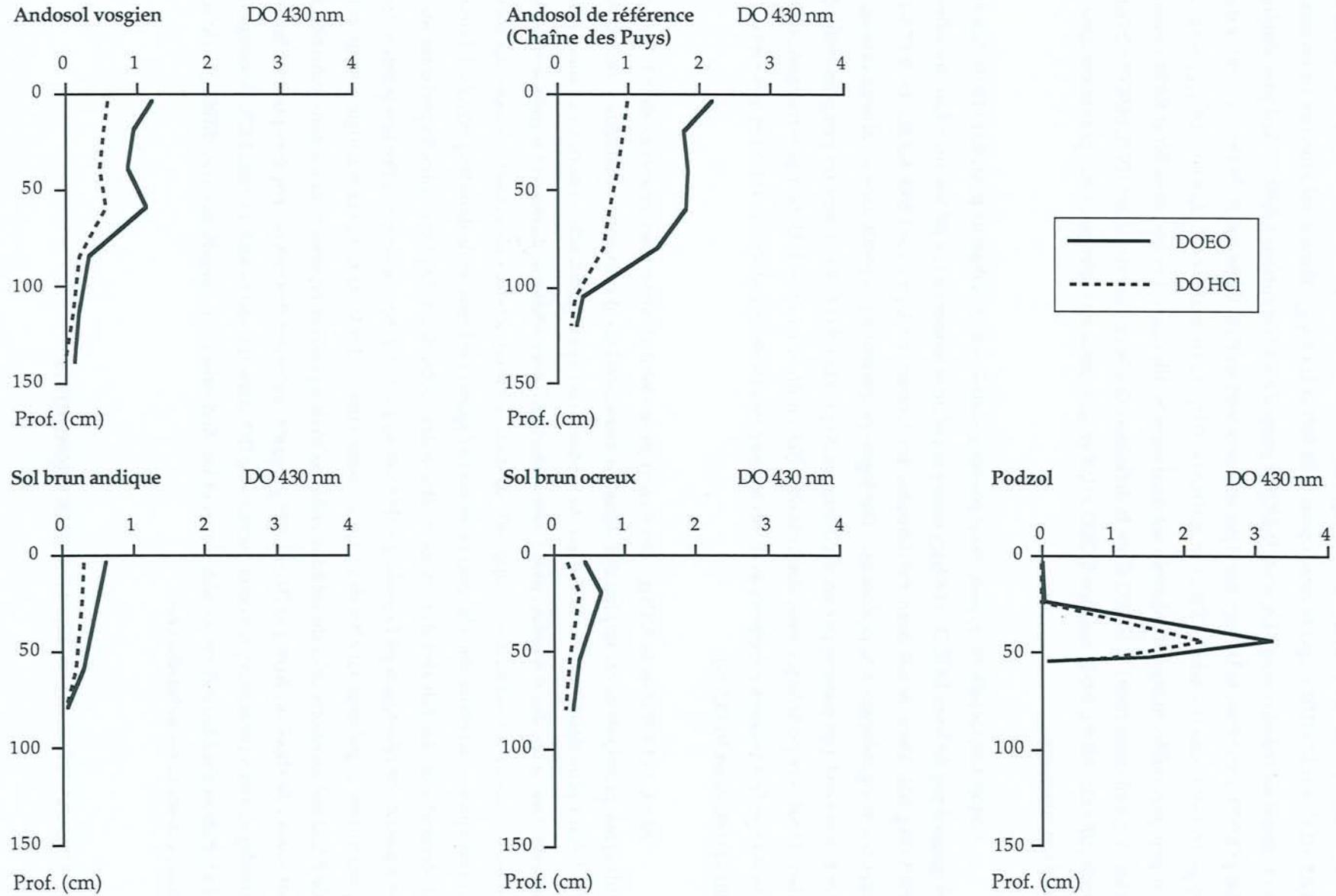
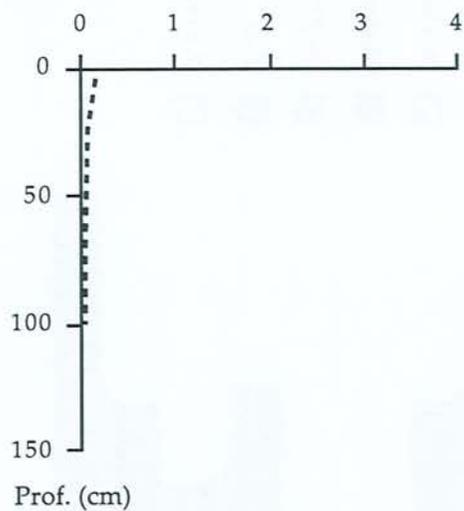
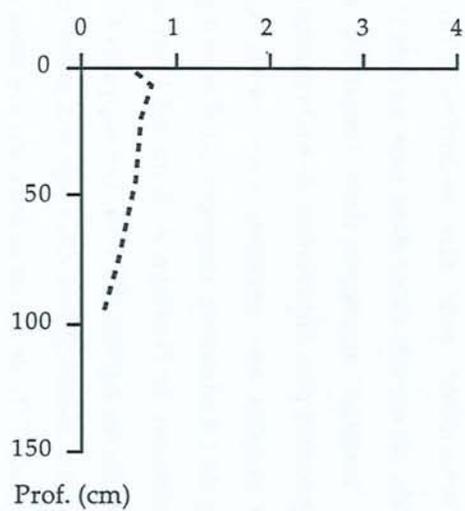


Fig. 32 - Distribution du carbone extrait par HCl N des sols sur granite (d'après JEANROY, 1983).

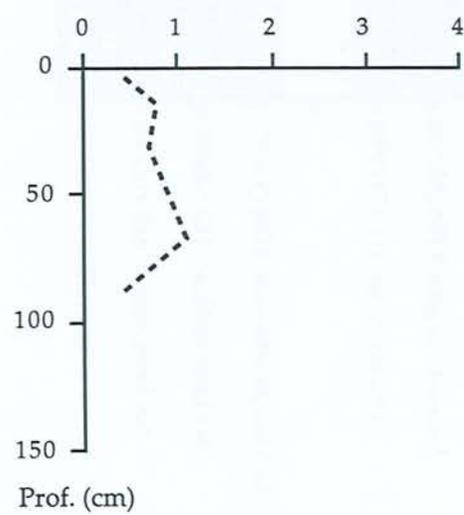
Sol brun mésotrophe C HCl N (%)



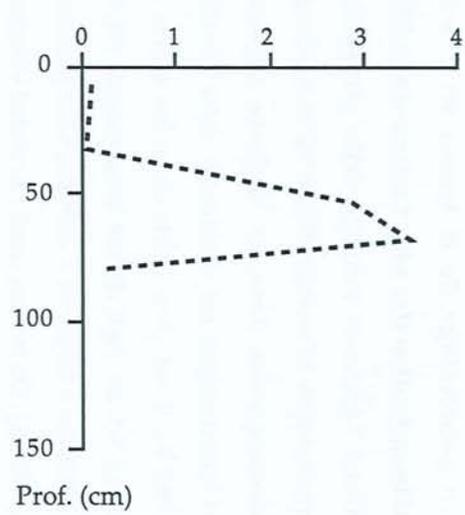
Sol brun ocreux C HCl N (%)



Sol ocre podzolique C HCl (%)



Podzol humo-ferrugineux C HCl (%)

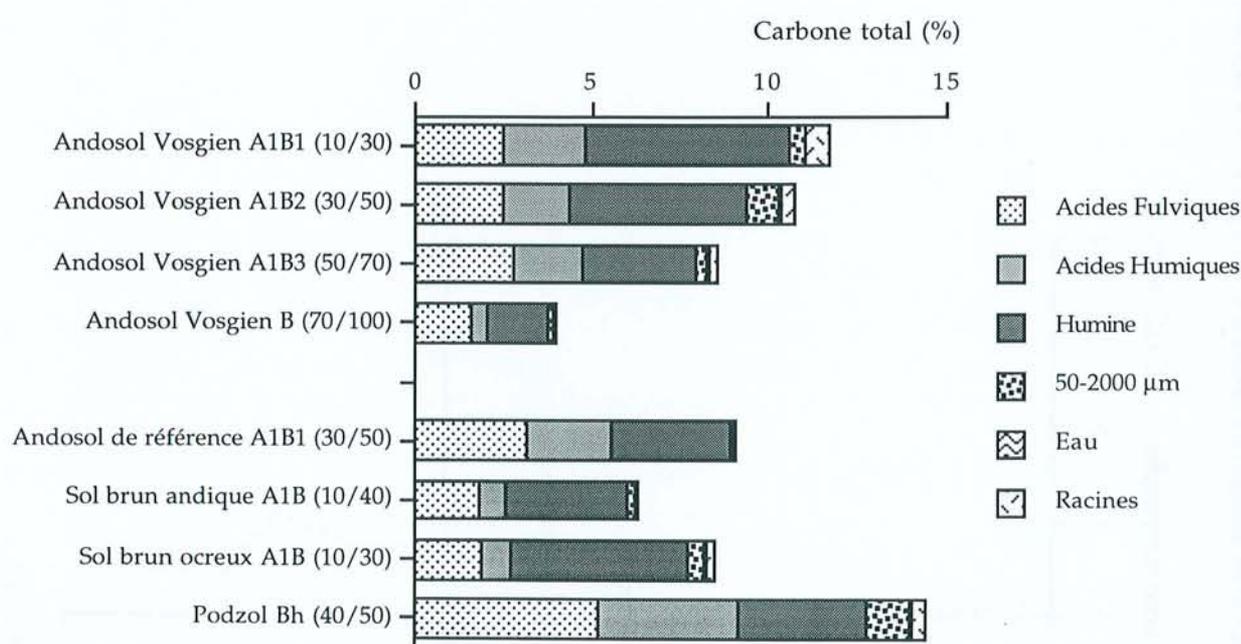


1. Fractionnement physique

La Fig. 33 permet d'examiner, dans un premier temps, la répartition du C dans deux fractions principales. La fraction "grossière", constituée des racines les plus grossières et de la fraction 50-2000 μm , correspond aux résidus végétaux mal décomposés et à la MO peu humifiée. La fraction "fine" < 50 μm regroupe par contre les composés organiques humifiés, tels que les acides fulviques (AF), les acides humiques (AH) et l'humine. Notons que les teneurs en C mesurées dans les eaux de tamisage sont très faibles.

Il apparaît dans la Fig. 33 que la plus grande partie du C est engagée dans cette fraction fine dite "humifiée" et ce pour tous les horizons étudiés. La teneur en C de la fraction < 50 μm , exprimée en pourcentage de la teneur en C total de l'échantillon, peut être assimilée à un indice d'humification des MO. Ce taux d'humification (Tab. 22) est très élevé dans tous les sols (> 87 %). Dans l'Andosol vosgien, cette proportion de C "humifié" augmente dans l'ensemble avec la profondeur (d'environ 90,4 à 94 %), traduisant des quantités plus importantes de MO figurées ou mal décomposées dans les horizons supérieurs par rapport aux horizons sous-jacents. Ce taux d'humification est maximum dans l'horizon A₁B₁ de l'Andosol de référence où il atteint près de 98,5 %. Il est plus faible dans les autres sols, diminuant de l'horizon A₁B du sol brun andique (95,2 %), au A₁B du sol brun ocreux (91,3 %) et au Bh du podzol (88,3 %). Les rapports C/N des fractions < 50 μm et < 2000 μm sont proches et en assez bon accord avec ceux reportés précédemment (Tab. 21). De même, dans l'Andosol vosgien, les rapports C/N de ces deux fractions augmentent vers le bas du profil, confirmant la distribution du C/N en profondeur observé dans le Tab. 21.

Fig. 33 - Répartition du carbone dans les principaux horizons des sols étudiés.



2. Choix du réactif d'extraction

Les substances humiques de la fraction < 50 µm ont été extraites soit par NaOH N/10, soit par un mélange de NaOH N/10 et Na₄P₂O₇ 1 %. Ces traitements n'ont été appliqués que sur quelques horizons afin de comparer leur efficacité. En confrontant les teneurs en C des fractions alcalino-solubles (exprimées en % du C de la fraction < 50 µm) dans les deux extractions (Tab. V en annexe III), il apparaît que le mélange soude et pyrophosphate extrait seulement 2,5 à 5,3 % de plus que la soude seule. Au sein des alcalino-solubles, cette plus grande efficacité du mélange soude et pyrophosphate concerne surtout la fraction AF. Selon BRUCKERT (1994), le pyrophosphate de Na déplace la MO des complexes de coordination dans les sites métalliques des argiles ainsi que les complexes à très forte charge métallique, alors que la soude permet de rompre les liaisons les plus résistantes (AH-AI des allophanes par exemple). Comme l'extraction au mélange soude et pyrophosphate ne présente pas de trop fortes variations par rapport à la soude seule (excepté dans le Bh du podzol où ces différences sont un peu plus marquées), nous avons opté pour cette dernière qui présente en outre l'avantage d'être facilement éliminée en fin d'extraction en vue d'une purification des AH. En revanche, l'utilisation de ce réactif très alcalin (pH = 12) peut provoquer la néoformation artificielle de composés solubles à partir de la MOF (tissus végétaux non décomposés) (BRUCKERT, 1994). C'est pourquoi, pour éviter cette éventuelle contamination, nous n'avons pas extrait les substances humiques sur l'ensemble de la terre fine (contenant de la MOF) mais sur la fraction < 50 µm (humifiée).

Tab. 22 - Caractéristiques principales des MO des horizons étudiés lors d'une extraction (sur la fraction < 50 µm) à NaOH N/10.

Profils	Horiz. (Prof. cm)	Fraction < 2000 µm		T.H.* (% C _t)	Q4/6		AF/AH
		C _t (%)	C/N		AS**	AH	
Andosol vosgien	A ₁ B ₁ (10-30)	11,7	18	90,4	6,9	5,6	1,1
	A ₁ B ₂ (30-50)	10,7	19	87,6	7,7	6,0	1,3
	A ₁ B ₃ (50-70)	8,5	20	93,2	6,7	4,9	1,4
	B (70-100)	4,0	22	94,0	10,2	9,2	3,7
Andosol référence	A ₁ B ₁ (30-50)	9,1	15	98,5	3,7	5,7	1,3
Sol brun andique	A ₁ B (10-40)	6,3	14	95,2	7,2	7,2	2,3
Sol brun ocreux	A ₁ B (10-30)	8,5	20	91,3	12,2	11,2	2,3
Podzol	Bh (40-50)	14,4	24	88,3	3,3	5,0	1,3

* T.H. : taux d'humification (C de la fraction < 50 µm rapporté au C_t de la fraction < 2000 µm)

** AS : fraction alcalino-soluble.

3. Nature des substances humiques

Afin de comparer nos données avec celles d'autres études sur les MO des sols, les proportions d'AF, AH et humine seront exprimées ici en pourcentage du C de la fraction < 50 µm.

La Fig. 33 montre dans l'ensemble trois catégories de répartition du C entre les fractions AF, AH et humine. L'Andosol de référence et le podzol sont caractérisés par une distribution assez similaire du C dans ces trois fractions et des rapports AF/AH d'environ 1,3. Le sol brun andique et le sol brun ocreux, un peu moins riches en C total, montrent une prédominance d'humine (~ 60 %), avec peu d'AF (20 à 30 %) et d'AH (~ 10 %) et des rapports AF/AH d'environ 2,3. *L'Andosol vosgien occupe une position intermédiaire entre ces deux groupes, mais est plus proche des profils du sol brun andique et du sol brun ocreux par ses teneurs en humine (40 à 50 %) et en AF (20 à 30 %) avec toutefois des quantités d'AH un peu plus importantes (~ 20 %). Quant à ses rapports AF/AH (de 1,1 à 3,7), ils sont dans la gamme de ceux de l'Andosol de référence et du podzol.*

Le coefficient chromatique Q4/6 (ou E4/E6) est déterminé par le rapport des densités optiques à 465 et 665 nm. L'augmentation du degré d'humification, assimilé à l'augmentation du degré de condensation et d'aromaticité des composés humiques, provoque une diminution du Q4/6 (BARRIUSO, 1985). Les Q4/6 des extraits alcalino-solubles et AH (Tab. 22) sont relativement faibles (3,3 à 12,2) reflétant une nature plutôt condensée et sûrement aromatique de ces MO.

4. Comparaison avec d'autres sols

Nous pouvons à présent confronter nos données avec celles obtenues pour d'autres Andosols. Par exemple, MOINEREAU (1977) a obtenu des résultats semblables concernant les taux d'humification (> 80 %) sur les Andosols du Velay-Vivarais-Coirons, avec des taux d'extraction alcaline un peu plus élevés (52 à 77 %) et des rapports AF/AH le plus souvent inférieurs à 1. De même, FAIVRE (1988) a observé des taux d'humification similaires et environ 52 à 67 % d'alcalino-solubles dans un Andosol de Colombie, avec des rapports AF/AH de 1,05 à 1,13.

Pour comparaison avec les sols de la série sols bruns - podzols sur roches cristallines des Vosges, nous examinerons les résultats de SOUCHIER (1971) sur l'horizon A₁/(B) du sol brun acide d'Hohrodberg et les horizons Bh du sol ocre podzolique de Rudlin et du podzol humo-ferrugineux de Klighenthal. Dans le sol brun acide, l'humine constitue la majorité de la fraction humifiée (45 %) et la fraction AH est assez peu abondante (< 20 %). Le taux d'humification est assez élevé (71 %) et le rapport AF/AH d'environ 2. L'humine ne constitue plus que le tiers de la fraction humifiée du sol ocre podzolique où les AF dominent (> 40 %). Ici, le taux d'humification augmente (81 %) et le rapport AF/AH est de 1,7. Enfin, dans le Bh du podzol, le taux d'humification est très important (95 %) et la fraction humifiée est composée principalement d'AF (83 %), de peu d'AH (13 %) et très peu d'H (4 %). Les rapports AF/AH sont donc très élevés (6,7). GUILLET (1972b) a également obtenu des rapports AF/AH voisins (en moyenne 6,4) et des taux d'extraction d'environ 67 % sur des Bh de podzols sur roches cristallines.

5. Conclusions

En conclusion à cette phase de caractérisation des MO de notre Andosol vosgien, il apparaît que ce profil présente des caractères assez classiques dans les Andosols. Ainsi, dans ce profil, la plus grande partie du C se trouve sous forme humifiée (< 50 μm). Notons que cette forte proportion de C humifié est un trait commun aux sols étudiés ici, les différences résidant alors dans la teneur en C total et dans les rapports C/N. *Les MO de cet Andosol des Vosges se trouvent en position intermédiaire entre celles de l'Andosol de référence et du Bh de podzol (abondance de C total et répartition plus ou moins équivalente dans les fractions AF, AH et humine) et celles des horizons A1B du sol brun andique et du sol brun ocreux (moins riches en C total et à très forte proportion d'humine).* Globalement, la teneur en composés alcalino-solubles est plus faible dans notre Andosol vosgien (40 à 55 %) par rapport à d'autres Andosols (50 à 70 %), le rapprochant en cela des sols brunifiés. D'un autre côté, les rapports C/N élevés et AF/AH voisins de 1 témoignent de la faible biodégradation de ces substances humiques et rappellent les caractères du Bh du podzol étudié ici. Les autres sols de la série sols bruns - podzols sur roches volcaniques sont dans l'ensemble en assez bon accord avec les données de la littérature sur ces sols développés à partir de roches cristallines.

CHAPITRE III - LIMITES ET ANALOGIES DES DIFFÉRENTS PROCESSUS DE PÉDOGENÈSE

Le but de cette étude était, dès lors que l'existence d'Andosols avait été démontrée dans le Massif Vosgien, d'examiner l'originalité de ces sols, certes peu représentés, dans un contexte pédogénétique général de brunification et podzolisation. Nous allons à présent examiner les limites et les analogies existant entre les processus classiques des Vosges, brunification et podzolisation, et ce processus d'andosolisation plus rare. A cet effet, nous rappellerons tout d'abord rapidement quelques généralités sur les modes d'action de ces trois processus.

Andosolisation

*Les Andosols sont caractérisés par une abondance d'Al et Fe dits "actifs" ou "amorphes" libérés massivement par altération des roches mères. "C'est la vitesse de l'altération du matériau qui est à l'origine" de ce processus appelé "andosolisation" par DUCHAUFOR (1983). Ainsi, les Andosols les plus typiques se rencontrent sur les matériaux les plus rapidement altérables comme les cendres ou scories volcaniques, finement divisées et offrant une très grande surface de contact, et riches en verres volcaniques très peu résistants à l'altération. Ils peuvent également se rencontrer sur des matériaux moins favorables (non vitreux, massifs ou entièrement cristallisés) mais leurs propriétés sont alors moins accentuées. Les hydrosolubles libérés par les litières solubilisent Fe et Al par une altération de type acidolyse ou complexolyse (DUCHAUFOR, 1983). Les complexes formés sont ensuite rapidement insolubilisés (par augmentation du rapport cation/anion) et les migrations en profondeur de Al, Fe et C sont très faibles (UGOLINI *et al.*, 1988 ; UGOLINI & DAHLGREN, 1991) permettant une grande accumulation de ces composés. Cette accumulation de MO est une autre propriété caractéristique des Andosols où elle est stabilisée soit par le biais de la formation de complexes Al-humus, soit par sorption sur des minéraux peu ou mal cristallisés (allophanes, imogolite, ferrihydrite) (SHOJI *et al.*, 1996). Dans les environnements riches en MO, les acides organiques contribuent à diminuer le pH (pH < 5) et des complexes Al-humus sont préférentiellement formés, inhibant ainsi la formation de minéraux allophaniques. Dans les environnements moins acides (pH > 5), l'Al peut polymériser et coprécipiter avec la silice pour former des minéraux allophaniques. Selon UGOLINI & DAHLGREN (1991), ces minéraux se forment *in situ* dans les horizons B des Andosols sous l'action d'une altération par les acides carboniques (non complexants de l'Al). Cette accumulation de MO et d'éléments métalliques dans les horizons A des Andosols est "l'essence du processus d'andosolisation" (UGOLINI *et al.*, 1988).*

Brunification

Les modes d'action de ces processus ont déjà été abordés dans la première partie de cette étude. Rappelons que la brunification se rencontre sous des climats tempérés atlantiques ou semi-continentaux et sur des matériaux variés contenant des quantités suffisantes d'oxydes de fer et d'argiles fines. SOUCHIER (1971) a établi une valeur seuil de teneur en Fe de la roche mère ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4\%$) au-dessus de laquelle la brunification est la règle (dans le Massif Vosgien). La brunification correspond à une altération de type hydrolyse acide ménagée et progressive (DUCHAUFOR, 1983). Le Fe libéré par la roche mère intervient dans la formation d'agrégats argilo-humiques, au sein de l'horizon A_1 , très stables et peu mobiles. Les agents complexants étant insolubilisés dès l'horizon A_1 , les migrations sous forme de complexes sont très réduites dans ces sols.

Podzolisation

Ce processus a été abondamment étudié et nous avons déjà mentionné les travaux de SOUCHIER (1971) dans le Massif Vosgien dans la première partie de cette étude. Les podzols se généralisent en climat froid (boréal ou alpin) mais existent également dans les zones tempérées, et notamment en climat montagnard, ou occasionnellement dans les régions tropicales (DUCHAUFOR, 1983). Ils se développent à partir de matériaux pauvres en argiles et Fe et généralement acides. Ces climats froids favorisent la formation d'humus de type mor qui fournissent des quantités importantes de composés organiques solubles qui migrent en profondeur. Ces composés, très agressifs, provoquent une altération par complexolyse des silicates libérant des éléments métalliques. La silice migre par voie soluble et Al et Fe sous forme de complexes solubles et mobiles de faible rapport cation/anion. Avec l'augmentation de ce rapport, ces complexes s'insolubilisent finalement au niveau des horizons B. Cet horizon se subdivise en deux parties : un horizon Bh contenant plutôt des AH et Fe et un horizon Bs à AF et Al dominants. En parallèle de ce schéma assez simple, différentes théories portant sur ce mécanisme de podzolisation ont été proposées, notamment pour expliquer la présence d'allophanes et imogolite dans les horizons B. UGOLINI & DAHLGREN (1991) ont recensé ces théories et ont proposé une nouvelle hypothèse. La théorie Fulvate fait intervenir la complexation de Al et Fe par des AF produits par les litières. Les chélates formés migrent et sont arrêtés au sommet de l'horizon Bs où la partie organique du complexe est décomposée libérant Al et Fe. Ces éléments migrent alors au travers de l'horizon Bs et peuvent se combiner à la silice en solution pour former des allophanes ou de l'imogolite. Dans la théorie de FARMER des "proto-imogolites" sont formées dès l'horizon E puis migrent sous forme soluble et sont arrêtées en Bs. Des AF ayant migré au travers des horizons E et Bhs viennent ensuite précipiter sur les imogolites de l'horizon Bs. La théorie avancée par UGOLINI & DAHLGREN (1991) propose, dans un premier temps, la formation d'acide carbonique par réaction de l'eau et du CO_2 produit par l'activité des organismes et racines. L'altération des minéraux par H_2CO_3 libère Al sous forme amorphe qui peut se combiner avec la silice pour former des allophanes et imogolite *in situ*. Puis les complexes organo-métalliques AF-Al, Fe migrent au travers du profil et sont arrêtés au niveau de l'horizon Bs par interaction avec ces composés amorphes. En fait, quelle que

soit la théorie considérée, elle implique toujours des phénomènes de migrations. Le transfert de Al, Fe et de C organique dissout depuis les horizons A et leur accumulation dans les horizons illuviaux sont "l'essence du processus de podzolisation" (UGOLINI *et al.*, 1988).

Nous pouvons à présent examiner les conditions de développement de ces divers processus dans le Massif Vosgien. Nous avons vu dans la seconde partie de cette étude que les facteurs limitants de l'andosolisation dans les Vosges étaient principalement les facteurs roche mère et climat. En effet, le développement de ce processus nécessite les roches mères les plus facilement altérables et des conditions fortement et constamment humides. Dans cette troisième partie, tous les sols observés ont été choisis dans des environnements bioclimatiques comparables en termes d'altitude, température, précipitations *etc...* Les conditions climatiques étant alors similaires, l'effet du facteur roche mère est plus facilement observable et semble jouer ici un rôle considérable. *Ainsi, le développement de l'andosolisation est conditionné par une altération rapide des roches mères qui libèrent de grandes quantités d'Al et Fe ; des pertes en Ca et Mg s'observent simultanément. Il s'agit donc d'une altération des silicates calciques et/ou magnésiens (ferro-magnésiens), en l'occurrence des plagioclases, chlorites... Ces roches sont donc basiques ou ultrabasiqes, riches en minéraux altérables et de RTB élevée.*

Inversement, les roches riches en silice, acides (> 66 % SiO₂), sont pauvres en Fe, Mg et Ca et donc de faible RTB. Les minéraux facilement altérables sont alors plus rares et des cristaux de quartz sont généralement présents. Ces roches sont donc moins facilement altérables et peu propices au développement du processus d'andosolisation. Par contre, elles sont favorables, par une acidification de milieu, à la podzolisation. Nos sols podzolisés (sol brun ocreux et podzol) se développent ainsi sur des roches acides (> 74 % SiO₂) et de faible RTB où le K domine (feldspaths potassiques difficilement altérables). Quant aux roches mères des sols bruns, elles présentent un chimisme intermédiaire (entre 52 et 66 % de SiO₂) et des RTB moyennes, où Mg domine. La roche mère peut ainsi conduire la pédogenèse vers l'un ou l'autre de ces processus.

Nous allons à présent nous attacher à recenser les particularités de notre Andosol vosgien par rapport à celles de l'Andosol de référence du Massif Central (Chaîne des Puys) et à celles des autres sols vosgiens pour tenter d'établir les modes d'expression de ce processus d'andosolisation dans cet environnement vosgien.

Tout d'abord, nous pouvons examiner l'état du complexe d'échange de ces sols. On constate clairement une très forte similitude entre tous les sols vosgiens. Ils sont ainsi caractérisés par une forte acidité qui s'accroît entre l'Andosol et les sols podzolisés. Le complexe d'échange montre d'ailleurs, outre une assez forte proportion de protons dans les horizons de surface de ces sols podzolisés, une forte prééminence d'Al. Ces sols acides et désaturés reflètent les conditions du milieu

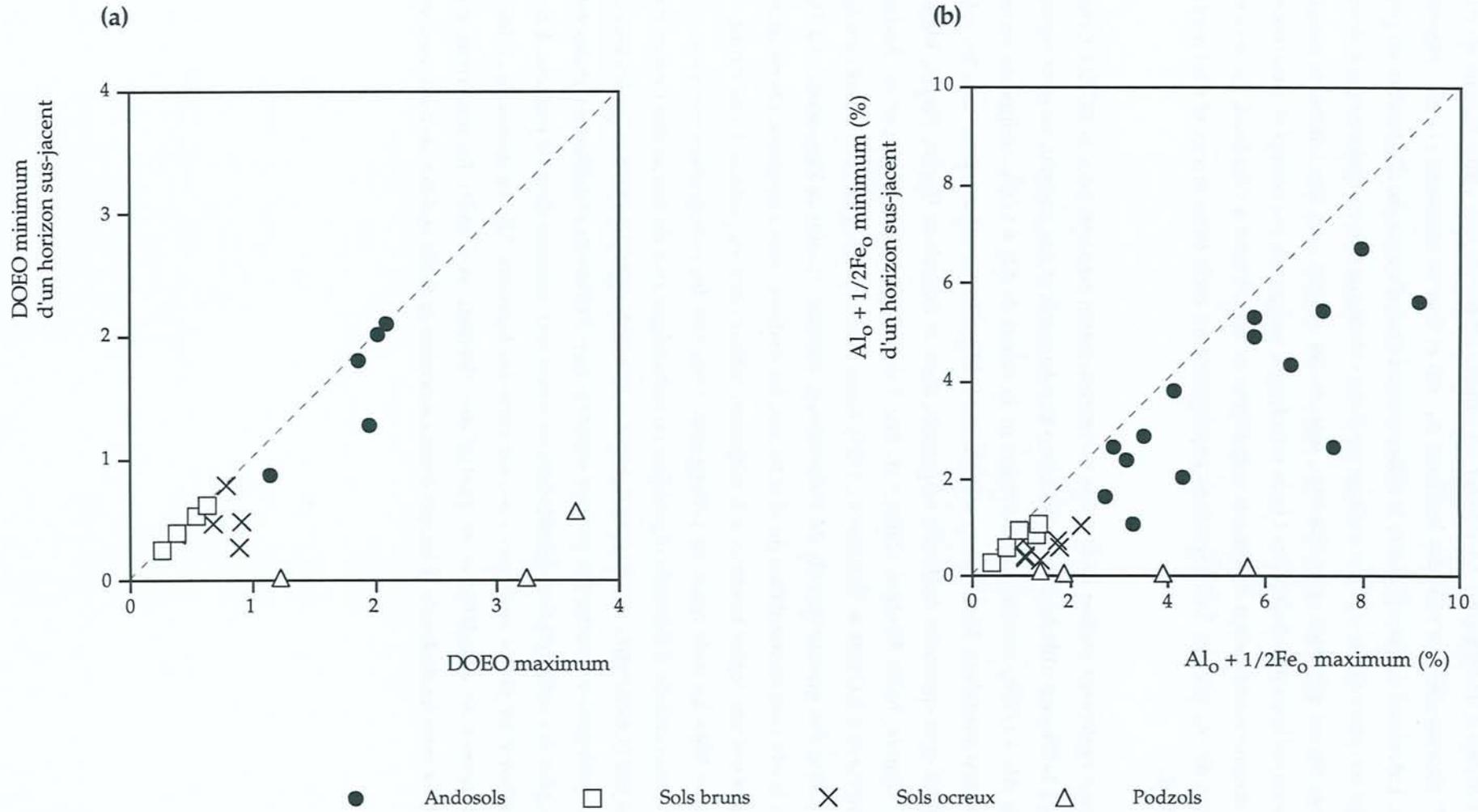
très humides dans cette région des Vosges, favorisant une lixiviation des bases. L'Andosol vosgien diffère de l'Andosol de référence qui montre au contraire des pH beaucoup moins acides et une saturation du complexe d'échange par Mg et surtout Ca, en relation étroite ici avec la roche mère (de RTB très élevée dominée par Ca et Mg).

Les teneurs globales en MO sont toujours assez élevées dans tous ces sols de région montagnarde (Vosges et Chaîne des Puys). De même, les rapports C/N de tous ces profils augmentent en profondeur. Ici, l'Andosol vosgien se situe en position intermédiaire entre d'un côté l'Andosol de référence et le sol brun (C/N bas) et d'un autre côté les sols podzolisés (C/N élevés), traduisant une biodégradabilité des MO intermédiaire. Une observation un peu plus détaillée de ces MO fait apparaître des analogies entre l'Andosol vosgien et le sol brun ou le sol brun ocreux (forte proportion en humine et assez faible en AF). Mais cet Andosol vosgien présente également des similitudes avec le podzol et l'Andosol de référence (proportions d'AH un peu plus importantes, rapports AF/AH). *Les MO de l'Andosol vosgien se rapprochent donc, par leur nature, de celles des sols brunifiés, mais leur biodégradabilité potentielle rejoint celle des MO des podzols et de l'Andosol de référence.*

Si ces MO sont semblables entre l'Andosol et le podzol, il n'en est pas de même de leur mobilité. Cette mobilité peut être appréciée par l'évolution de la DOEO en profondeur. On remarque un comportement intermédiaire de l'Andosol vosgien avec d'une part le sol brun et l'Andosol de référence (absence de migrations) et d'autre part les sols podzolisés (redistributions).

Nous avons essayé de représenter cette migration sur la Fig. 34. En abscisse est reportée la valeur de DOEO maximale du profil, pouvant mettre en évidence un niveau d'accumulation de MO impliquées dans les transferts. En ordonnée est portée la valeur de DOEO minimale rencontrée dans un horizon sus-jacent (excepté les horizons organiques à C > 20 %). Lorsqu'il n'y a aucun transfert (diminution de la DOEO vers la profondeur), nous avons reporté la même valeur maximale sur les deux axes, le point obtenu se trouvant alors sur la bissectrice. Ce mode de représentation permet, à l'image du rapport DOEO B/A de DALY (1982), de mettre en évidence les transferts de MO dans les sols. Sur la Fig. 34a ont été reportés les sols étudiés dans ce mémoire : stations de Château-Lambert, Gsang, Mercoeur, Suc de Bauzon et Pub du Volcan pour les Andosols ; Rossberg, Neuntelstein, Schirmeck et Grendelbruch pour les sols bruns ; Planche des Belles Filles, Goutte des Saules, Tête de Demesy, Blanc Rupt et Malcôte pour les sols bruns ocreux et sols ocres podzoliques ; Charborue Est et Ouest et Schliffstein pour les podzols. On peut observer, des sols bruns aux sols ocreux et aux Andosols et podzols, une augmentation de la valeur de DOEO maximale. Il apparaît également que seuls les podzols sont soumis à une migration significative par rapport aux autres sols.

Fig. 34 - Diagrammes densité optique de l'extrait oxalate maximum (DOEO) et $Al_0 + 1/2Fe_0$ (%) maximum en fonction des valeurs minimales rencontrées dans un horizon sus-jacent.



Enfin, concernant les éléments minéraux, on remarque une forte analogie entre l'Andosol vosgien et l'Andosol de référence. Ce dernier est caractérisé par de très fortes teneurs en Al et Fe "amorphes" s'accumulant au sein des horizons A₁, AB et B et ne subissant aucune migration en profondeur. L'Andosol vosgien présente le même comportement mais avec des teneurs un peu plus faibles. Enfin, on notera que le sol brun andique sur roche volcanique montre également une absence de translocations de ces éléments en profondeur, mais ici les teneurs sont très faibles, et plus faibles encore dans un sol brun non andique (sol brun mésotrophe sur granite par exemple). Ainsi ces sols ne présentent aucune translocation d'éléments métalliques et, du sol brun à l'Andosol, on observe une augmentation de ces teneurs. Les migrations apparaissent au stade brun ocreux et sont maximales dans le podzol.

On peut également utiliser ici le mode de représentation employé pour la DOEO. Comme la somme $Al_0 + 1/2Fe_0$ est utilisée dans la définition des Andosols et des podzols, on peut représenter les relations $Al_0 + 1/2Fe_0$ maximum en fonction de la valeur de $Al_0 + 1/2Fe_0$ minimale rencontrée dans un horizon sus-jacent. Nous avons reporté sur la Fig. 34b ces valeurs pour tous les sols cités précédemment plus quelques Andosols empruntés dans la littérature (Japon, Népal, Etats-Unis, Costa-Rica, Islande, Italie, Madère, Galice : cf. Tab. 2 dans la première partie ; et un Andosol de l'Oregon emprunté à BAHAM & SIMONSON, 1985). Nous avons ajouté également les sols étudiés par JEANROY (1983) sur granite (profils de Hohrodberg, Robinot, Rudlin et Kligenthal). La Fig. 34b montre bien la très forte accumulation de Al et Fe dans les Andosols sans migrations. On remarque que les sols ocreux ont une légère tendance à la migration, ultime dans les podzols. Cette figure, avec la DOEO, illustre bien les trois types de pédogenèse. D'un côté les pédogenèses marquées par une absence de translocations d'éléments organiques ou métalliques avec de très faibles teneurs dans les sols bruns et des quantités très importantes (surtout en éléments métalliques) dans les Andosols ; d'un autre côté la pédogenèse caractérisée par une redistribution d'éléments métalliques par des vecteurs organiques, avec des redistributions faibles dans les sols ocreux, intenses dans les podzols. *A ce stade, on peut souligner les fortes analogies existant entre les horizons AB des Andosols et les Bh de podzols en termes de quantités et de qualité des éléments accumulés (associations organo-métalliques) ou entre les Andosols et les sols bruns concernant la faible mobilité de leurs constituants.*

CONCLUSIONS

L'existence, dans le Massif Vosgien, d'Andosols répondant aux nouvelles normes de classification ayant été confirmée, le but de cette 3^e partie était d'étudier les particularités de tels sols dans cet environnement où les processus de pédogenèse les plus habituellement rencontrés sont la brunification et la podzolisation. Les constituants et les propriétés des ces Andosols ont donc été comparés aux sols typiques des Vosges (sols bruns - podzols) dans des conditions climatiques semblables et sur des roches mères volcaniques plus acides. Cette phase de comparaison a également porté sur les sols plus habituels encore des Vosges (sols de la lignée sols bruns - podzols sur roches cristallines) et sur un Andosol de référence du Massif Central (Chaîne des Puys) développé sur un matériel propice à l'andosolisation (scories basaltiques récentes).

Les conditions climatiques étant similaires, le rôle du facteur roche mère est apparu prépondérant dans l'orientation de la pédogenèse vers l'un ou l'autre de ces processus. Une forte altérabilité des roches, évaluée à l'aide de leur chimisme (faible teneur en silice et RTB élevée) est nécessaire au développement du processus d'andosolisation. Inversement, des roches plus riches en silice et de faible RTB sont plus propices à la podzolisation.

Cette étude comparée a montré que l'Andosol vosgien présente des propriétés semblables à l'Andosol de référence, mais il partage également de nombreux caractères avec les autres sols des Vosges. Ainsi, cet Andosol vosgien, comme l'Andosol de référence, présente une grande richesse en Al et Fe "actifs", accumulés sur une grande profondeur et ne semblant pas être soumis à des phénomènes de redistributions. En revanche, ces éléments sont sous forme d'associations organo-métalliques dans l'Andosol vosgien, alors qu'ils sont engagés dans la structure de minéraux allophaniques dans l'Andosol de référence. Ces associations organo-métalliques se retrouvent dans les sols podzolisés, en quantités bien moindres subissant des phénomènes de migrations. Ainsi, d'un point de vue quantitatif, cet Andosol vosgien est en quelque sorte intermédiaire entre les sols bruns et l'Andosol de référence, mais qualitativement, il se rapproche par ces associations organo-métalliques des sols podzolisés, sans toutefois être soumis à des transferts.

Concernant les MO, on retrouve un peu ces analogies. L'Andosol vosgien présente un comportement intermédiaire entre d'une part les sols bruns et l'Andosol de référence (C/N bas, pas de transferts) et d'autre part les sols podzolisés (C/N élevés, migrations importantes). Au point de vue qualitatif, les MO de cet Andosol présentent également des analogies avec celles du sol brun (fortes teneurs en humine). Mais elles se rapprochent aussi de celles du podzol ou de l'Andosol de référence qui montrent tous deux des MO très semblables en termes de répartition des AF, AH et humine et des

rappports AF/AH. Enfin, cet Andosol, comme les autres sols des Vosges, est caractérisé par une réaction assez acide et un complexe d'échange désaturé en bases et dominé par l'Al. Il s'oppose à l'Andosol de référence, moins acide et saturé en Ca et Mg.

Ces quelques observations montrent que ces différents processus de pédogenèse dessinent en quelque sorte trois grandes directions, avec des similitudes et des différences, caractérisées par : des associations organo-minérales en faibles quantités et sans redistributions dans le cas de la brunification ; des complexes organo-métalliques en très grandes quantités, complexes où la charge métallique est telle que les migrations sont également inexistantes dans le cas de l'andosolisation ; des associations organo-métalliques à faible charge métallique soumises à des phénomènes de migrations dans le cas de la podzolisation. Ainsi, cette 3^e partie nous a permis d'examiner, d'un point de vue essentiellement statique, *l'originalité de ces Andosols vosgiens qui réside dans leurs associations organo-métalliques abondantes et non redistribuées.*

Quatrième partie

DYNAMIQUE DES ASSOCIATIONS ORGANO-MINÉRALES

INTRODUCTION

L'objet de cette 4^e partie est l'étude des caractères propres aux associations organo-métalliques de l'Andosol vosgien. En effet, leur forte accumulation dans cet Andosol peut résulter soit de leur stabilité vis-à-vis des divers processus pouvant conduire à leur disparition (désagrégation, dégradation...), soit de leur faible mobilité ne leur permettant pas d'être évacuées hors du profil, ou bien encore de la conjonction de ces deux phénomènes. Nous allons donc examiner successivement la stabilité et la dynamique des ces associations.

Dans le but de déterminer si ces associations organo-métalliques sont plus stables, ou moins stables, que dans les autres sols (sols bruns, podzols), nous avons effectué différents tests au laboratoire nous permettant d'estimer :

- leur résistance à la désagrégation, ou stabilité structurale,
- leur résistance à la minéralisation, ou stabilité biologique,
- leur temps de résidence dans le sol avant de quitter le système.

Concernant les éventuelles migrations ayant lieu dans les divers sols étudiés, nous avons évalué leur aptitude à la dispersion nécessaire à une migration sous forme particulière. Ces tests de laboratoire ont été complétés par une étude in situ des eaux gravitaires de l'Andosol vosgien. Leur composition peut nous renseigner sur la dynamique des associations organo-métalliques. Des observations micromorphologiques permettent également de confirmer la présence ou l'absence de figures d'accumulation. En outre, elles nous informent sur l'organisation et la nature des agrégats dans ce sol.

Globalement, tous ces résultats nous permettront de mieux approcher le fonctionnement actuel de notre Andosol vosgien.

CHAPITRE I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les différents tests et mesures ont été effectués sur l'Andosol vosgien (station de Gsang) ainsi que sur quelques autres sols ou horizons de sols différents (sol brun andique : Rossberg ; sol brun ocreux : Goutte des Saules ; podzol : Charborue ; Andosol de référence de la Chaîne des Puys : Mercoeur) dans un but de comparaison afin de situer les caractéristiques et la dynamique des associations organo-minérales.

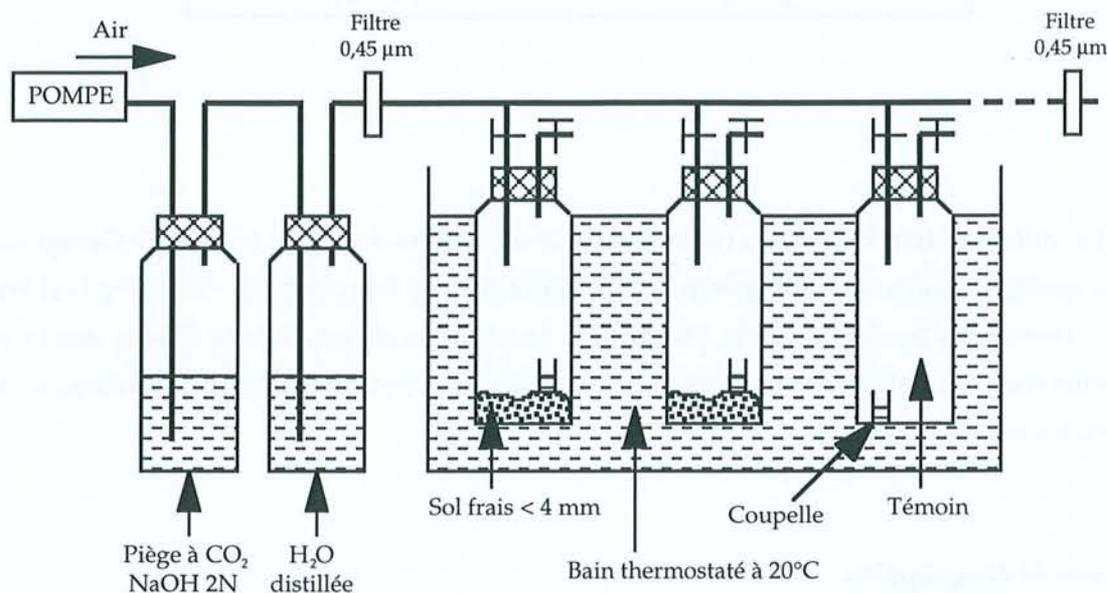
1. Tests de désagrégation

Ces tests de désagrégation, permettant d'estimer la stabilité structurale des sols, ont porté sur tous les horizons des différents profils étudiés. Ils ont été effectués selon la méthode préconisée par BARTOLI *et al.* (1991) avec 3 répétitions par échantillon. Deux grammes de sol sec (tamisé à 2 mm) sont placés dans un tamis circulaire de 200 μm baignant dans environ 2 cm d'eau distillée (~ 200 ml) et soumis à un mouvement rotatif pendant 6 heures. Le taux d'agrégats stables à l'eau correspond à la teneur en sol sec restant sur le tamis (> 200 μm), déduction faite de la teneur en sables grossiers, exprimée en pourcentage de la fraction < 2 mm.

2. Tests de biodégradation

Les tests de biodégradation n'ont porté que sur les horizons A₁B₂ (30-50 cm) de l'Andosol vosgien, A₁B (10-40 cm) du sol brun andique, A₁B (10-30 cm) du sol brun ocreux et Bh (40-50 cm) du podzol, avec 6 répétitions par échantillon. Ces tests donnent une estimation de la stabilité biologique des MO des sols. Quinze grammes de sol frais (< 4 mm), ajustés à 80 % de la capacité au champ, sont introduits dans un flacon sérum de 250 ml où l'humidité est maintenue par une petite coupelle remplie d'eau. Ces flacons sont hermétiquement fermés et mis à incubation dans un bain thermostaté à 20°C pendant 6 semaines (Fig. 35). Régulièrement, l'atmosphère des flacons est prélevée à l'aide d'une seringue et elle est ensuite renouvelée par circulation d'air exempt de CO₂ (piégé par NaOH 2N) et humide (enrichi par passage dans de l'eau distillée). Le contenu de la seringue est injecté dans un BINOS 1004 Gas Analyser, permettant de déterminer la concentration en CO₂ de l'atmosphère des flacons par mesure photométrique de l'absorption du CO₂ dans l'infrarouge (à 2325,6 cm⁻¹). La concentration est rapportée au C du sol et exprimée en ‰ (mg C- CO₂/g C du sol).

Fig. 35 - Schéma du dispositif d'incubation.



3. Mesures d'activité du ^{14}C des MO

Les mesures d'activité du ^{14}C permettent d'estimer l'âge moyen des MO de sols et leur temps de résidence moyen. Elles ont été effectuées sur la fraction $0-50\ \mu\text{m}$ recueillie après un fractionnement physique (cf. 3^e partie) sur les échantillons suivants : horizons A_1B_1 (10-30 cm), A_1B_2 (30-50), A_1B_3 (50-70) et B (70-100) de l'Andosol vosgien, A_1B_1 (30-50) de l'Andosol de référence, A_1B (10-40) du sol brun andique, A_1B (10-30) du sol brun ocreux et Bh (40-50) du podzol.

La méthode de datation est celle décrite par GUILLET (1972a) et les mesures ont été effectuées au laboratoire de Science du Sol de l'INRA de Versailles sous la direction de J. Balesdent. Le C de l'échantillon est progressivement transformé en benzène liquide, bon solvant pour le comptage en scintillation liquide, en respectant les étapes suivantes. La combustion de l'échantillon s'effectue sous oxygène et aboutit à la transformation du C de l'échantillon en CO_2 . Ce gaz est introduit dans une chambre à lithium où il réagit avec du Li fondu pour former du carbure de Li. Après refroidissement, une réaction d'hydrolyse produit de l'acétylène qui polymérise ensuite sous forme de benzène C_6H_6 liquide. Le benzène est mélangé à un liquide scintillateur et compté pendant une centaine d'heures. L'activité de l'échantillon ($A_{\text{éch}}$) est mesurée en coups par minute et les résultats sont exprimés en rendant compte de la variation d'abondance $\delta^{14}\text{C}$ de l'échantillon par rapport à l'acide oxalique standard NBS (A_0) (BALESDENT, 1982 ; BALESDENT & GUILLET, 1982 ; SUHARTA, 1992) selon la formule :

$$\delta^{14}\text{C} (\text{‰}) = \frac{A_{\text{éch}} - A_0}{A_0} * 1000$$

Un $\delta^{14}\text{C}$ positif traduit l'influence de ^{14}C thermonucléaire ; négatif, il permet de déduire l'âge t de l'échantillon par la formule : $t = -8035 \text{ Ln} \frac{A_{\text{éch}}}{A_0}$.

On distingue le temps moyen de résidence (TMR), correspondant à l'âge moyen des MO, du temps moyen de transit, de renouvellement ou encore de turnover, représentant l'âge moyen de ce qui est minéralisé.

4. Tests de dispersion

Ces tests visent à apprécier l'aptitude à la dispersion des argiles et donc indirectement la stabilité des agrégats organo-minéraux ainsi que l'aptitude éventuelle de leurs constituants à la migration. Ils portent sur les horizons A_1B (10-70 cm) et B (70-100 cm) de l'Andosol vosgien, A_1B (10-40 cm) du sol brun andique, A_1B (10-30 cm) du sol brun ocreux, Bh (40-50 cm) du podzol et A_1B (30-50 cm) de l'Andosol de référence. Les quantités d'argiles dispersables à l'eau sont déterminées selon la méthode de GOMBEER & D'HOORE (1971). Des quantités croissantes de sol frais sont mises à agitation (14 h) avec une quantité constante d'eau distillée (200 ml) dans des allonges de 250 ml. Ces suspensions sont ensuite déposées et sédimentent à une température constante de 20°C. Au bout d'une durée déterminée, 10 ml de suspension sont prélevées à la pipette Robinson à une profondeur appropriée (par exemple à 10 cm pour 8 h). Cette fraction, séchée et pesée, correspond aux argiles dispersées. Les suspensions sont ensuite récupérées par siphonage pour des mesures de pH. La fraction non dispersée est tamisée à 2 mm afin de déterminer la quantité de terre fine exacte. Les argiles dispersables peuvent être exprimées en % de la terre fine sèche ou en % de la teneur en argile totale du sol.

5. Analyse des solutions du sol

L'analyse des solutions du sol récoltées par lysimétrie permet d'évaluer les transferts d'éléments en suspension ou en solution dans les sols. Seule la station de l'Andosol vosgien a été équipée de dispositifs lysimétriques en PVC enfoncées horizontalement dans le profil, légèrement inclinées pour permettre l'écoulement des eaux gravitaires. Différentes gouttières ($L = 90 \text{ cm}$; $\varnothing = 3 \text{ cm}$) ont ainsi été placées dans une fosse au niveau de l'horizon A_1 à 5 et à 10 cm de profondeur, dans l'horizon A_1B à 20 et à 30 cm et enfin dans l'horizon B à 70 cm. Ces gouttières sont reliées à un flacon de collecte et les eaux sont recueillies après les épisodes pluvieux. Les eaux du ruisseau voisin drainant le versant, le Waldrunz, sont également prélevées. Dans un premier temps, on mesure les volumes d'eaux gravitaires récoltées. Ces eaux sont ensuite filtrées à $0,45 \mu\text{m}$ et leur pH est mesuré ainsi que leur teneur en C (par un Carmhograph 12 Wösthoff ou sur un Total Organic Carbon Analyser Dohrman DC-190). Enfin, les éléments minéraux comme Fe, Si, Ca, Mg et Mn sont dosés par ICP, Al par un J. Y. 38 ICPAES séquentiel (Inducted Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry) et Na et K par SAA.

6. Confection de lames minces pour observations micromorphologiques

Des lames minces ont été réalisées sur le profil de l'Andosol vosgien pour des observations micromorphologiques. Ces échantillons sont prélevés sur le terrain à l'aide de boîtes de Kubiena en évitant autant que possible les perturbations. Au laboratoire, ces boîtes sont séchées à l'étuve à 30°C puis imprégnées sous vide de résine liquide (Norsodine 2983V). Les échantillons imprégnés sont ensuite laissés à l'air libre et la polymérisation s'effectue en 4 à 5 semaines. Ils sont alors découpés en plaquettes de 10 mm d'épaisseur, progressivement amincies à 60 μm dans une rectifieuse puis manuellement (abrasif à grains fins) jusqu'à $\sim 25 \mu\text{m}$. Ces lames ont été observées sur un microscope optique en lumière naturelle et polarisée.

7. Analyses statistiques

Chaque fois que le nombre de répétitions était suffisant (pour les tests de désagrégation et de biodégradabilité notamment), des analyses statistiques (ANOVA) ont été effectuées avec un risque $\alpha = 1 \%$. Les moyennes ont été comparées deux à deux avec le test de Fisher (Plus Petite Différence Significative).

CHAPITRE II - STABILITÉ DES ASSOCIATIONS ORGANO-MINÉRALES

Nous allons tout d'abord examiner la stabilité des associations organo-minérales de nos sols. Elle a été évaluée selon deux approches, physique (tests de désagrégation) d'une part et biologique (tests de biodégradation) d'autre part, et complétée par un essai de mesure du TMR des MO.

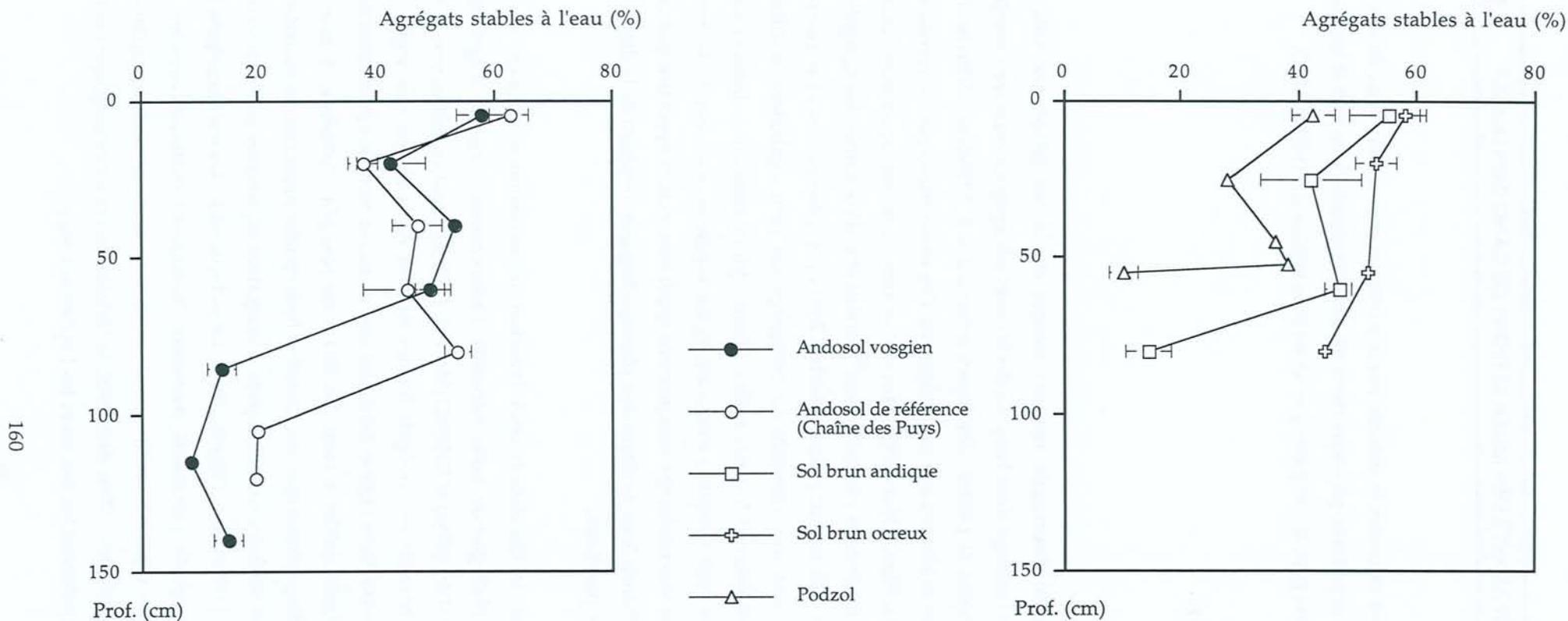
I. STABILITÉ STRUCTURALE

A. INTRODUCTION

Les mesures de stabilité structurale rendent compte de la sensibilité des sols à la désagrégation par agitation et tamisage dans l'eau. La destruction des agrégats dans l'eau résulte de différents mécanismes physiques et physico-chimiques intervenant à différentes échelles de la structure du sol, des particules argileuses aux macroagrégats. Ces mécanismes ont été recensés par TISDALL & OADES (1982) et LE BISSONNAIS (1996). Lorsqu'un agrégat sec est rapidement immergé dans l'eau, il se désagrège en sous-unités plus petites qui peuvent être elles mêmes des agrégats. Cet éclatement est un phénomène courant qui procède de très fortes pressions exercées par l'air piégé dans les capillaires à l'intérieur des agrégats. La désagrégation peut également résulter de phénomènes de gonflement différentiel lors des cycles d'humectation-dessiccation. Dans ce cas, la destruction par gonflement s'accroît lorsque la teneur en argiles augmente, alors que la destruction par éclatement diminue. Enfin, des désagrégations peuvent apparaître sous l'impact des gouttes de pluies ou sous l'influence de phénomènes de dispersion physico-chimique, résultant de la diminution des forces attractives entre les particules.

A l'inverse de la dispersion, la floculation peut favoriser la formation d'agrégats, mais la stabilisation d'agrégats de plus grande taille nécessite l'intervention d'agents d'agrégation, répertoriés par TISDALL & OADES (1982) et CHURCHMAN & TATE (1986). Les argiles peuvent lier les particules entre elles et la taille des agrégats formés dépend de la nature des argiles. Les hydroxydes d'Al et Fe et les associations organo-minérales sont de même reconnus pour cimenter les particules sous forme d'agrégats stables à l'eau. La MO a un rôle plus complexe et peut être considérée comme un agent d'agrégation (par son caractère hydrophobe diminuant la mouillabilité des agrégats) ou de dispersion selon les cas. Les agents d'agrégation organiques sont très variés et agissent à différents niveaux (TISDALL & OADES, 1982). Dans l'ensemble, les microagrégats ($\emptyset < 250 \mu\text{m}$) sont stabilisés par des agents "persistants" (substances humiques aromatiques associées à Al et Fe sous forme de complexes organo-minéraux) ou "transitoires" (polysaccharides rapidement décomposés par les micro-organismes). D'un autre côté, la stabilisation des macroagrégats dépend d'agents "temporaires", principalement les racines et les hyphes mycéliens.

Fig. 36 - Profils de stabilité structurale des sols vosgiens.



B. CARACTÉRISATION DE LA STABILITÉ STRUCTURALE

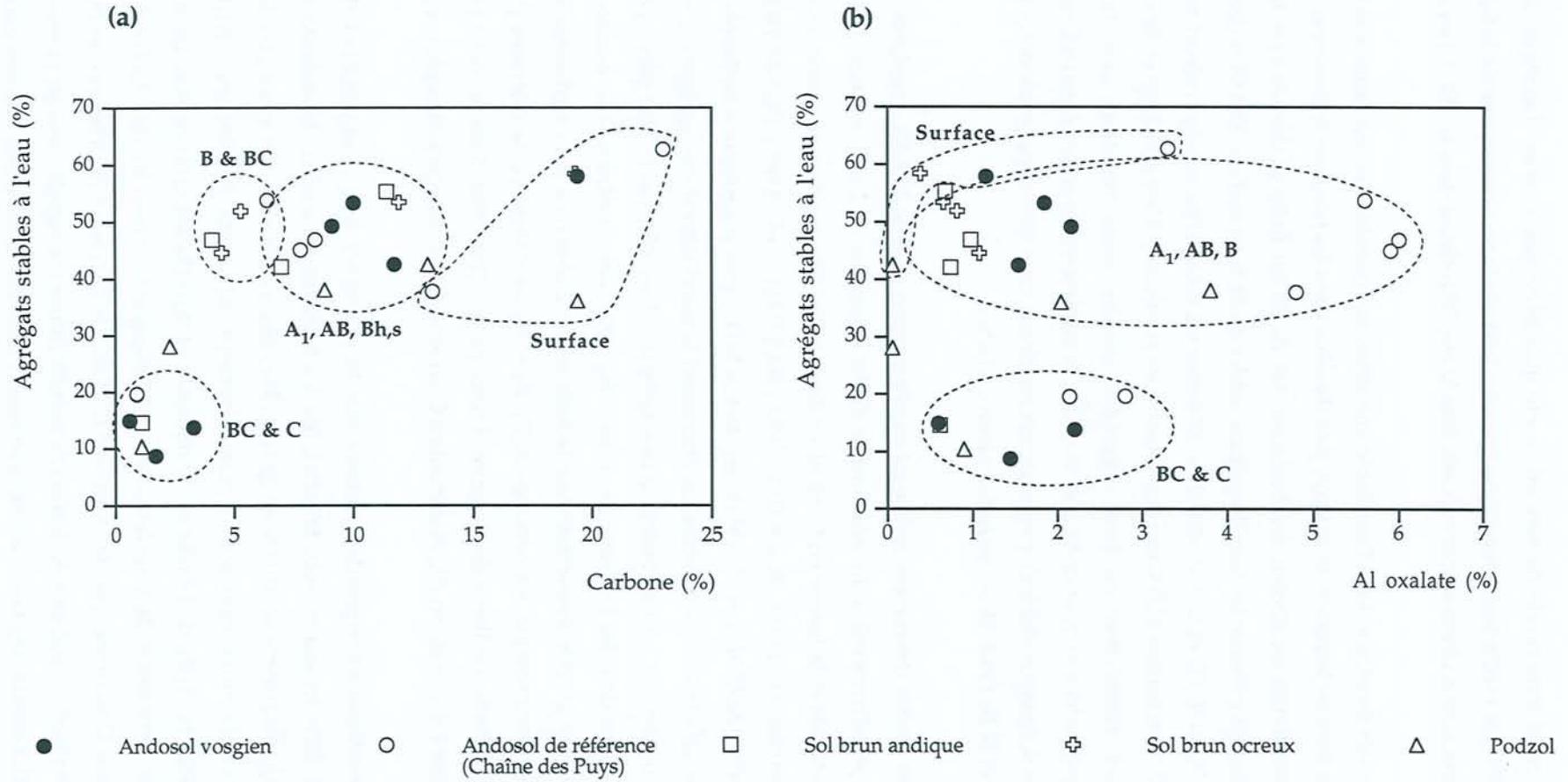
La stabilité structurale de nos sols a été quantifiée par le taux d'agrégats stables à l'eau (agrégats > 200 µm moins teneur en sables grossiers) exprimés en pourcentage de la fraction < 2 mm. Les profils structuraux obtenus sont exposés dans la Fig. 36 (valeurs dans le Tab. VI en annexe III).

Ces profils montrent dans l'ensemble une allure comparable : la résistance à la désagrégation est maximale dans les horizons de surface, puis diminue dans les horizons sous-jacents. Elle passe par un second maximum au niveau des horizons AB, B, Bh ou BhBs et décroît vers la roche mère. L'Andosol vosgien présente un taux d'agrégats stables de 58 % en surface, 43 à 53 % dans les horizons AB et 9 à 15 % en B, BC et C. L'Andosol de référence est caractérisé par des valeurs en général plus élevées (de 63 % en surface à 20 % en profondeur). Les profils du sol brun andique et du sol brun ocreux montrent une diminution du taux d'agrégats stables assez régulière avec la profondeur, respectivement de 55 à 15 % et de 58 à 45 %. Enfin, la stabilité structurale du podzol, moins élevée en surface (43 % d'agrégats stables), passe par un minimum en E (28 %) pour remonter au niveau des horizons Bh et BhBs (36 à 38 %), puis décroît en C (10 %).

Tous les profils structuraux indiquent une diminution globale du taux d'agrégats stables avec la profondeur, parallèlement à la diminution de la teneur en C. Cette relation positive entre la stabilité structurale et la teneur en C, illustrée dans la Fig. 37a, est devenue assez classique et a été souvent reportée (TISDALL & OADES, 1982 ; BARTOLI *et al.*, 1991 ; DUTARTRE *et al.*, 1993 ; KOUTIKA, 1996 ; KOUTIKA *et al.*, 1997). En effet la MO, agent d'agrégation hydrophobe, permet la formation de structures assez stables en diminuant la mouillabilité des agrégats et en ralentissant ainsi la pénétration de l'eau à l'intérieur des agrégats. Il semble que la MO participe à la stabilité structurale surtout dans les horizons de surface (Fig. 37a). Vers la profondeur (horizons AB et B), la MO joue toujours un rôle important mais la forte stabilité observée peut également être reliée à la teneur en Al_o. Par exemple, les horizons A₁B₁, B₁ et B₂ de l'Andosol de référence présentent une forte stabilité structurale liée à des teneurs élevées en Al_o (Fig. 37b). Vers la roche mère (horizons BC et C), les faibles teneurs en Al_o et surtout en C favorisent une désagrégation plus importante.

Les variations inter-profil montrent que la résistance à la désagrégation du podzol est moindre que dans les autres sols. En effet, dès les horizons de surface, la stabilité structurale du podzol est significativement différente (plus faible) des autres sols. De même, les horizons Bh et BhBs (équivalents entre eux) sont significativement différents des horizons A₁B₂ et A₁B₃ de l'Andosol vosgien, A₁B₁ de l'Andosol de référence et A₁B du sol brun ocreux. Ils sont également différents des horizons B de tous les autres sols, excepté l'horizon B₁ de l'Andosol de référence. Enfin, l'horizon C se démarque des horizons C et BC de l'Andosol de référence et BC du sol brun ocreux. Concernant les autres sols, il n'existe aucune différence significative au niveau des horizons A₀A₁ et C. Par contre, les horizons BC présentent tous des différences, hormis entre le sol brun andique et les Andosols.

Fig. 37 - Relations entre le taux d'agrégats stables à l'eau et la teneur en C (a) et en Al oxalate (b) des sols vosgiens.



Dans le cas des horizons B, on observe des différences entre l'Andosol vosgien et tous les autres sols. Enfin, les horizons A₁ et A₁B ne présentent des différences significatives qu'au niveau de l'Andosol de référence (A₁) et les horizons A₁B₂ de l'Andosol vosgien et A₁B du sol brun ocreux. *Ainsi, dans l'ensemble, le podzol présente une stabilité structurale plus faible que les autres sols, qui sont par ailleurs tous assez comparables, excepté l'horizon B de l'Andosol vosgien moins résistant que les autres sols.*

Ces différences sont difficilement attribuables à l'effet de la teneur en C, argiles ou Al_o et Fe_o. Par exemple, l'horizon Bh, bien qu'assez riche en C (~ 19 %), argiles (42 %), Al_o et Fe_o (2 et 1,3 %), présente un taux d'agrégats stables (36 %) plus faible que dans les autres sols. De même, l'horizon BhBs, plus riche en Al_o et Fe_o mais pauvre en C (9 %) et argiles (13 %), possède une stabilité structurale comparable (38 %). A ce niveau, d'autres paramètres comme la mouillabilité ou la porosité doivent intervenir dans la stabilité des agrégats. L'origine des agrégats des horizons spodiques a été étudiée par RIGHI (1977) dans les podzols des Landes du Médoc. Dans le cas de sols mal drainés, l'élaboration d'agrégats résulte de la dégradation sur place, par la faune du sol, des débris racinaires et, pour une partie, de la migration mécanique depuis les horizons supérieurs (horizons Bh meubles). Dans les podzols mieux drainés, ceci fait place à une précipitation de complexes organo-métalliques autour de ces agrégats, favorisant l'induration des horizons spodiques et la stabilisation des agrégats.

Bien qu'ils présentent quelques différences, nos sols montrent des taux d'agrégats stables variant de 35 à 63 % dans les horizons organiques et organo-minéraux, inférieurs à 20 % dans les horizons minéraux. Nous pouvons comparer ces valeurs à quelques-unes choisies dans la littérature (établies pour la plupart selon la même méthode et sur le même appareil de désagrégation). Ainsi, DUTARTRE (1993) a répertorié des stabilités structurales assez faibles dans des sols ferrugineux tropicaux sableux du Mali sur grès (3 à 4 % d'agrégats stables) ou du Burkina Faso sur granito-gneiss (5 à 11 %). Des taux d'agrégats stables plus élevés ont été déterminés sur le sol adhérent aux racines (horizon de surface d'un vertisol du Maroc riche en smectites et carbonates) par AMELLAL (1996) (20 à 50 %) ainsi que par GOMENDY (1996) dans les horizons de surface d'un sol brun lessivé limoneux de Brie (25 à 53 %). PETERSCHMITT (1991) a mentionné également des valeurs assez élevées dans des sols ferrallitiques des Ghâts occidentaux (Inde) riches en kaolinite, gibbsite et oxydes de fer (40 à 60 % en surface, 20 à 60 % en profondeur). Enfin, une très forte stabilité structurale a été décrite par KOUTIKA (1996) sur des oxisols brésiliens riches en kaolinite et gibbsite (67 à 81 % pour les couches organiques, 31 à 47 % en profondeur).

Comparativement, nos sols présentent une assez bonne stabilité structurale jusqu'à des profondeurs assez importantes, très probablement en rapport avec les liaisons organo-minérales de leurs agrégats. Le rôle de ces associations (MO-oxyhydroxydes mal cristallisés) dans l'agrégation de sols de type Andosol et sols acides (sols bruns acides, sols bruns ocreux) a été confirmé par BARTOLI *et al.* (1988 a et b).

II. STABILITÉ BIOLOGIQUE

A. INTRODUCTION

L'étude de l'activité biologique des sols peut être abordée par la mesure de l'activité respiratoire des organismes vivants. La respiration correspond à la dégradation des MO du sol (MOS) se traduisant par un dégagement de CO₂. Ce phénomène de dégradation comprend tout un ensemble de processus complexes, notamment des réactions de polymérisation et d'oxydation, qui permettent de transformer les grandes molécules et substances humiques complexes en molécules plus simples et plus petites et en CO₂ (SOLLINS *et al.*, 1996). Le dégagement de CO₂ par les sols en milieu aérobie intègre l'ensemble de ces processus respiratoires qui correspondent à l'activité biologique globale de la microflore hétérotrophe et, indirectement, à l'intensité de la minéralisation des substances organiques (BACHELIER, 1968). L'étude de la minéralisation des MOS par les micro-organismes, ou biodégradation, renseigne sur l'activité biologique des sols et donc sur la stabilité biologique de leurs MO.

SOLLINS *et al.* (1996) ont dressé l'inventaire des très nombreux facteurs qui peuvent favoriser la stabilisation des MO, ou au contraire leur déstabilisation. La stabilisation est ainsi contrôlée par trois grands types de facteurs :

- Certains facteurs agissent par l'augmentation de la récalcitrance des MO, qui dépend de la nature chimique même des MOS (composition, groupements fonctionnels, structure...). Ces caractères influencent la décomposition des MOS par les micro-organismes qui procèdent à une dégradation sélective en utilisant les composés les moins récalcitrants. De plus, lors de la dégradation, une partie du C est transformé en énergie et l'autre partie est synthétisée pour former de nouveaux tissus ou des métabolites, qui peuvent eux mêmes présenter des récalcitrances très variables.

- D'autres facteurs interviennent également dans la stabilisation des MOS par l'augmentation des interactions entre ces MO et des substances organiques ou non.

- Ainsi, les polysaccharides produits par les bactéries et champignons peuvent lier les débris organiques aux particules minérales.

- Les interactions résultent aussi de phénomènes de sorption ou de précipitation. Les argiles, les alumino-silicates cryptocristallins et les sesquioxydes représentent la plus grande majorité des surfaces de sorption dans les sols. Ces surfaces présentent des charges permanentes ou variables et, dans ce dernier cas, la sorption de composés organiques sera fortement influencée par le pH. De même, l'addition de cations peut avoir un effet sur la sorption car ils constituent des ponts entre les composés organiques et les argiles chargés négativement.

- Enfin, les réactions de complexation entre Al³⁺, Fe³⁺ et les substances organiques permettent également une stabilisation de ces MO, pouvant se traduire par une accumulation de ces composés.

- Certains facteurs permettent la diminution de l'accessibilité des MO. Par exemple, l'agrégation limite l'accès des MO aux micro-organismes par une protection physique, mais elle agit aussi en limitant la respiration (faibles teneurs en O₂ au centre des agrégats).

A l'inverse, la déstabilisation provoque une diminution de la résistance à la dégradation des substances organiques. Elle est contrôlée par différents facteurs qui interviennent par diminution de la récalcitrance (dépolymérisation), diminution des interactions (dissolution ou désorption des composés organiques) et augmentation de l'accessibilité (désagrégation, labours par exemple, provoquant une destruction physique des agrégats qui offrent alors une plus grande surface à l'attaque microbienne).

B. CINÉTIQUES DE MINÉRALISATION DU C

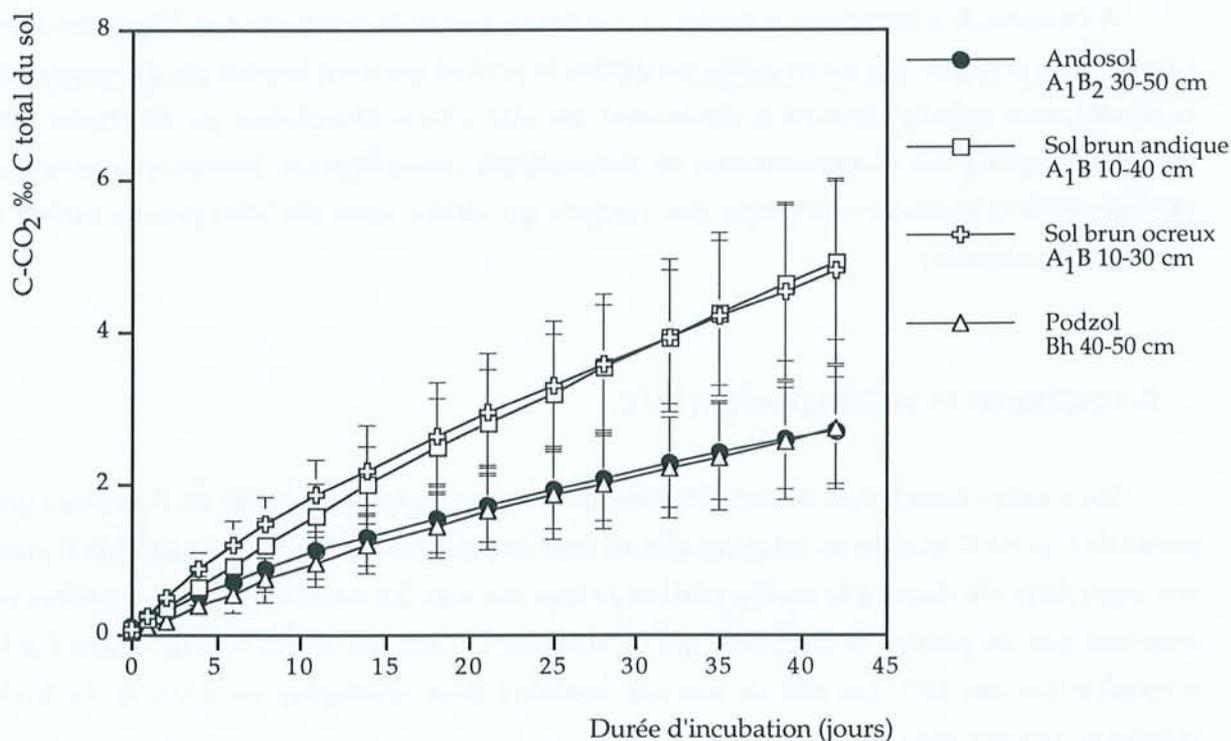
Les courbes cumulatives de minéralisation du C sont exposées dans la Fig. 38. Il apparaît que moins de 8 ‰ du C total du sol est minéralisé au bout de 6 semaines d'incubation à 20°C, indiquant *une assez forte résistance à la biodégradation de tous nos sols*. En outre, les courbes cumulées ne montrent pas de plateau et suggèrent que le stock de C n'est pas ici un facteur limitant à la minéralisation des MO. Les MO de nos sols semblent donc résistantes vis à vis de l'activité minéralisatrice des micro-organismes.

Un examen plus attentif révèle que deux comportements se distinguent assez rapidement. En effet, *les MO des horizons A₁B₂ de l'Andosol et Bh du podzol sont moins biodégradées que celles des horizons A₁B du sol brun andique et du sol brun ocreux*. De ce point de vue, la similitude de minéralisation entre l'Andosol et le podzol d'une part et entre le sol brun andique et le sol brun ocreux d'autre part, ainsi que les différences entre ces deux groupes, deviennent significatives à partir du 11^{ème} jour d'incubation. Pendant les premiers jours d'incubation, les valeurs de l'Andosol et du sol brun andique sont comparables entre elles et significativement différentes des autres sols. C'est au 8^{ème} jour que les valeurs de l'Andosol rejoignent celles du podzol, et au 11^{ème} jour pour le sol brun andique et le sol brun ocreux. Au bout de 42 jours, la minéralisation du C a atteint ~ 4,8 ‰ du C total du sol dans les horizons A₁B du sol brun andique et du sol brun ocreux contre ~ 2,7 ‰ dans les horizons A₁B₂ de l'Andosol et Bh du podzol. Les taux de minéralisation du C peuvent être estimés grâce à une droite de régression fonction du temps d'incubation (t) selon l'équation :

$$C-CO_2 \text{ ‰ } C \text{ total} = a * [\text{Log}(t)]^3 + b \quad (\text{BOUDOT } et \text{ al., } 1986)$$

Les équations obtenues pour chaque sol sont reportées dans le Tab. 23. Elles ont été établies sans tenir compte du flux de CO₂ produit durant les trois premiers jours qui correspond à la décomposition d'une biomasse microbienne lysée (CHRISTENSEN, 1987).

Fig. 38 - Courbes cumulatives de minéralisation du carbone des sols vosgiens lors d'une incubation à 20°C pendant 6 semaines.



Tab. 23 - Equations des droites de régression et charge métallique des sols.

Echantillon	Droite de régression	R ²	C _t /Al _p +Fe _p *
Andosol A ₁ B ₂ 30-50 cm	Y = 0,526 X + 0,471	0,998	12,5
Podzol Bh 40-50 cm	Y = 0,568 X + 0,279	0,999	15,6
Sol brun andique A ₁ B 10-40 cm	Y = 1,045 X + 0,384	0,999	14,1
Sol brun ocreux A ₁ B 10-30 cm	Y = 0,946 X + 0,722	0,999	19,7

Y = C-CO₂ % C total ; X = [Log(temps d'incubation)]³ - * rapports atomiques.

Les équations des droites de régression du sol brun andique et du sol brun ocreux sont caractérisées par une pente (a = 1,045 et 0,946 respectivement) environ 1,8 fois plus forte que celle de l'Andosol et du podzol (a = 0,526 et 0,568). Ceci confirme d'une part les plus forts taux de minéralisation du C dans le sol brun andique et le sol brun ocreux par rapport à l'Andosol et au podzol et d'autre part les très grandes similitudes dans chaque groupe de sols.

Cette activité minéralisatrice plus intense du sol brun par rapport à l'Andosol a déjà été observée par HETIER (1975). Grâce à diverses expériences, il a pu montrer que ce n'était pas l'absence

de dessiccation qui était à l'origine de l'accumulation de composés humifiés dans les Andosols, ni la seule insolubilisation par adsorption physico-chimique par les composés amorphes. Par contre, l'absorption par enfouissement au sein du complexe amorphes-allophanes-imogolite de molécules organiques les met à l'abri de la biodégradation et leur permet d'évoluer par vieillissement (maturation) vers des formes plus polymérisées. L'ensemble acquiert donc une très grande stabilité et l'activité biologique du sol ne concerne alors que les molécules fraîchement précipitées par une charge minérale modérée.

De même, MARTIN *et al.* (1982) et ZUNINO *et al.* (1982) ont démontré que les composés organiques de sols allophaniques du Chili, ou de sols auxquels des quantités variables d'allophanes ont été ajoutées, sont fortement stabilisés par complexation avec Al et Fe "actifs" à la surface des allophanes. D'autres composés sont capables de stabiliser les substances organiques et BOUDOT (1992) a proposé le classement suivant, par ordre d'efficacité décroissante : hydroxydes d'Al non cristallins \geq Al des complexes insolubles Al-MO \gg allophanes $>$ imogolite. Ces hydroxydes agissent en piégeant et enrobant les molécules organiques par insolubilisation et les soustraient ainsi à l'action des micro-organismes (BOUDOT *et al.*, 1989). Dans les Andosols, le déficit en P disponible, lié aux très forts taux de rétention du P dans ces sols, a été évoqué comme une cause possible de la limitation de la minéralisation par ralentissement de l'activité microbienne (BOUDOT *et al.*, 1986).

Nos résultats sont en assez bon accord avec ceux obtenus par BOUDOT *et al.* (1986) sur une série de sols riches en Al (Andosols et sols acides de montagne). Au bout de 42 jours d'incubation, les taux de minéralisation du C sont plus faibles dans les deux Andosols (Colombie $\sim 1,8$ % C total ; Massif Central ~ 7 %) que dans les autres sols (rankers, sols ocreux et colluviaux de 10,5 à 27,6 %), suggérant l'influence de Al et Fe "amorphes" et des silico-aluminates cryptocristallins sur la minéralisation de la MO.

Dans le cas de nos sols, non-allophaniques ou très pauvres en allophanes, c'est plutôt à la formation d'associations organo-métalliques que doivent être attribués les faibles biodégradations observées dans tous nos sols et surtout dans l'Andosol et le podzol. *Ces associations sont caractérisées par une forte charge métallique comme en témoignent les faibles rapports C_t/Al_p+Fe_p (Tab. 23), leur conférant une très grande stabilité biologique.* Rappelons que ces expériences ont été conduites sans stérilisation puis ré-inoculation des micro-organismes mais avec les populations propres à chaque sol. De plus, le pH de la station du sol brun ocreux est plus faible que dans les autres stations et exerce sans doute une forte influence sur les populations microbiennes. Il est donc délicat d'examiner les différences entre les sols étudiés sans tenir compte de la variabilité introduite par les populations elles mêmes. Mais dans l'ensemble, on peut souligner *la forte stabilité biologique des associations organo-minérales à forte charge métallique de l'Andosol vis-à-vis de la biodégradation dans les conditions du sol, c'est-à-dire par leur propre microflore.*

III. DATATIONS AU ^{14}C DES MOS

A. INTRODUCTION

La MOS est formée d'un ensemble de substances organiques apportées au sol sous forme de litière aérienne ou rhizosphérique qui sont ensuite transformées dans le sol par le biais de la minéralisation ou de l'humification. Etant donné que ces substances organiques présentent des biodégradabilités variables, elles ne se décomposent pas et ne se transforment pas au même rythme. Certaines fractions carbonées sont plus biodégradables que d'autres et disparaîtront plus rapidement. De ce fait, les MOS sont constituées d'entités hétérochrones et les datations au ^{14}C intègrent l'ensemble de ces MO d'âges variés. L'âge obtenu est donc un âge moyen ou temps moyen de résidence (TMR). On considère que les MOS sont formées d'un mélange de MO jeunes et de MO anciennes. Ces dernières sont stabilisées et transformées au contact de la phase minérale. Elles sont affectées d'un cycle de renouvellement très long et sont plus abondantes vers la base des sols. Les MO jeunes sont par contre concentrées vers la surface des sols, où les apports sont maximum, et subissent un recyclage plus rapide. Le TMR obtenu par les datations ^{14}C rend compte de ces différentes proportions de MO d'âges variés. Il reflète la vitesse de renouvellement des MOS et donc en quelque sorte leur stabilité (BALESDENT & GUILLET, 1982 ; GUILLET, 1994).

B. TEMPS MOYENS DE RÉSIDENCE DU C

Les temps moyens de résidence du C dans nos sols sont reportés dans le Tab. 24. Avant d'observer les TMR de nos sols, il convient d'examiner le "temps zéro" c'est-à-dire le point de départ de la pédogenèse. Pour nos sols vosgiens, on peut considérer que la pédogenèse a commencé après la dernière glaciation du Würm, il y a environ 10000 ans. Dans notre station de référence du Massif Central, qui n'a pas été affecté par ces glaciations, la pédogenèse démarre à la mise en place des projections volcaniques. Notre Andosol de référence est situé sur le Puy de Mercoeur et se développe à partir de scories basaltiques noires d'âge compris entre 6000 et 4500 ans, reposant sur la dômite (8200 ans) (HETIER, 1975). Ainsi, bien que les matériaux parentaux de tous nos sols soient d'âges très différents, la pédogenèse a débuté approximativement en même temps.

L'examen des $\delta^{14}\text{C}$ de nos sols montre que trois horizons (A_1B_2 de l'Andosol vosgien, A_1B du sol brun andique et du sol brun ocreux) sont caractérisés par un $\delta^{14}\text{C}$ positif qui traduit une influence notable de ^{14}C d'origine fissiogénique ayant contaminé les MOS. Les TMR sont très courts dans les horizons A_1B du sol brun andique et du sol brun ocreux, environ 286 ± 40 ans. Ils sont également assez courts, bien qu'un peu plus élevés, dans l'Andosol vosgien et présentent un faible gradient d'âge augmentant plus ou moins régulièrement vers le bas du profil, de $\sim 370 \pm 50$ ans en A_1B_1 à $\sim 575 \pm 60$ ans en B. Les TMR sont par contre beaucoup plus longs pour le Bh du podzol ($\sim 1390 \pm 120$ ans) et plus encore dans l'horizon A_1B_1 de l'Andosol de référence ($\sim 3280 \pm 140$ ans).

Tab. 24 - Temps moyens de résidence (TMR) des fractions < 50 µm.

Profil	Horizons	C fraction < 50 µm (%)	$\delta^{14}\text{C}$ (‰)	TMR (Années)
Andosol vosgien	A ₁ B ₁ 10-30 cm	13,2	-9 ± 10	371 ± 50
	A ₁ B ₂ 30-50 cm	11,6	29 ± 10	218 ± 30
	A ₁ B ₃ 50-70 cm	9,8	-17 ± 10	414 ± 55
	B 70-100 cm	5,8	-42 ± 9	574 ± 63
Andosol de référence*	A ₁ B ₁ 30-50 cm	11,2	-276 ± 8	3281 ± 138
Sol brun andique	A ₁ B 10-40 cm	7,7	10 ± 10	284 ± 41
Sol brun ocreux	A ₁ B 10-30 cm	10,4	9 ± 10	288 ± 40
Podzol	Bh 40-50 cm	22,5	-128 ± 9	1393 ± 120

* Chaîne des Puys

Ces derniers résultats sont en assez bon accord avec les datations effectuées par GUILLET (1972b) sur des horizons Bh de podzols humo-ferrugineux des Hautes Vosges (TMR ~ 960 ans). De même, les datations réalisées par HETIER (1975) sur l'horizon (B) (40-50 cm) de l'Andosol de Mercoeur (même station que notre Andosol de référence) ont donné un TMR d'environ 3000 ± 80 ans. Le TMR plus court obtenu pour l'horizon A₁ (20-30 cm) (1680 ± 80 ans) souligne le fort gradient d'âge existant dans ce profil. Les gradients d'âge croissants en profondeur sont assez classiques dans la plupart des sols. Ils peuvent être interprétés comme résultant d'un mélange entre une MO ancienne et stable, présente à la même concentration dans le profil, et une MO récente et labile, en plus grande proportion vers la surface (BALESDENT, 1982 ; BALESDENT & GUILLET, 1982). L'incorporation de cette MO jeune vers le bas du profil a été attribuée au brassage du sol par la faune, mais ce modèle ne peut suffire pour expliquer les très forts gradients d'âge obtenus pour les Andosols.

Les Andosols présentent en effet le gradient d'âge le plus élevé (600 ans/dm) et peuvent stocker des quantités considérables de MO pendant des millénaires (GUILLET, 1990). Dans les zones tempérées, ces sols se situent souvent dans les régions montagnardes dont le climat frais et humide limite la minéralisation des MO. De plus, dans ces sols comme dans les podzols, la phase organique et la phase minérale (allophanes ou hydroxydes d'Al "amorphes" par exemple) sont très fortement liées, se stabilisant mutuellement, et vieillissent ensemble. *On peut attribuer le très long TMR du C de notre Andosol de référence à cette stabilisation par la phase minérale, et il en est probablement de même pour le podzol.* Mais dans ce cas, le TMR est un peu plus court et indique que, si la MO est stabilisée et ancienne, une petite partie a pu être renouvelée par des apports racinaires (très nombreuses racines en Bh), ou par des migrations de C sous forme soluble dans le profil, ou encore par une activité biologique plus active (mais ce dernier point n'a pas été démontré lors des expériences d'incubation). *Les TMR beaucoup plus courts observés dans le sol brun andique et le sol brun ocreux*

résultent d'une activité biologique plus importante et peut être d'une stabilisation plus faible exercée par la phase minérale. Dans le cas du sol brun andique, on pourrait également évoquer le rôle de la faune dans le brassage et le rajeunissement des MOS.

L'interprétation des TMR de l'Andosol vosgien est plus délicate. Nous avons vu que ce sol présentait une bonne stabilité tant structurale que biologique, liée à la formation d'associations organo-métalliques très stables. Toutefois, les TMR sont ici très courts et ne rendent pas compte de cette stabilité. On pourrait évoquer l'influence des MO jeunes apportées par le système racinaire très dense présent dans ce sol. Ces faibles TMR de l'Andosol vosgien, associés à un gradient d'âge peu accentué, pourraient également être attribués à l'action de la faune. En effet, dans ce sol, l'activité des vers de terre et des Enchytréides est très importante et le brassage exercé par ces animaux est un facteur de rajeunissement des MO. En revanche, ceci ne nous permet pas d'expliquer le TMR encore très court (< 600 ans) observé dans l'horizon B assez profond (70-100 cm) car, nous le verrons dans le chapitre suivant, l'activité de ces animaux est beaucoup plus limitée à ces profondeurs.

IV. CONCLUSIONS

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence la forte stabilité des associations organo-minérales de tous les sols étudiés ici. Dans le cas du podzol et des Andosols, la très forte charge métallique de ces associations permet leur insolubilisation sous forme d'agrégats très stables. Ces agrégats présentent une bonne résistance à la désagrégation dans l'eau, légèrement moindre pour le podzol. La formation de tels agrégats soustrait les MO à la biodégradation microbienne et ces sols sont caractérisés par une forte résistance vis-à-vis de l'activité minéralisatrice des micro-organismes. Ces interactions entre les constituants minéraux (allophanes, Al et Fe "amorphes") et organiques permettent une stabilisation et un vieillissement par maturation des MO, se traduisant par de longs TMR pour le podzol et l'Andosol de référence. Dans l'Andosol vosgien, cette stabilisation ne semble pas se traduire par un vieillissement des MO car les TMR sont très courts. Dans le cas du sol brun andique et du sol brun ocreux, on note également une bonne stabilité structurale, mais les associations organo-minérales semblent légèrement moins résistantes à la biodégradation. Ces sols présentent de plus un renouvellement des MO beaucoup plus actif comme en témoignent leurs TMR très courts.

CHAPITRE III - DYNAMIQUE DES ASSOCIATIONS ORGANO-MINÉRALES

Cette étude dynamique concerne les phénomènes de migrations et la mobilité des associations organo-minérales de nos sols. Ils seront évalués sur tous les sols par l'examen de leur aptitude à la dispersion et, seulement sur l'Andosol vosgien, par l'analyse des solutions du sol. Enfin, des observations micromorphologiques réalisées sur cet Andosol compléteront cette étude.

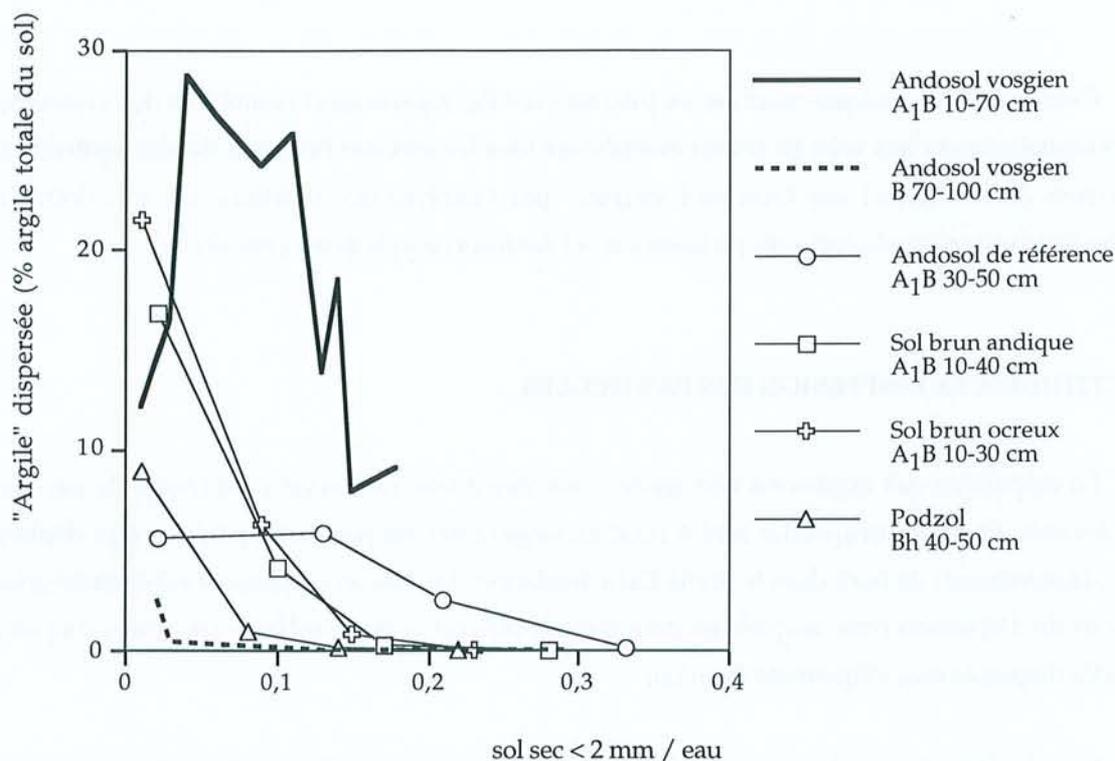
I. APTITUDE A LA DISPERSION DES PARTICULES

La dispersion des argiles est nécessaire à une éventuelle migration sous forme de particules dans les sols. En effet, lorsqu'elles sont à l'état de suspension, les particules peuvent être déplacées par les mouvements de l'eau dans le profil. Cette tendance à la mise en suspension est évaluée grâce à des tests de dispersion pour lesquels on détermine le rapport critique sol/eau au-dessus duquel les colloïdes dispersés mécaniquement flocculent.

Les résultats de ces tests sont illustrés dans la Fig. 39 (valeurs dans le Tab. VII en annexe III) représentant la teneur en argiles dispersées dans l'eau (en pourcentage de l'argile totale du sol) en fonction de rapports sol/eau croissants. Rappelons que la fraction dispersée n'est pas constituée uniquement de particules argileuses mais aussi de quelques particules organiques en suspension.

Les horizons A₁B du sol brun andique et du sol brun ocreux, Bh du podzol et B de l'Andosol vosgien présentent une diminution assez régulière de la proportion d'argiles dispersables pour des rapports sol/eau croissants. Aux plus faibles rapports sol/eau (< 0,1) on observe une dispersabilité des argiles décroissante dans l'ordre : A₁B sol brun ocreux (22 % d'argiles dispersables) > A₁B sol brun andique (17 %) > Bh podzol (9 %) > B Andosol vosgien (3 %). Au-delà, les suspensions sont toutes rapidement flocculées (à des rapports sol/eau de 0,15). L'horizon A₁B de l'Andosol de référence montre une dispersabilité des argiles légèrement plus importante. La teneur en argiles dispersées y est assez constante pour de faibles rapports sol/eau (de ~ 5 à 6 %) puis diminue et la floculation est complète pour un rapport sol/eau de 0,33. Toutefois le nombre restreint de points pour des rapports sol/eau de 0 à 0,1 ne nous permet pas d'affirmer qu'il n'y a pas, entre ces deux valeurs, une dispersion plus importante. Enfin, l'horizon A₁B de l'Andosol vosgien montre les teneurs en argiles dispersées les plus élevées. Elles passent de 12 % pour les plus faibles rapports sol/eau à ~ 29 % pour un rapport sol/eau de 0,04 puis diminuent à 8-9 % pour des rapports sol/eau de 0,15 à 0,2. *L'aptitude à la dispersion des argiles est plus importante dans l'horizon A₁B de l'Andosol vosgien, et ce sur une gamme de rapports sol/eau plus large, que dans les autres sols où la floculation est très rapidement atteinte.* Par contre, la dispersion n'est plus possible dans l'horizon B, flocculé à de très faibles rapports sol/eau (0,03).

Fig. 39 - Test de dispersion à l'eau en fonction du rapport de dilution sol/eau.



Cependant, cette dispersabilité des argiles de notre Andosol vosgien reste modique si on la compare à d'autres sols présentant des phénomènes de lessivage des argiles. Ainsi, GURY (1976, 1990) a observé des quantités d'argiles dispersées pouvant atteindre ~ 70 % dans l'horizon B_{tg} d'un pseudogley podzolique (floculation à partir d'un rapport sol/eau de 0,2) à ~ 100 % dans l'horizon A_{2g} (floculation à un rapport sol/eau > 0,5). L'horizon A_{2B} d'un sol brun lessivé présente des valeurs intermédiaires d'environ 80 % et la floculation apparaît pour un rapport sol/eau de ~ 0,5. Des valeurs très importantes ont également été reportées par GUILLET *et al.* (1979) : 100 % pour un horizon A₂ de podzol, quel que soit le rapport sol/eau. L'horizon A_{1B} d'un sol brun acide montre des teneurs plus faibles mais pouvant atteindre ~ 60 % pour de faibles rapports sol/eau et flocule à partir d'un sol/eau de ~ 0,2. Au vu de ces fortes valeurs, on peut considérer que *dans tous nos sols, les particules argileuses présentent une très faible aptitude à la mise en suspension. Une très légère dispersabilité des argiles est observée dans l'horizon A_{1B} de l'andosol vosgien, mais elle n'apparaît que dans des conditions de très forte dilution jamais rencontrées sur le terrain.*

La floculation des colloïdes peut être notamment favorisée par la présence d'Al³⁺. L'Al cationique est dominant sur le complexe d'échange des sols acides. Il peut être présent soit sous la forme Al³⁺ dans les milieux podzoliques par exemple, ou sous forme d'hydroxy-polymères d'Al en milieu brunifié moins acide (pH > 4,5) (GUILLET *et al.*, 1979). La MO joue également un rôle

fondamental car elle peut être selon les cas dispersante ou floculante. Par exemple, soluble et complexante, elle diminue l'activité des cations alumineux floculants par complexation et ces cations sont alors en trop faibles concentrations pour favoriser la floculation. Par contre, les MO acides favorisent les formes cationiques floculantes (GUILLET *et al.*, 1979, 1981).

Dans nos sols des Vosges, les pH relativement acides des suspensions (Tab. VII) (variant de 3,8 à 4,4 pour le sol brun ocreux, de 4,2 à 4,9 pour le sol brun andique et le podzol et de 4,5 à 5,7 pour l'Andosol) et la forte proportion d'Al sur le complexe d'échange suggèrent un effet des cations alumineux dans la floculation. La MO ne semble pas ici inhiber suffisamment cette activité des cations alumineux pour permettre une dispersion de particules argileuses.

II. TRANSFERTS PAR LES SOLUTIONS DU SOL

L'eau est le vecteur essentiel des transferts de matière en solution ou en suspension dans les sols. Au cours du transit de l'eau dans les sols, les propriétés physico-chimiques et la composition de la solution, siège de très nombreuses réactions, se modifient au contact des constituants du sol. La composition des solutions du sol dépend de nombreux facteurs comme la nature et le degré de division des minéraux altérables, la nature et la concentration des produits d'oxydation des MO, la température et les processus (précipitation-évaporation) réglant la concentration des eaux, le prélèvement ou l'incorporation de matière par les êtres vivants (cycles biologiques) (BOURRIE & LELONG, 1994). De ce fait, l'analyse des solutions du sol permet d'apprécier la dynamique actuelle des sols. L'étude de la composition des eaux gravitaires percolant dans le profil de notre Andosol vosgien pourra donc nous renseigner sur la nature des processus de pédogenèse ayant actuellement cours dans ce sol.

A. REMARQUES GÉNÉRALES

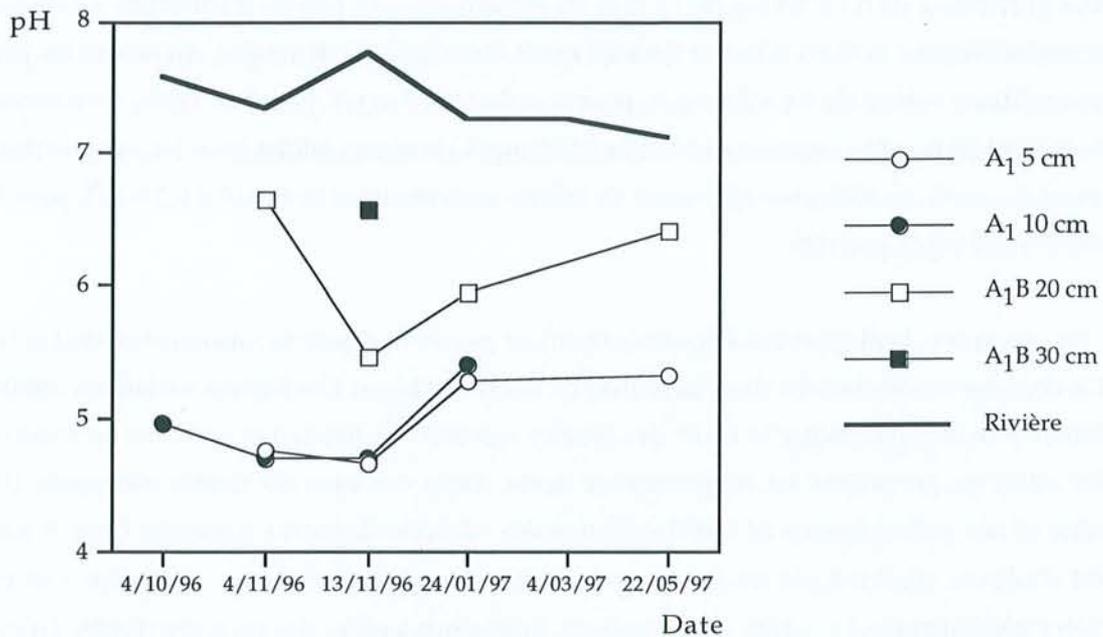
Les volumes récoltés à chaque prélèvement sont reportés dans le Tab. 25. Sur toute la durée cette étude, on n'a pas recueilli d'eau au niveau de l'horizon B (70 cm de profondeur). De même, l'unique récolte au niveau de l'horizon A₁B à 30 cm de profondeur, de très faible volume (20 ml), ne sera pas considérée comme représentative. L'espacement de nos prélèvements, conditionné par la fréquence des épisodes pluvieux, ne nous a pas permis une étude saisonnière fine en raison des faibles précipitations. Nous nous limiterons donc à une étude plus générale en nous attachant plus particulièrement aux teneurs en éléments dissous par comparaison avec d'autres expériences lysimétriques reportées dans la littérature. On notera enfin que les solutions gravitaires obtenues ne montrent pas de particules en suspension.

Tab. 25 - Composition moyenne des eaux de gravité de sols vosgiens.

Horizon	Date	Volume (mL)	pH	Corg.	Al	Fe	Si	Ca	K	Na	Mg	Mn
				(mg/L)								
Andosol vosgien												
A ₁ 5 cm	4/11/96	40	4,76	15,00	0,339	0,067	8,78	2,89	2,0	2,4	0,504	0,035
	13/11/96	15	4,67	12,50	0,550	0,098	6,62	1,55	nd	nd	0,293	0,021
	24/01/97	370	5,28	10,61	0,398	0,091	2,92	0,44	1,1	1,0	0,070	0,015
	22/05/97	150	5,33	13,44	0,364	0,046	4,12	1,22	1,4	1,7	0,223	0,012
A ₁ 10 cm	4/10/96	50	4,97	27,97	0,565	0,112	12,10	1,99	2,1	1,9	0,478	0,038
	4/11/96	100	4,71	19,20	0,712	0,159	8,17	1,71	0,9	3,0	0,421	0,024
	13/11/96	80	4,70	16,25	0,690	0,163	4,90	1,06	0,6	2,4	0,329	0,016
	24/01/97	170	5,40	17,43	0,623	0,162	4,01	0,77	0,9	2,3	0,374	0,022
A ₁ B 20 cm	4/11/96	25	6,65	23,30	1,180	0,638	9,42	1,60	1,9	3,0	0,370	0,020
	13/11/96	85	5,47	10,00	0,704	0,336	5,96	1,48	0,6	2,5	0,361	0,015
	24/01/97	110	5,95	15,81	0,588	0,092	4,78	0,35	0,7	2,8	0,179	0,015
	22/05/97	25	6,40	15,43	0,240	0,006	10,70	1,25	0,9	2,3	0,320	0,007
A ₁ B 30 cm	13/11/96	20	6,57	27,50	0,222	0,061	4,69	1,81	nd	nd	0,248	0,002
Rivière	4/10/96		7,56	2,87	0,000	0,000	5,26	7,95	0,3	2,1	1,080	0,000
	4/11/96		7,32	3,30	0,006	0,000	5,37	6,25	0,3	2,2	0,987	0,003
	13/11/96		7,75	6,25	0,008	0,000	4,77	4,94	0,3	2,1	0,838	0,002
	24/01/97		7,25	3,02	0,009	0,022	5,17	6,02	0,2	1,6	0,999	0,007
	4/03/97		7,25	2,71	0,009	0,000	5,31	4,58	0,2	1,6	0,774	0,004
	22/05/97		7,10	2,66	0,004	0,000	5,68	5,69	0,2	1,7	0,894	0,001
Sol brun acide												
A ₁ ^a			4,18	15,31	3,08	0		8,66	5,51			2,965
A ₁ ^b				15	1,0	0,03		3,5	5,5		0,55	1,1
A ₁ ^c			3,5 - 4,7		0,5 - 2							
Podzol												
A ₁ ^a			3,46	82,8	2,214	0,671		0,96	5,0			tr.
A ₁ ^b				88	1,7	0,6		0,8	5		0,32	tr.
A ₂ ^b				75	2,3	0,88		0,8	5,3		0,34	tr.
A ₂ ^d			3,3 - 4,9	16 - 96	0,3 - 1 ^c							

^a BONNE (1981) ; ^b VEDY *et al.* (1980) ; ^c MAITAT *et al.* (1998) ; ^d BOUDOT *et al.* (1996) ; tr. : traces.

Fig. 40 - Variations saisonnières du pH des eaux gravitaires de l'Andosol vosgien et des eaux de rivière.



B. CARACTÉRISTIQUES DES SOLUTIONS DU SOL

La Fig. 40 représente l'évolution du pH des solutions du sol en fonction de la date de prélèvement. On constate une variation saisonnière modérée, surtout en ce qui concerne les eaux de rivière. Ces variations sont plus marquées pour les eaux des horizons A₁ et A₁B, qui présentent une petite diminution vers la fin du mois de novembre suivie d'une légère remontée à la fin janvier. Les eaux gravitaires des horizons A₁ et A₁B sont caractérisées par des pH moins acides que le pH du sol. Le pH augmente des horizons A₁ (4,7 à 5,4) aux horizons A₁B (5,5 à 6,7), parallèlement au pH du sol. Les pH sont plus élevés dans les eaux de rivière (7,1 à 7,8) (Tab. 25).

Les teneurs en C organique (Tab. 25) dissous sont faibles dans les eaux de rivière (2,7 à 6,3 mg/L) par rapport aux eaux gravitaires. On observe des valeurs assez élevées dans les horizons A₁ et A₁B (10 à 28 mg/L). Les fluctuations saisonnières sont peu accentuées pour les eaux de rivière et plus marquées pour les eaux gravitaires avec une diminution jusqu'au mois de novembre suivie d'une remontée.

Les concentrations en Al, et plus encore en Fe, sont très faibles. Les eaux de rivière présentent des concentrations inférieures à 0,01 mg/L pour Al et 0,02 mg/L pour Fe. Dans les horizons, les teneurs varient de 0,22 à 1,18 mg/L pour Al et de 0,006 à 0,64 mg/L pour Fe. Ces concentrations augmentent légèrement des horizons A₁ (à 5 et 10 cm de profondeur) à A₁B (20 cm). Les fluctuations saisonnières sont peu marquées dans tous les cas. Les teneurs en Si sont beaucoup plus élevées et atteignent 5,7 mg/L dans les eaux de rivière, peu marquées par des variations saisonnières. Au niveau des horizons elles varient de 2,92 à 12,1 mg/L.

De même, les concentrations en Ca sont assez élevées, de 4,6 à 8 mg/L dans les eaux de rivière avec des variations un peu plus accentuées. Les concentrations sont également élevées dans les solutions gravitaires, de 0,4 à 2,9 mg/L. Le K et Na présentent assez peu de fluctuations saisonnières et sont respectivement de 0,2 à 0,3 et de 1,6 à 2,2 mg/L dans les eaux de rivière. Au niveau du profil, les concentrations varient de 0,6 à 2,1 mg/L pour K et de 1,7 à 3 mg/L pour Na. Enfin, les teneurs en Mg (de 0,77 à 1,08 mg/L) et surtout en Mn (< à 0,007 mg/L) sont très faibles pour les eaux de rivière. Au niveau du profil, on n'observe également de faibles concentrations avec 0,07 à 0,5 mg/L pour Mg, inférieures à 0,04 mg/L pour Mn.

En conclusion, la plupart des éléments présentent peu de fluctuations saisonnières, sauf pour C, Si et Ca dont les concentrations diminuent jusqu'à la fin de l'hiver. Ces légères variations semblent en relation avec les apports par la chute des feuilles suivis d'une lixiviation au cours de l'hiver. Le pH des solutions gravitaires est moyennement acide. Celui des eaux de rivière est proche de la neutralité et très probablement lié à la dissolution des vacuoles de calcite présentes dans la roche. Ceci est d'ailleurs confirmé par les fortes concentrations en Ca dans les eaux de rivière. Ces eaux présentent généralement de faibles concentrations, inférieures à celles des eaux gravitaires du profil de l'Andosol, excepté pour Ca et Mg. Ces eaux gravitaires montrent des teneurs assez importantes en Si, moindre en Ca, K et Na, très faibles en Al, Fe et Mg et plus encore en Mn. Les concentrations en C organique dissous sont peu élevées. Les concentrations en Al, Fe, Si et Na augmentent très légèrement en profondeur, contrairement à Ca et K, plus élevés en surface en raison du cycle biogéochimique. Mais dans l'ensemble, *le profil de l'Andosol ne présente pas de migrations de particules en suspension ni d'éléments métalliques ou de C en solution.*

Nous pouvons confronter nos résultats à ceux des nombreux travaux réalisés dans les Basses Vosges gréseuses triasiques sur des sols bruns acides et des podzols par VEDY *et al.* (1980), BONNE (1981), BOUDOT *et al.* (1996) et MAITAT *et al.* (1998) (Tab. 25). Tout d'abord, nos pH sont légèrement supérieurs à ceux obtenus sur des eaux gravitaires de sols bruns et plus encore de podzols. Ceci est sans doute lié à la roche mère, gréseuse dans le sol brun et le podzol, et plus basique (porphyrite andésitique basique) pour notre Andosol. Nos concentrations en C organique dissous se rapprochent plutôt de celles relevées dans un sol brun (~ 15 mg/L) que dans les eaux gravitaires percolant dans un podzol, beaucoup plus concentrées (jusqu'à 60 à 90 mg/L). Il en est de même pour nos teneurs en Fe, très faibles et plus proches de celles d'un sol brun (< 0,03 mg/L) que d'un podzol (> 0,3 mg/L). Par contre, nos concentrations en Al sont plus faibles que dans les deux autres sols, et il en est de même pour le K. Enfin, concernant nos teneurs en Ca et Mn, il semble qu'elles se situent plus près des valeurs rencontrées dans les podzols que dans les sols bruns, où règne une activité biologique plus importante dans les mull. *Au point de vue du fonctionnement, et mis à part cette activité plus faible de l'humus, notre Andosol vosgien se rapproche du sol brun par les faibles teneurs en C et Fe de la solution du sol et l'absence de particules en suspension.* Ces éléments sont insolubilisés dès l'horizon A₁ alors que dans les podzols, où les migrations se font à la fois en suspension et en solution, l'insolubilisation se produit plus bas, au niveau des horizons Bh et Bs.

Ces résultats sont en assez bon accord avec les expériences lysimétriques réalisées par UGOLINI *et al.* (1988) sur deux sols (Andosol et podzol) développés sur des cendres volcaniques au Japon. Dans le cas du podzol, le C organique dissous est mobile et migre sous forme d'acides organiques dissociés capables de former des complexes avec les métaux. Ces complexes organo-métalliques migrent en profondeur et sont arrêtés au niveau des horizons Bw. Dans le cas de l'Andosol, le C organique dissous est arrêté dès l'horizon A et de larges apports par les racines et les litières aboutissent à l'accumulation du C organique dans l'horizon A. La mobilisation de Fe et Al est ici bien plus faible que dans le cas du podzol et ces éléments s'accumulent également dans l'horizon A. Dans le cas de l'Andosol, comme dans le podzol, la présence de minéraux cryptocristallins dans les horizons B est attribuée à une altération in situ. Le Si migre sous forme soluble et s'adsorbe au niveau des horizons B sur les minéraux hydratés de l'Al et Fe. Ceci représenterait une première étape dans la synthèse de l'allophane et de l'imogolite. En conclusion, l'accumulation d'éléments minéraux et organiques dans les horizons A est à la base du processus d'andosolisation, alors que la lixiviation de Al, Fe et C organique dissous à partir de l'horizon A et leur accumulation dans les horizons B caractérisent le processus de podzolisation (UGOLINI *et al.*, 1988). *Dans le cas présent, il n'y a aucune migration significative de C, Al et Fe et c'est donc bien ce processus d'andosolisation qui est actif.*

III. MICROMORPHOLOGIE

Des observations micromorphologiques ont été réalisées sur les horizons A₀A₁, A₁B et B du profil de notre Andosol vosgien. La description suivante a été établie en référence à l'ouvrage de BULLOCK *et al.* (1985).

A. DESCRIPTION MICROMORPHOLOGIQUE

- La microstructure est de type *micro-agrégée intergranulaire*, constituée dans l'ensemble du profil de fragments de roche juxtaposés à des agrégats et micro-agrégats. Elle montre une tendance plutôt grumeleuse en A₀A₁ et A₁B et plus ou moins sub-anguleuse en B. Le type de distribution entre les matériaux grossiers et fins est de type énaulique en A₀A₁ et A₁B et chitonique en B.

- Les agrégats sont très nombreux et appartiennent à deux grands types.

Certains agrégats sont de type sphéroïde de 100 à 2000 µm et assez bien individualisés. Ils sont plus ou moins arrondis, lisses et de très faible degré d'accommodation (où les faces adjacentes des agrégats ne se moulent pas les unes aux autres). Ces agrégats, édifiés par les vers de terre (Planche I : 2-3-4), sont très abondants dans les premiers centimètres du sol, plus fins vers ~ 10 cm de profondeur. Ils sont encore assez importants en A₁B mais beaucoup plus rares en B.

A leurs cotés on trouve de très nombreux micro-agrégats beaucoup plus fins (< 100 µm). Ils sont abondants en A₀A₁ et A₁B où ils sont soit regroupés en plages très poreuses, soit individualisés

et disséminés entre les graviers et les agrégats de vers de terre. Ces micro-agrégats, élaborés par les Enchytréides (Planche I : 1-3-4), sont plus irréguliers et plus petits que les agrégats de vers de terre. Des micro-agrégats très semblables, mais plus clairs, sont abondants en B où ils apparaissent adhérents autour des fragments de roche et probablement d'origine chimique.

Ces agrégats et micro-agrégats sont constitués de *matériel organo-minéral*. Des petits grains de quartz et de plagioclase baignent dans un fond organique fin amorphe marron. En B, ce même matériel, agencé de façon plus lâche, présente des teintes plus claires, vraisemblablement en raison de son contenu moins organique.

- **La porosité** est très importante. La porosité inter-agrégats est principalement constituée de *vides d'entassement* de type composés et ne présentant pas d'orientation particulière. L'horizon B semble un peu plus tassé et de porosité plus fine. La porosité intra-agrégats est plus faible et correspond à quelques vésicules et galeries d'animaux. Certains agrégats en A₁B sont plus poreux et leur agencement est plus lâche en B.

- **Le squelette** est constitué de très nombreux fragments plutôt organiques dans les premiers centimètres, à dominante minérale en A₁B et B.

Les *fragments organiques* sont abondants dans la litière (Planche I : 1-2) : feuilles de hêtre présentant localement des champignons de pourritures blanches, écailles de bourgeons de hêtre, aiguilles de sapin, nombreux organes aériens et racines. Un peu plus en profondeur (~ 5 cm) les débris végétaux sont abondants ainsi que les racines, avec quelques charbons de bois et de très nombreux sclérotés (organes végétatifs de résistance aux conditions du milieu). Au niveau des horizons A₁B, on trouve encore beaucoup de racines et filaments mycéliens, quelques sclérotés et charbons de bois. En B ces tissus sont beaucoup plus rares mis à part quelques racines.

Outre quelques petits cristaux de quartz et de plagioclase disséminés dans les agrégats, la *fraction minérale* est constituée de fragments d'andésite de 1 à 10 mm très fréquents en A₁B et abondants en B (Planche I : 5). Ces graviers sont mal classés, de forme sub-angulaire ou légèrement arrondis. Ils présentent une texture microlitique porphyrique où les phénocristaux de plagioclase (séricitisés et chloritisés) et plus rarement de pyroxène baignent dans une mésostase fortement imprégnée de produits ferrugineux diffus (STUSSI, 1970). Dans les horizons A₁B et B, certains fragments montrent une bordure ferrugineuse sur leur pourtour, précédée d'un liseré plus clair, appauvri en Fe par diffusion (déplétion). D'autres rares fragments présentent des micro-fissures bordées de ferranes et quelquefois plus ou moins comblées de produits d'altération in situ (chlorites). Enfin, la plupart des fragments sont nus mais certains sont revêtus d'un mince liseré ferrugineux rouge-marron, discontinu et irrégulier. Ces rares liserés ferrugineux peuvent provenir de la diffusion du Fe au travers de la roche ou de dépôt par illuviation.

- Le **plasma**, nous l'avons vu, est présent à l'intérieur des agrégats et micro-agrégats et constitué d'un matériel organique amorphe. On y trouve des hyphes mycéliens, des fragments organiques très foncés ainsi que des fragments de tissus végétaux.

- Les **figures pédologiques** sont nombreuses et appartiennent à différents types.

Elles sont de *type textural* en B où elles sont constituées de micro-agrégats qui emballent les fragments de roche, sans structure particulière (Planche I : 5). On observe également des *figures de déplétion* (diffusion de produits ferrugineux) ainsi que des *ferranes* sur le pourtour des graviers. Enfin, des *traces d'activité de la faune* sont présentes dans la quasi-totalité du profil (beaucoup moins en B). Elles correspondent aux galeries creusées dans les agrégats et aux nombreuses déjections sous forme d'agrégats ou de micro-agrégats. Ces déjections peuvent résulter de l'activité des vers de terre (plus grossières et arrondies) ou des Enchytréides (plus petites et irrégulières). Elles sont dans ce cas constituées de matériel organo-minéral et sont abondantes dans le profil. D'autres déjections organo-minérales, un peu moins abondantes, peuvent être attribuées aux collemboles (de la même taille que les déjections d'Enchytréides mais plus arrondies). On observe également plutôt en surface des déjections organiques d'acariens (oribate) (petites déjections arrondies brunes), de diplopodes (ovales) (Planche I : 2) et de diptères (boulettes irrégulières claires).

B. INTERPRÉTATIONS

Ces observations micromorphologiques du profil de l'Andosol vosgien montrent dans l'ensemble *une très forte porosité et une structure de type microagrégée*, que l'on qualifie souvent de floconneuse. Après une litière peu épaisse constituée de nombreux débris végétaux, les premiers centimètres sont composés de *très nombreux agrégats organo-minéraux correspondant à des déjections de vers de terre*. Vers 5 cm de profondeur, ces agrégats sont pour une grande partie *pulvérisés par les Enchytréides* sous forme de micro-agrégats organo-minéraux. Plus bas (~ 10 cm), on retrouve des boulettes fécales de vers de terre mais de plus petite taille et toujours beaucoup de déjections d'Enchytréides. Au niveau de l'horizon A₁B, on observe un mélange plus ou moins homogène entre les agrégats de vers de terre et ceux repris par les Enchytréides, accompagnés de nombreuses déjections de ces derniers et de collemboles. Dans l'horizon B, les fragments de roche sont abondants et juxtaposés à des micro-agrégats qui semblent moins organiques et dont certains se situent sur la paroi des graviers. *Ainsi, il apparaît que la partie supérieure du profil est constituée d'agrégats et micro-agrégats essentiellement d'origine biologique (déjections de la faune du sol) alors que vers le bas du profil (horizon B), leur origine est probablement double, chimique et biologique. De ce fait, la structure microagrégée floconneuse (fluffy) caractéristique des Andosols est ici essentiellement due à l'action de la faune.* Les vers de terre et Enchytréides assurent un mélange des matières organiques et minérales aboutissant à la formation de micro-agrégats organo-minéraux. Enfin, les quelques rares ferranes observées ne permettent pas de conclure à la présence de figures d'illuviation. *Ces observations micromorphologiques confirment l'absence de migrations dans le profil.*

Planche I : Micromorphologie de l'Andosol vosgien (station de Gsang)

Légende :
a : aiguille
c : charbon de bois
dd : déjection de diplopode
de : déjection d'Enchytréides
dv : déjections de vers de terre
f : feuille
g : gravier
ma : micro-agrégat
r : racine

Horizon A₀A₁ (0-10 cm)

1) Vue d'ensemble à ~ 2 cm de profondeur : déjections de vers de terre (organo-minérales) et d'Enchytréides (organo-minérales, plus fines et irrégulières) abondantes accompagnées de très nombreuses racines. Porosité très importante.

2) En surface : grosse déjection de ver de terre (contenant de nombreux débris végétaux) scindée en deux et déjection de diplopode (organique, arrondie et claire), très nombreux débris végétaux (feuilles, aiguilles...).

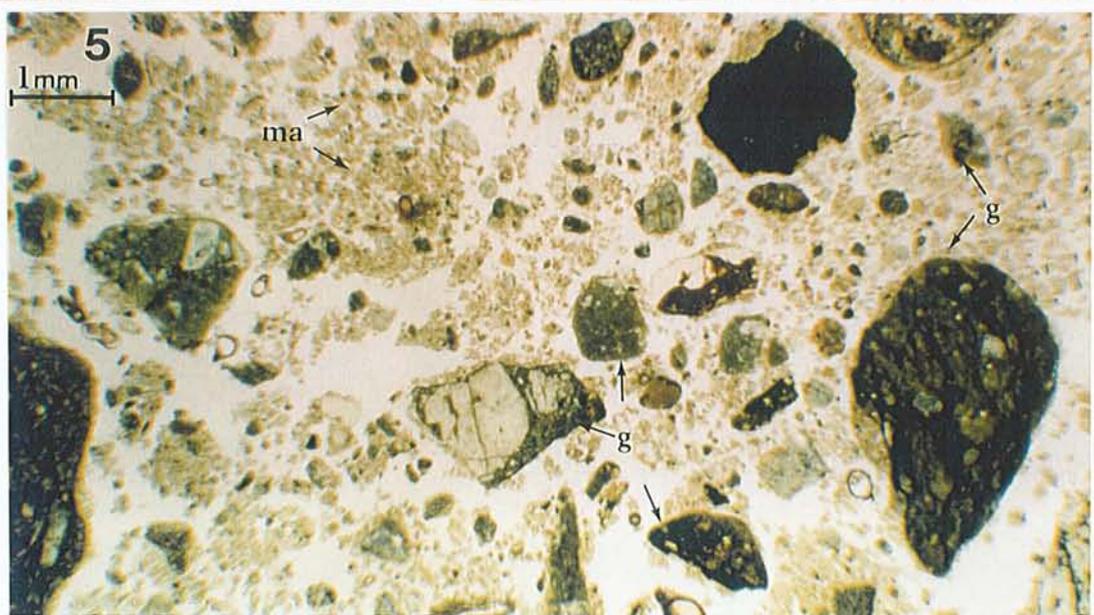
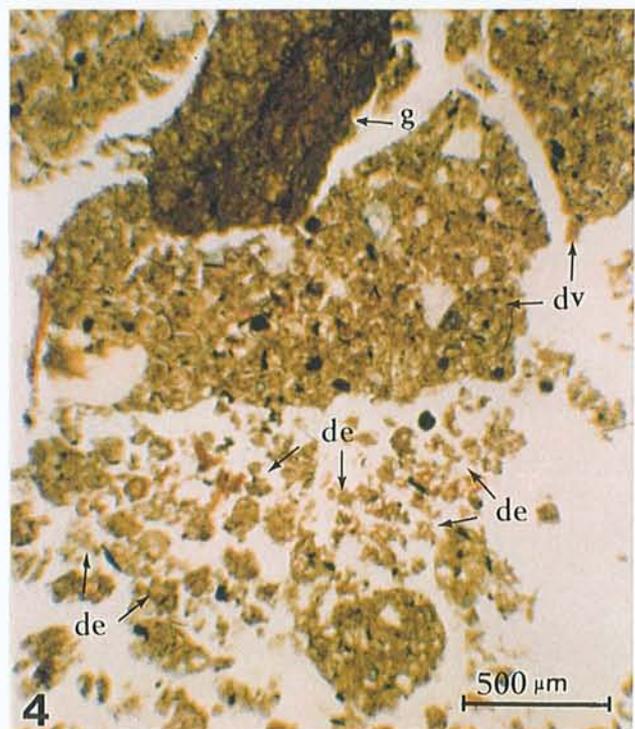
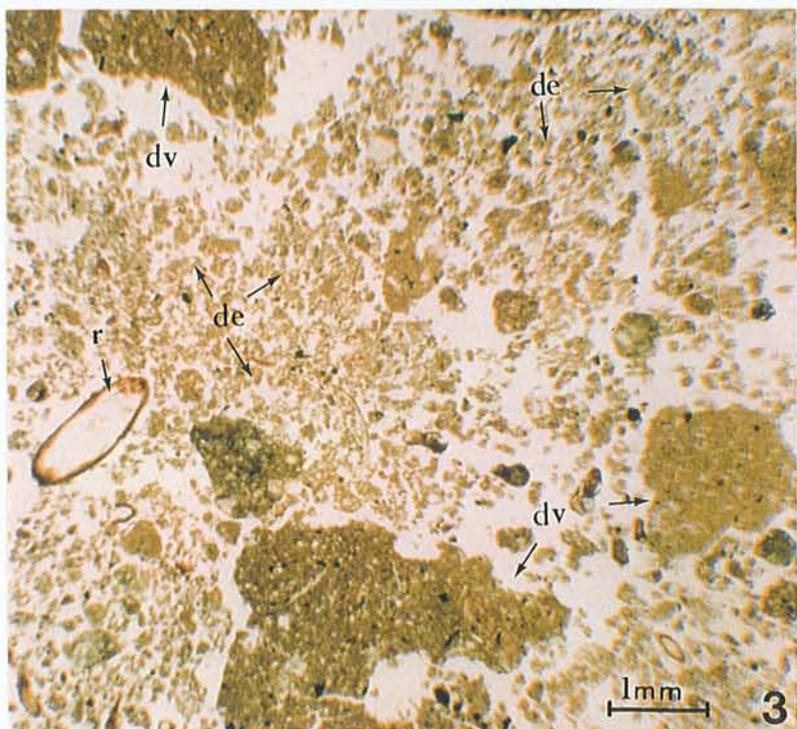
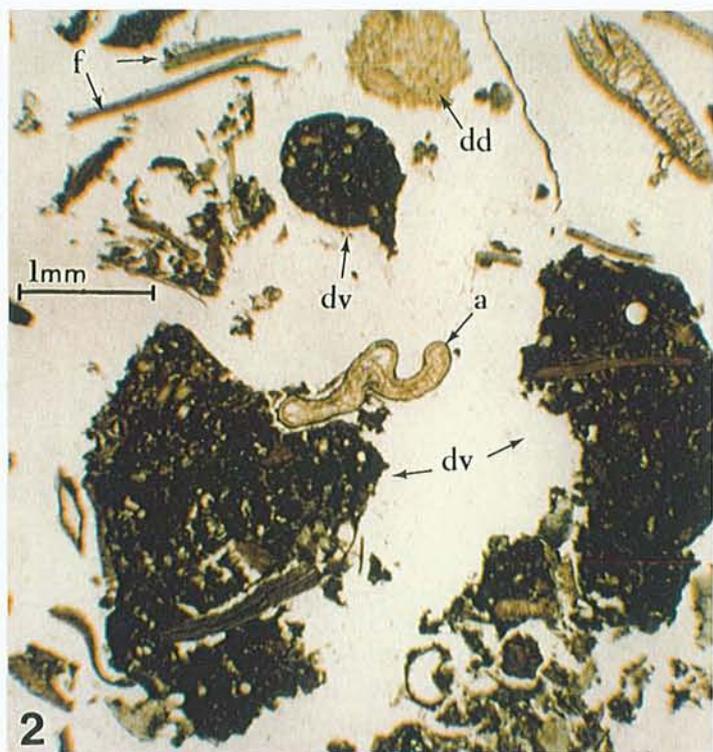
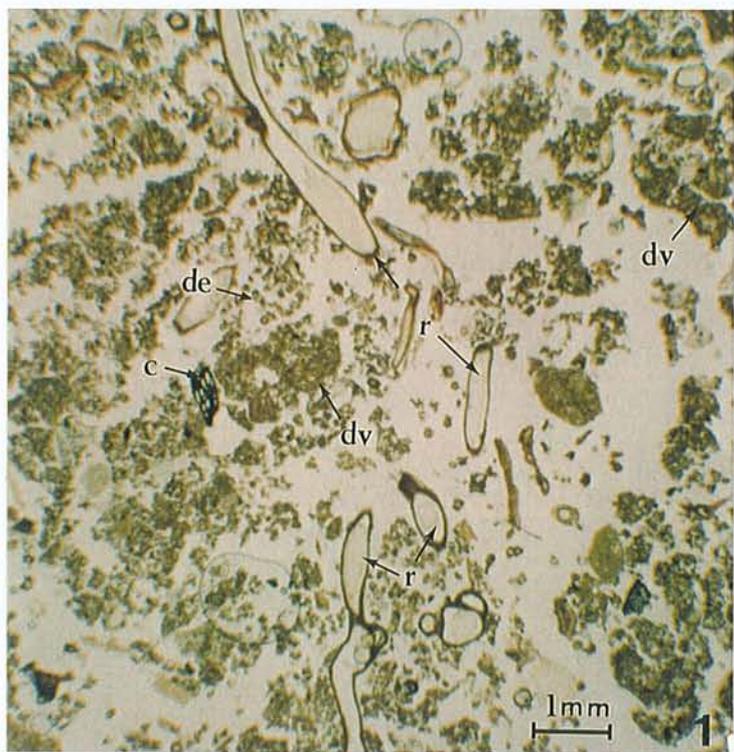
Horizon A₁B (10-70 cm)

3) Vue d'ensemble montrant les déjections de vers de terre et d'Enchytréides abondantes et toujours une porosité importante.

4) Gravier ferruginisé et déjection de vers de terre dont la base a été pulvérisée par les Enchytréides.

Horizon B (70-100 cm)

5) Gravier abondants accompagnés de micro-agrégats plus clairs que dans les horizons sus-jacents. Localement, ces micro-agrégats sont disposés sur les parois des graviers.



ROSELLO (1984, citée par ROBERT & HERBILLON, 1990 et par RAUNET, 1991), a étudié les microstructures d'Andosols de la Réunion et a pu mettre en évidence différents niveaux de structuration auxquels correspondent une porosité. Le sol est composé d'éléments arrondis coalescents de 50 à 100 μm de diamètre correspondant à des micro-agrégats. Ils sont eux mêmes constitués de micro-agrégats arrondis plus petits de 5 à 10 μm . Ces derniers sont à leur tour formés de nano-agrégats de 0,1 à 1 μm où on observe des éléments de 10 à 100 Å, fragments d'imogolite, sphérules d'allophanes, hydroxydes amorphes, gibbsite, goethite, halloysite et complexes organo-métalliques. Pour HETIER (1975), l'agrégat type est organisé en pseudo-particules de la taille des limons ou des sables fins. Il est constitué d'éléments figurés minéraux (minéraux et verres primaires, billes héritées) et végétaux (divers débris végétaux) cimentés par un plasma isotrope (précipités organo-minéraux). Ces ciments se répartissent différemment dans l'agrégat avec des ciments plutôt organiques (complexes AF et cations) en zone périphérique et, en position interne, des ciments surtout minéraux (AH et composés amorphes). Cette dernière fraction, protégée par la phase minérale et par son inaccessibilité, est biologiquement plus stable et plus ancienne que les produits périphériques.

Pour BOUDOT & BRUCKERT (1978), la structure foisonnante en micro-agrégats (fluffy) observée également dans l'horizon ocre rouille vif de sols brun ocreux sur grauwackes des Vosges, apparaît liée à la teneur en complexes organo-métalliques amorphes. La formation de tels agrégats résulte d'un mécanisme chimique de stabilisation des hydroxydes de Fe à l'état amorphe par adsorption de composés organiques. BRUCKERT & SELINO (1978) ont examiné une série de sols sur granite dans les Vosges et ont également attribué une origine chimique aux micro-agrégats des horizons B, BC et C d'un sol brun ocreux où la MO redistribuée stabilise les hydroxydes métalliques à l'état amorphe. Par contre, dans le haut du profil, la formation de ces agrégats a une origine biologique et résulte de l'activité de la micro-faune, Enchytréides et collemboles. Ces auteurs soulignent d'ailleurs la remarquable convergence de forme, voire de composition, existant entre les micro-agrégats d'origine biologique et chimique. Nos observations sur l'Andosol vosgien semblent rejoindre celles de BRUCKERT & SELINO (1978) sur ce sol ocreux.

IV. CONCLUSIONS

Il apparaît que notre Andosol vosgien ne présente aucune aptitude à la dispersion des argiles, nécessaire à une éventuelle migration sous forme de particules. L'examen des solutions du sol récoltées grâce à des plaques lysimétriques a révélé une absence de particules en suspension. De plus, les faibles concentrations des solutions en C et éléments minéraux (Al et Fe) ont permis de confirmer l'absence de migrations actuelles sous forme soluble.

Enfin, les observations micromorphologiques ont également confirmé l'absence de figures d'accumulation et donc l'absence de transferts. La structure est très poreuse et constituée d'agrégats et de micro-agrégats organo-minéraux, juxtaposés à des fragments rocheux. Ces observations ont de plus établi l'origine biologique de ces agrégats dans le haut du profil, élaborés par la faune du sol, passant à une origine probablement double : biologique et chimique en profondeur.

CHAPITRE IV - CONCLUSIONS : FONCTIONNEMENT ACTUEL

Nous allons à présent reprendre les résultats exposés dans les chapitres précédents pour tenter de dresser une interprétation générale en termes de fonctionnement actuel de notre Andosol vosgien.

Ce sol présente une aptitude à la dispersion des particules quasiment inexistante et celle-ci n'apparaît que dans des conditions de dilution qui ne sont jamais réalisées dans le milieu naturel. Ceci est d'ailleurs confirmé par l'absence de particules en suspension des eaux gravitaires récoltées sur le terrain. On peut donc raisonnablement considérer que les particules argileuses (au sens large) du sol sont le plus souvent à l'état floculé dans les conditions du terrain. Cette floculation est probablement le fait de l' Al^{3+} , abondant sur le complexe d'échange du sol et traduisant les conditions climatiques agressives qui prévalent dans ce milieu montagnard vosgien.

La floculation est à l'origine de la formation de fins agrégats où les composés organiques et minéraux associés sous forme de complexes organo-métalliques jouent le rôle d'agent d'agrégation. Ces agrégats se révèlent très stables vis-à-vis de l'action dispersante de l'agitation dans l'eau et sont peu propices à une mise en suspension. Cette forte stabilité structurale des agrégats est intimement liée aux phénomènes de dispersion-floculation et résulte également des liaisons organo-métalliques de leurs associations à forte charge métallique. De ce fait, cette stabilisation interdit toute dispersion et entrave donc les migrations en suspension. Mais de plus, elle s'oppose aux transferts en solution comme en témoignent les faibles concentrations des eaux gravitaires en C et éléments métalliques, qui sont plus importantes dans les podzols. L'absence de transferts est d'autre part confirmée par les observations micromorphologiques qui ne montrent aucune figure d'illuviation.

La formation de tels agrégats produit en outre une résistance élevée vis-à-vis de l'activité minéralisatrice des micro-organismes. En effet, les tests de biodégradation ont révélé une très faible minéralisation des MOS sous forme de CO_2 au bout de 6 semaines d'incubation à 20°C. Il semble donc que la MOS soit protégée de la décomposition à la fois physiquement, par séquestration des MO au sein des agrégats diminuant leur accessibilité, mais aussi chimiquement, du fait de la stabilisation exercée par la formation de liaisons organo-métalliques. On peut aussi évoquer l'effet négatif de la toxicité de l'Al et du déficit en P assimilable sur l'activité microbienne.

Ainsi, dans cet environnement vosgien, les associations organo-métalliques de cet Andosol développent une forte stabilité structurale et physique et apparaissent peu mobiles. Elles sont donc susceptibles de s'accumuler dans le profil et d'y demeurer en très grandes quantités, cette abondance étant assez caractéristique des Andosols. On pourrait donc penser que, dès lors que ces associations sont stabilisées et immobilisées, elles tendent à vieillir ensemble et montrent des temps moyens de

résidence du C très longs. Si de tels TMR ont été souvent mesurés sur les Andosols, notre cas vosgien présente en revanche des TMR très courts (< 600 ans) suggérant un intense renouvellement de la MOS. Cette MO pourrait provenir par le biais des racines ou encore par l'activité de la faune du sol. La présence de racines sur tout le profil a été établie lors des observations sur le terrain et micromorphologiques. De même, ces dernières ont souligné la très grande activité des vers de terre et des Enchytréides dans le brassage des constituants. Les racines, en se décomposant sur place et en produisant des exsudats racinaires directement dans le profil, contribueraient à rajeunir les MOS. Il en serait de même pour l'activité de la faune qui fabrique et mélange des MO jeunes aux MOS. Les substances produites par ces animaux dans leurs déjections interviennent également comme agents de liaison dans l'agrégation et augmentent ainsi la stabilité structurale.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les propriétés et le fonctionnement originaux des Andosols ont été reconnus et étudiés dans le monde depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Outre le fait que certains Andosols offrent une remarquable productivité agricole et correspondent à des régions parmi les plus fortement peuplées au monde, l'intérêt porté à ces sols est lié à ce qu'ils constituent "de véritables laboratoires d'étude" de plusieurs types de processus impliqués dans la formation des sols (HETIER, 1975).

Les Andosols ont longtemps été considérés comme des sols dérivant exclusivement de l'altération rapide, sous un climat humide, de verres volcaniques. Cette altération donne lieu à une abondance de composés allophaniques cryptocristallins sur lesquels les composés organiques peuvent se fixer et s'accumuler. Ce concept s'est élargi depuis une dizaine d'années aux Andosols ne présentant pas d'allophanes mais plutôt des complexes organo-métalliques et/ou aux Andosols dérivés de matériaux non volcaniques. Dans le même temps, les techniques d'étude de ces constituants ainsi que les critères de classification de ces sols ont subi une profonde évolution.

Dans les Vosges, cadre de cette étude, des sols à caractères andiques ont été décrits autrefois (DUCHAUFOR & SOUCHIER, 1966b ; HETIER, 1968) sur des roches volcaniques anciennes de la partie septentrionale du massif. *L'objectif de notre travail consistait donc à vérifier et confirmer l'existence, dans les Vosges, d'Andosols répondant aux nouveaux critères de classification adoptés par les différentes commissions et à examiner les particularités et le fonctionnement de tels sols dans un contexte dominant de brunification et de podzolisation.*

Rappels des principaux résultats

◆ Occurrence des Andosols dans les Vosges

Une prospection orientée a permis de reconnaître et de sélectionner des sites propices au développement du processus d'andosolisation, c'est-à-dire des sols dérivés de roches mères volcaniques ou plutoniques, de chimisme basique à intermédiaire, riches en minéraux altérables et sous des conditions permettant le maintien d'une forte humidité. Sur la trentaine de profils choisis, cinq répondent aux normes de définition des Andosols unanimement admises par les différentes classifications, soit sur une épaisseur minimale de 35 cm dans les 60 cm supérieurs, la manifestation de propriétés andiques définies par :

- $Al_0 + 1/2Fe_0 \geq 2,0 \%$,
- Densité apparente $\leq 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$,
- Rétention des phosphates $> 85 \%$.

Il apparaît que ces Andosols vosgiens se rencontrent sur les roches mères parmi les plus basiques de l'inventaire, riches en minéraux altérables (silicates ferro-magnésiens et plagioclases) et de texture grenue ou microlitique. Ces roches, massives et anciennes (Dévonien à Permien), sont pour la plupart volcaniques (porphyrites andésitiques basiques et porphyres trachytiques calco-magnésiens) mais également plutoniques (diorite mésocrate). Outre une roche mère favorable, l'andosolisation nécessite des conditions climatiques fortement humides sans périodes sèches, que l'on retrouve dans les Vosges, aux plus hautes altitudes et aux expositions O-NO. *La conjonction de ces deux facteurs, nécessaire au développement des Andosols, est assez peu fréquente dans le massif vosgien* et explique la faible extension géographique de ces sols.

Si l'un ou l'autre de ces facteurs n'est pas rencontré (roches plus acides ou climats plus secs par exemple), *la pédogenèse s'oriente alors vers les autres processus plus habituels de cette région : brunification et podzolisation*. Les sols de notre inventaire ne répondant pas simultanément aux trois critères se développent effectivement dans ces conditions mais ils présentent toutefois des propriétés andiques suffisamment exprimées pour appartenir aux intergrades andiques.

♦ *Caractères généraux des Andosols Vosgiens*

Ces Andosols vosgiens offrent une morphologie d'Andosols classique avec des humus de type mull à moder, une coloration sombre sur une grande profondeur et une structure microagrégée floconneuse. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

- *absence d'allophanes* (ou en très faibles quantités) *et prédominance de complexes organo-métalliques d'aluminium et de fer*,
- *minéralogie des argiles où prévalent des chlorites et leurs produits de transformation (interstratifiés chlorite-vermiculite)*,
- *texture sablo-limoneuse plus riche en limons fins et argiles vers la surface traduisant une légère argilisation vers le haut du profil*,
- *abondance de matière organique de type fulvique sur une grande profondeur et rapports C/N relativement élevés*,
- *acidité assez marquée reflétant un complexe d'échange le plus souvent désaturé où l'aluminium domine (caractère alique)*.

Ces sols appartiennent aux Andosols ou aux Andisols dans les divers systèmes de classification : Alic Fulvudands de la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1994), Umbric Andosols de la classification FAO (DRIESSEN & DUDAL, 1991), Pachalic Andosols dans le WRB (SPAARGAREN, 1994) ou encore Aluandosols humiques du Référentiel Pédologique (AFES, 1995).

Ainsi l'existence d'Andosols répondant aux nouvelles normes de définition est bien établie dans le massif vosgien. Toutefois leurs propriétés andiques sont assez peu affirmées par rapport aux Andosols d'autres régions, notamment sur pyroclastes récents, en relation avec leurs roches mères dures, compactes et anciennes, et de ce fait moins favorables à une altération rapide. Notons enfin que les Andosols répertoriés autrefois dans les Vosges ne satisfont pas ces nouvelles règles et ne justifient que de l'appellation "d'intergrades andiques".

◆ *Particularités des Andosols Vosgiens*

Les particularités de ces sols ont été examinées par rapport à un Andosol de référence (développé dans des conditions très favorables à l'andosolisation : scories basaltiques quaternaires de la Chaîne des Puys) et à des sols de la série sols bruns - podzols sur des roches volcaniques plus acides (mais sous les mêmes conditions climatiques) ou sur des roches plutoniques. Cette étude comparée a révélé que l'Andosol vosgien présentait des analogies tantôt avec l'Andosol de référence, tantôt avec les autres sols vosgiens.

- *Éléments "actifs"*

L'Andosol vosgien se rapproche de l'Andosol de référence (Massif Central) par ses teneurs en aluminium et en fer actifs élevées sans redistributions. Mais ces éléments sont en quantités beaucoup plus importantes dans l'Andosol de référence où ils sont engagés dans la structure d'allophanes (Andosol allophanique) alors qu'ils sont en quantités moindres (bien qu'élevées) et sous forme de complexes organo-métalliques dans l'Andosol vosgien (Andosol non allophanique). Dans le cas du sol brun, ces éléments sont en très faibles quantités et ne subissent pas de migrations. Par contre, dans le podzol ou dans les sols podzolisés, ces éléments sont sous forme de complexes organo-métalliques mobiles qui peuvent ainsi migrer et s'accumuler finalement en grandes quantités dans les horizons Bh ou Bs. Quelques allophanes peuvent également se rencontrer dans ces horizons.

- *Constituants minéraux*

Les textures traduisent une légère argilisation des sols vosgiens, un peu plus élevée que dans l'Andosol de référence (Massif Central). L'analyse des éléments totaux a révélé que l'andosolisation se manifestait sur les roches mères les moins siliceuses et donc présentant inversement les réserves totales en bases les plus élevées. Dans l'Andosol de référence, il semble que l'altération touche principalement les verres volcaniques, ceci se traduisant par des pertes (entre la roche et les horizons) en K et en Na. Dans l'Andosol vosgien, l'altération concerne les silicates les plus altérables (plagioclases, pyroxènes, chlorites) de la roche (non vitreuse et de réserve totale en bases un peu plus faible) et se traduit par des pertes en Ca, K et Mg et l'individualisation d'argiles

(chlorites, vermiculites). Dans le cas du sol brun, la réserve totale en bases de la roche est encore un peu plus faible et l'altération touche également les minéraux les plus altérables. Lorsque l'on se rapproche du podzol, la réserve totale en bases est de plus en plus faible et la proportion de minéraux altérables diminue fortement.

- *Complexe d'échange*

En raison de la forte réserve totale en bases de son matériau parental, l'Andosol de référence (Massif Central) est faiblement acide et présente un complexe d'échange saturé, notamment par Ca et dans une moindre mesure par Mg. L'Andosol vosgien montre plus d'analogies avec les autres sols vosgiens, acides, présentant une forte désaturation et une prédominance d'aluminium échangeable, en relation avec une réserve totale en bases plus faible, une altération plus lente et un drainage climatique favorisant la lixiviation des bases.

- *Constituants organiques*

L'Andosol de référence (Massif Central) et l'Andosol vosgien sont caractérisés par une grande abondance de matière organique, humifiée et non redistribuée au sein du profil. Le sol brun renferme des quantités de matière organique plus faibles ne subissant aucune migration. Par contre, pour le podzol, les redistributions s'accroissent et le profil est caractérisé par une accumulation de matières organiques humifiées en Bh. Qualitativement, les matières organiques des horizons A₁B de l'Andosol vosgien sont proches de celles de l'Andosol de référence et de celles des sols bruns, relativement riches en acides humiques et humine, et diffèrent de celles des Bh de podzols qui elles apparaissent mieux pourvues en acides fulviques. En effet, on peut séparer d'un côté les matières organiques qui ont évolué *in situ*, et d'un autre côté celles des Bh de podzols qui ont subi un transfert et sont plus riches en composés les plus mobiles.

◆ *Fonctionnement*

Nous nous sommes enfin attachés à l'étude de la dynamique des associations organo-métalliques de l'Andosol vosgien qui, par leur abondance, constituent une des originalités majeure de ce sol.

Dans l'ensemble, tous les sols étudiés, et particulièrement l'Andosol vosgien, montrent une forte stabilité structurale (évaluée par des tests de désagrégation) mais aussi biologique (tests de biodégradation) de leurs associations organo-minérales. Il apparaît que la très forte charge métallique de ces associations est à l'origine de leur insolubilisation dans l'Andosol vosgien. Ceci permet la formation d'agrégats très stables où les matières organiques sont protégées de l'action des micro-organismes (chimiquement et physiquement).

Ces associations organo-métalliques sont également très stables vis-à-vis de l'action dispersante de l'eau (tests de dispersion) et sont donc peu aptes à une migration sous forme de suspensions. L'analyse des eaux lysimétriques récoltées sur le terrain a confirmé l'absence de migration particulière dans l'Andosol vosgien. Elle a fait également apparaître l'absence de translocations sous forme soluble (faibles concentrations en carbone, insignifiantes en aluminium et fer). Enfin, une étude micromorphologique réalisée sur ce profil a également corroboré l'absence de transferts (pas de figures d'illuviation). Elle a de plus établi l'origine essentiellement biologique de la structure microagrégée floconneuse, au moins dans le haut du profil. Ces agrégats sont élaborés par les vers de terre sous forme de déjections organo-minérales, plus ou moins reprises par les Enchytréides. L'activité de cette faune intervient dans l'agrégation et participe à la stabilité structurale des agrégats. Ils interviennent aussi en brassant ces constituants et en y incorporant des substances humiques fréquemment renouvelées. Ceci, conjugué à l'abondance du chevelu racinaire se décomposant sur place et produisant des substances organiques récentes, pourrait expliquer les TMR courts observés dans ce sol.

Dans l'ensemble, la forte stabilité des agrégats, structurale ou biologique, liée à la floculation des colloïdes et à l'action de la faune, et l'absence de migrations suggèrent la formation et l'accumulation *in situ* sans mobilisation des associations organo-métalliques.

Synthèse générale

Au terme de ce travail, on peut affirmer que des Andosols existent bien dans les Vosges, mais l'andosolisation est toujours modeste, aussi bien vis-à-vis des critères chimiques requis que dans l'extension géographique de ces sols. Ce sont toujours des Andosols plus ou moins dépourvus d'allophanes mais riches en complexes organo-métalliques stables non mobiles. Leur développement exige à la fois des conditions climatiques humides propices à l'altération des minéraux et une roche mère très riche en minéraux altérables volcanique ou plutonique. Les conditions climatiques favorables ne peuvent être rencontrées que dans les parties les plus élevées du massif vosgien, à l'étage montagnard supérieur, dans les "Hautes Vosges". Cette localisation réduite à la frange supérieure du Massif Vosgien restreint beaucoup l'extension possible des Andosols et implique par ailleurs une durée de pédogenèse relativement courte, postérieure à la dernière glaciation, donc n'excédant pas 10000 à 12000 ans.

Ces deux paramètres, environnement climatique et durée de pédogenèse étant fixés, il devient plus aisé d'envisager le rôle du facteur roche mère dans l'orientation de la pédogenèse et le développement de l'andosolisation.

Dans les Hautes Vosges, il existe une grande diversité de roches mères, plutoniques ou volcaniques, grenues, microgrenues ou microlitiques, mais toutes sont anciennes, dures, massives et

dépourvues de verre volcanique. Leur altérabilité est fonction de leur composition chimique et minéralogique, et donc de l'abondance des minéraux silicatés les plus altérables (ferro-magnésiens et plagioclases) (Fig. 41).

- Les roches mères acides à faible réserve totale en bases, pauvres en silicates altérables ne libèrent que de faibles quantités d'argile, de fer et d'aluminium. Ces derniers sont pris en charge par les composés humiques (acides fulviques et acides humiques) pour former des complexes organo-métalliques faiblement chargés en éléments métalliques, solubles, mobiles et qui vont précipiter et s'accumuler en profondeur pour constituer des horizons spodiques. C'est la podzolisation, habituelle aussi bien sur roches mères acides grenues (granites leucocrates) que volcaniques (rhyolites).

- Les roches mères à réserve totale en bases moyenne, mieux pourvues en silicates altérables (granites calco-alcalins, syénites, trachytes) libèrent un peu plus d'éléments amorphes et l'argilisation est plus prononcée. Les associations organo-minérales formées sont de type argilo-humique, stables, non mobiles. C'est la brunification *sensu stricto*, relayée par des sols intergrades :

- vers la podzolisation, en fonction d'une acidité croissante des roches mères : ce sont les sols bruns ocreux,

- vers l'andosolisation, sur les roches plus riches en minéraux altérables (diorites, trachyandésites) : ce sont les sols bruns andiques.

- Les roches mères à réserve totale en bases élevée (basaltes, diorites mésocrates, gabbros) riches en silicates altérables (plagioclases, pyroxènes, amphiboles, biotites, péridots plus ou moins chloritisés) libèrent beaucoup de fer et d'aluminium tout en permettant une certaine argilisation (héritage, transformation, néoformation). Les alcalins et alcalino-terreux ainsi que la silice libérés sont en grande partie lixiviés d'où une acidification et un certain manque de silice qui contrarient la formation d'allophanes. Les hydroxydes alumineux et ferriques demeurent sur place et sont disponibles pour s'associer et fixer les molécules humiques, acides fulviques et acides humiques, en constituant des complexes organo-métalliques très fortement chargés en éléments métalliques non mobiles. L'accumulation, *in situ*, de ces complexes organo-métalliques conduit à l'édification de l'horizon andique, mais l'altération des silicates étant plus lente que celle des verres volcaniques, l'andosolisation est moins rapide et moins poussée que sur des roches vitreuses (Fig. 42).

Dans le Massif Central (Chaîne des Puys), dans des conditions climatiques sensiblement identiques et pour une durée de pédogenèse voisine, mais sur des matériaux pyroclastiques meubles, microdivisés, plus riches en verres, avec une réserve totale en bases élevée, une altération intense rapide s'exerce en priorité sur les parties vitreuses, libérant abondamment l'aluminium et la silice ainsi que des alcalins qui maintiennent le pH à un niveau relativement élevé. Dans ces conditions, l'andosolisation s'exprime pleinement avec formation d'allophanes et peu d'argile (Fig. 42).

Fig. 41 - Rôle de la roche mère dans l'orientation de la pédogenèse.

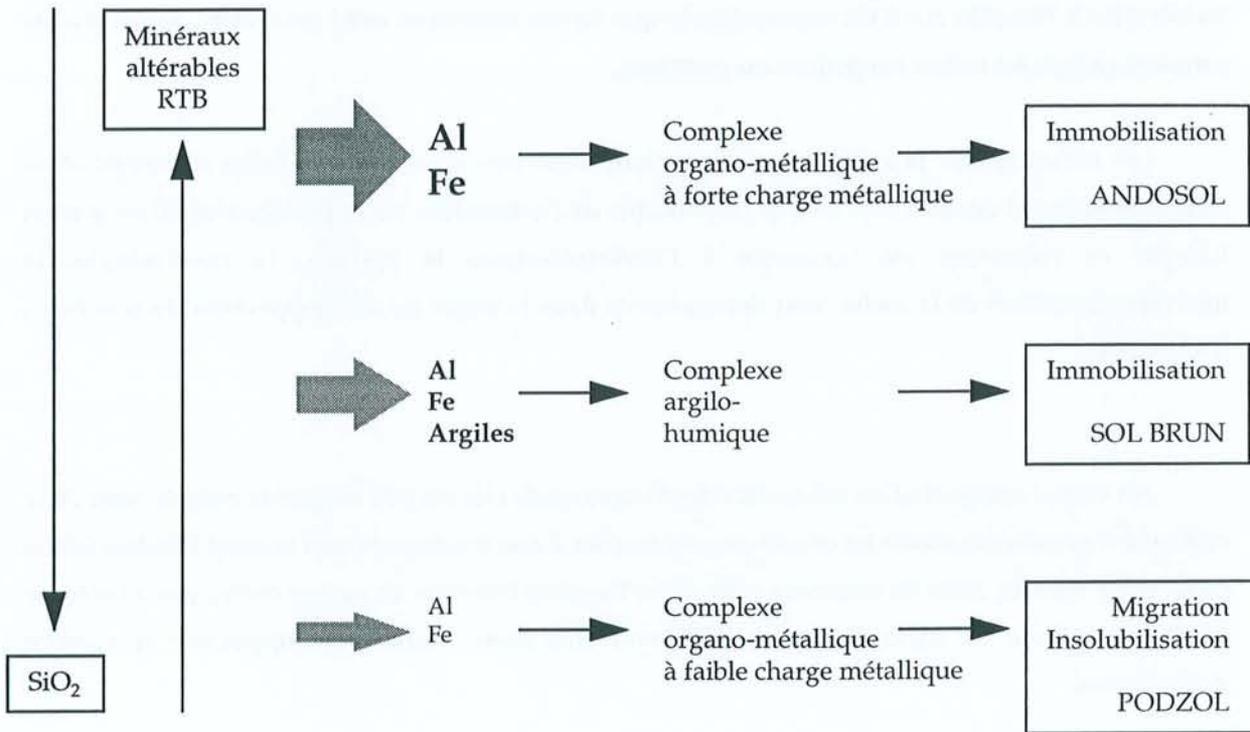
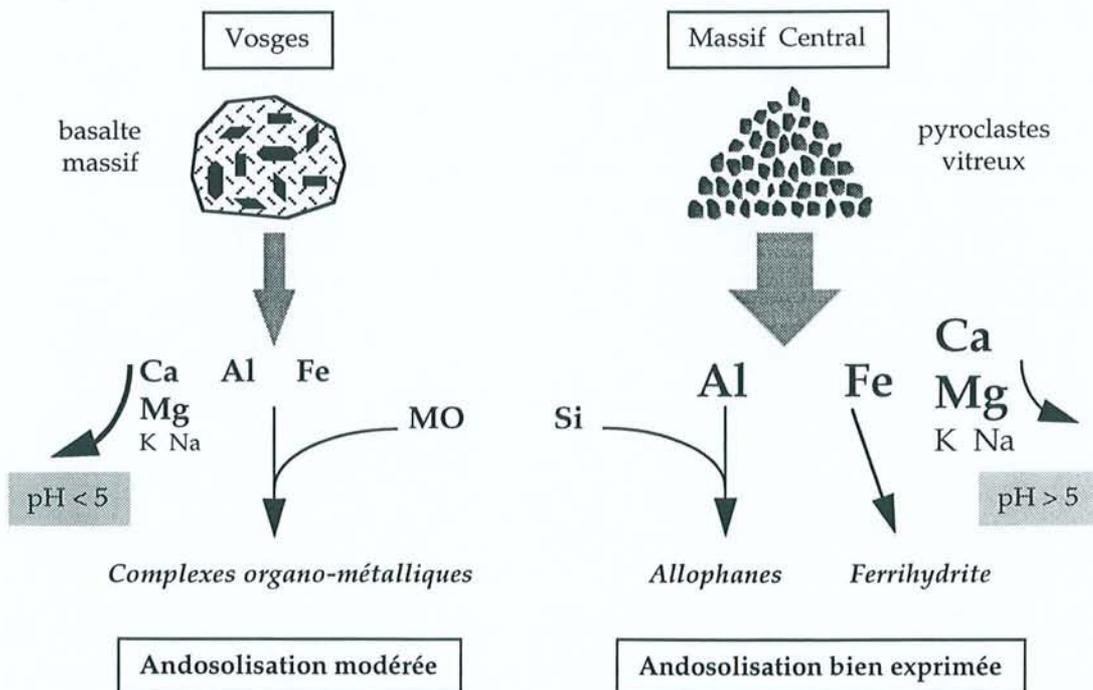


Fig. 42 - Rôle de la roche mère sur l'intensité de l'andosolisation.



Dans les Vosges, l'obstacle majeur au développement d'Andosols allophaniques est l'absence de pyroclastes plus ou moins vitreux (pyroclastes et verre allant souvent de pair). Cette absence est due à l'ancienneté du Massif et de ses roches mères. Les matériaux pyroclastiques meubles sont très vulnérables à l'érosion et s'il est vraisemblable que de tels matériaux aient pu exister, aucun n'a été conservé depuis les temps hercyniens ou permien.

Les caractères de la roche mère se révèlent donc très importants puisque sa composition chimique apparaît comme le principal responsable de l'orientation de la pédogenèse d'une part et lorsque ce chimisme est favorable à l'andosolisation, la texture, la minéralogie, la microfragmentation de la roche, sont déterminants dans le degré de développement du processus d'autre part.

Au total, l'andosolisation existe dans les Vosges, mais elle est peu fréquente compte tenu de la difficulté à rassembler toutes les conditions nécessaires à son fonctionnement : climat très humide et roche mère basique riche en minéraux altérables. De plus, l'absence de roches mères pyroclastiques meubles explique les particularités de cette andosolisation : faible développement et absence d'allophanes.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES. 1995. **Référentiel Pédologique**. INRA, Paris, 332 p.
- ALARCON, C. 1997. **Cycle biogéochimique du silicium en environnement tropical : application à l'étude des sols à mascareignite de l'île de la Réunion**. Thèse Doct. Univ., Univ. d'Aix-Marseille.
- AMELLAL, N. 1996. **Rôle des bactéries productrices d'exopolysaccharides dans la rhizosphère du blé dur**. Thèse Doct. Univ., Univ. Henri Poincaré - Nancy I, 176 p.
- ANDERSON, H. A., A. R. FRASER, A. HEPBURN & J. D. RUSSELL. 1977. **Chemical and infrared spectroscopic studies of fulvic acid fractions from a podzol**. *J. Soil Sci.*, 28, 623-633.
- ANDRE, F. 1983. **Pétrologie structurale et pétrogenèse des formations plutoniques septentrionales du Massif des Ballons (Vosges, France)**. Thèse Doct. Univ., Univ. Nancy I, 230 p.
- ARNALDS, O., C. T. HALLMARK & L. P. WILDING. 1995. **Andisols from four regions of Iceland**. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 161-169.
- ARNOLD, R. W. 1988. **The worldwide distribution of Andisols and the need for an Andisol order in Soil Taxonomy**. In: Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan, 1987. D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth & H. Eswaran (Eds.), SMSS, Washington DC, 5-12.
- BACHELIER, G. 1968. **Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone des sols**. Mémoires ORSTOM, N° 30, Paris.
- BAHAM, J. & G. H. SIMONSON. 1985. **Classification of soils with andic properties from the Oregon coast**. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 777-780.
- BALESDENT, J. 1982. **Etude de la dynamique de l'humification des sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations ^{14}C des matières organiques**. Thèse Doct. Univ., Univ. de Nancy I, 90 p.
- BALESDENT, J. & B. GUILLET. 1982. **Les datations par le ^{14}C des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques**. *Sci. du Sol*, 2, 93-112.
- BARRIUSO, E. 1985. **Caractérisation des fractions organo-minérales et des constituants humiques d'un sol de pelouse subalpine**. Thèse Doct. Univ., Univ. de Nancy I, 170 p.
- BARROZ, F. & A. BENZAKOUR. 1989. **Le volcanisme permien des Vosges : une revue**. In: Synthèse géologique des bassins permien français. J.-J. Châteauneuf & G. Farjanel, Mémoire du Bureau de recherches géologiques et minières, n° 128, 208-219.
- BARTOLI, F., G. BURTIN & A. J. HERBILLON. 1991. **Disaggregation and clay dispersion of Oxisols: Na resin, a recommended methodology**. *Geoderma*, 49, 301-317.
- BARTOLI, F., R. PHILIPPY & G. BURTIN. 1988a. **Aggregation in soils with small amounts of swelling clays. I. Aggregate stability**. *J. Soil Sci.*, 39, 593-616.
- BARTOLI, F., E. PATERSON, R. PHILIPPY, J. J. DEMAI & M. DOIRISSE. 1988b. **Aggregation in soils with small amounts of swelling clays. II. Chemistry and surface properties of Na resin stable soil aggregates**. *J. Soil Sci.*, 39, 617-628.
- BATJES, N. H. 1996. **Total carbon and nitrogen in the soils of the world**. *Europ. J. Soil Sci.*, 47, 151-163.
- BAUMLER, R. & W. ZECH. 1994. **Characterization of Andisols developed from nonvolcanic material in eastern Nepal**. *Soil Sci.*, 158, 211-217.

- BERTRAND, R. 1969. **Les sols des formations volcaniques de l'Hérault**. Thèse Doct. Univ., Univ. de Paris, 93 p.
- BESOAIN, E. M. 1985. **Los suelos**. In: Suelos volcanicos de Chile. J.T. Tosso (Ed.), Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile, 25-106.
- BLAKEMORE, L. C., P. L. SEARLE & B. K. DALY. 1981. **Methods for chemical analysis of soils**. N.Z. Soil Bur. Sci. Rep. 80. Lower Hutt, New Zealand, 44-45.
- BOLLAND, M. D. A., R. J. GILKES, R. F. BRENNAN & D. G. ALLEN. 1996. **Comparison of seven phosphorus sorption indices**. *Aust. J. Soil Res.*, 34, 81-89.
- 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., Univ. Nancy I, 69 p.
- BONNEAU, M., P. FAIVRE, M. GURY, J.-M. HETIER & F. LE TACON. 1978. **Carte pédologique de la France à 1/100000. Notice explicative, Saint-Dié, Q. 9**. INRA, Publication n° 11, Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de la France, 152 p.
- BOUDOT, J.-P. 1976. **Ecologie du paysage et processus de pédogenèse sur les grauwackes de la série du Markstein (Hautes-Vosges)**. Thèse Doct. Univ., Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 153 p.
- BOUDOT, J.-P. 1982. **Relations entre l'altération minérale et le cycle de l'azote sur matériel chloriteux du massif shisto-grauwackeux vosgien**. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. Nancy I, 168 p.
- BOUDOT, J.-P. 1992. **Relative efficiency of complexed aluminium, noncrystalline Al hydroxide, allophane and imogolite in retarding the biodegradation of citric acid**. *Geoderma*, 52, 29-39.
- BOUDOT, J.-P., B. A. BEL HADJ, R. STEIMAN & F. SEIGLE-MURANDI. 1989. **Biodegradation of synthetic organo-metallic complexes of iron and aluminium with selected metal to carbon ratios**. *Soil Biol. Biochem.*, 21, 961-966.
- BOUDOT, J.-P., B. A. BEL HADJ & T. CHONE. 1986. **Carbon mineralization in Andosols and aluminium-rich highland soils**. *Soil Biol. Biochem.*, 18, 457-461.
- BOUDOT, J.-P., T. BECQUER, D. MERLET & J. ROUILLER. 1994. **Aluminium toxicity in declining forests: a general overview with a seasonal assessment in a silver fir forest in the Vosges mountains (France)**. *Ann. Sci. For.*, 51, 27-51.
- BOUDOT, J.-P., & S. BRUCKERT. 1978. **Complexes organometalliques et structure microagrégée des sols sur matériaux chloriteux du système schisto-grauwackeux vosgien**. *Sci. du Sol*, 1, 31-40.
- BOUDOT, J.-P., O. MAITAT, D. MERLET & J. ROUILLER. 1996. **Evidence for the redissolution of soil spodic horizons under the influence of acid deposition in the Vosges mountains (north-eastern France)**. *Sci. of the Total Environment*, 184, 211-214.
- BOURRIE, G. & F. LELONG. 1994. **Les solutions du sol : du profil au bassin versant. 2 - Constituants et propriétés du sol**. M. Bonneau & B. Souchier (Eds.), Masson, 2° éd., 240-273.
- BRUCKERT, S. 1994. **Analyse des complexes organo-minéraux des sols**. In: Pédologie. 2 - Constituants et propriétés du sol. M. Bonneau & B. Souchier (Eds.), Masson, 2° éd., 275-295.
- BRUCKERT, S. & D. SELINO. 1978. **Mise en évidence de l'origine biologique ou chimique des structures microagrégées foisonnantes des sols bruns ocreux**. *Pédologie*, XXVIII, 1, 46-59.
- BRUCKERT, S. & B. SOUCHIER. 1975. **Mise au point d'un test de différenciation des horizons cambiques et spodiques**. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 280D, 1361-1364.
- BULLOCK, P., N. FEDOROFF, A. JONGERIUS, G. STOOPS & T. TURSINA. 1985. **Handbook for soil thin section description**. Waine Research Publications, 152 p.

- CACHAN, P. 1974. Etude bioclimatique du Massif Vosgien. *Bull. ENSAIA*, T. XVI, Fasc. I-II, 3-33.
- CHRISTENSEN, B. T. 1987. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 429-435.
- CHURCHMAN, G. J. & K. R. TATE. 1986. Aggregation of clay in six New Zealand soil types as measures by disaggregation procedures. *Geoderma*, 37, 207-220.
- COLMET-DAAGE, F., F. CUCALON, M. DELAUNE, J. & M. GAUTHEYROU & B. MOREAU. 1967a. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 1^{ère} partie : Essai de caractérisation des sols des régions tropicales humides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. V, n° 1, 3-38.
- COLMET-DAAGE, F., F. CUCALON, M. DELAUNE, J. & M. GAUTHEYROU & B. MOREAU. 1967b. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 2^{ème} partie : Conditions de formation et d'évolution. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. V, n° 4, 353-392.
- COLMET-DAAGE, F. & P. LAGACHE. 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. III, fasc. 2, 91-121.
- CPCS. 1967. Classification des Sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. 96 p.
- CRONIN, S. J., V. E. NEALL & A. S. PALMER. 1996. Investigation of an aggrading paleosol developed into andesitic ring-plain deposits, Ruapehu volcano, New Zealand. *Geoderma*, 69, 119-135.
- DAHLGREN, R. A., S. SHOJI & M. NANZYU. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. S. Shoji, M. Nanzyo & R.A. Dahlgren (Eds.), *Developments in Soil Science* 21, 101-143.
- DALY, B. K. 1982. Identification of podzols and podzolised soils in New Zealand by relative absorbance of oxalate extracts of A and B horizons. *Geoderma*, 28, 29-38.
- DE BETHUNE, P., E. LAPANIA, M. ROUSSEAU-TURAY & J.-P. VON ELLER. 1968. Les diorites du Neuntelstein et du Neugrunrain près du Hohwald (Vosges), et leurs enclaves. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 21, 1, 23-44.
- DELVAUX, B. 1988. Constituants et propriétés de surface des sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun occidental. Approche génétique de leur fertilité. Thèse Doct. Sci. Agron., Univ. Catholique de Louvain, 335 p.
- DELVAUX, B., A. J. HERBILLON & L. VIELVOYE. 1989. Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon. Taxonomic, mineralogical and agronomic implications. *Geoderma*, 45, 375-388.
- DION, J. 1979. Les forêts vosgiennes. Etude physique. Thèse de l'Univ. de Paris-Sorbonne, 467 p.
- DRIESSEN, P. M. & R. DUDAL (Eds.). 1991. *The Major Soils of the World*. Agricultural University Wageningen & Katholieke Universiteit Leuven, 310 p.
- DUCHAUFOR, P. 1983. Pédogenèse et classification. M. Bonneau & B. Souchier (Eds.), Masson, 2^e éd., 491 p.
- DUCHAUFOR, P. & B. SOUCHIER. 1966a. Note sur une méthode d'extraction combinée de l'aluminium et du fer libres dans les sols. *Sci. du Sol*, 1, 17-29.
- DUCHAUFOR, P. & B. SOUCHIER. 1966b. Sols andosoliques et roches volcaniques des Vosges. *Sci. de la Terre*, T. XI, n° 3, 345-365.

- DUTARTRE, P. 1993. **Horizons de surface de sols ferrugineux tropicaux cultivés d'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso et Mali). Etude des microstructures par l'approche fractale.** Thèse Doct. Univ., Univ. Nancy I, 153 p.
- DUTARTRE, P., F. BARTOLI, F. ANDREUX, J.-M. PORTAL & A. ANGE. 1993. **Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from Western Africa.** *Geoderma*, 56, 459-478.
- FAIVRE, P. 1988. **Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie (Amérique du Sud).** Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 563 p.
- FAO. 1975. **Carte mondiale des sols FAO - Unesco 1 : 5 000 000 Vol. 1, Légende, Unesco, Paris.**
- FAO. 1990. **FAO-Unesco Soil Map of the World. Revised Legende, Soils Bulletin 60, FAO, Rome, 119 p.**
- FARMER, V. C. & J. D. RUSSELL. 1990. **Structures and genesis of allophanes and imogolite and their distribution in non-volcanic soils.** In: *Soil Colloids and Their Associations in Aggregates*. M. F. De Boodt, M. H. B. Hayes & A. Herbillon (Eds.), Plenum Press, New York, 165-178.
- FLUCK, P., J.B. EDEL, Cl. GAGNY, R. MONTIGNY, A. PIQUE, J.L. SCHNEIDER & H. WHITECHURCH. 1987. **Le socle vosgien, segment de la chaîne Varisque d'Europe.** Doc. du BRGM n° 146, 97 p.
- FOURQUIN, Cl. 1973. **Contribution à la connaissance du tectogène varisque dans les Vosges méridionales. I - Le Culm de la région de Giromagny.** *Sci. Géol., Bull.*, 26, 1, 3-42.
- GAGNY, Cl. 1968. **Pétrogenèse du granite des Crêtes, Vosges méridionales, France.** Thèse d'Etat, Univ. Nantes, 546 p.
- GARCIA-RODEJA, E., B. M. SILVA & F. MACIAS. 1987. **Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain.** *J. Soil Sci.*, 38, 573-591.
- GOMBEER, R. & J. D'HOORE. 1971. **Induced migration of clay and other moderately mobile soil constituents. III. Critical soil/water dispersion ratio. Colloid stability and electrophoretic mobility.** *Pedologie*, XXI, 311-342.
- GOMENDY, V. 1996. **Variabilités spatiale et temporelle des propriétés structurales et hydriques des horizons de surface de la couverture limoneuse de bassin versant d'Orgeval (Brie).** Thèse Doct. Univ., Univ. Henri Poincaré - Nancy I, 214 p.
- GUCKERT, A. & F. LE TACON. 1970. **La podzolisation dans les Vosges gréseuses.** *Revue Forestière Française*, 4, 470-472.
- GUERIN, H. 1967. **Les faciès de bordure du granite des Ballons d'Alsace et de Servance (Vosges méridionales).** *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 20, 1, 37-58.
- GUILLET, B. 1972a. **Datation des sols par le ¹⁴C naturel. I - La méthode de datation par scintillation liquide.** *Bull. ENSAIA*, T. XIV, 117-122.
- GUILLET, B. 1972b. **Relation entre l'histoire de la végétation et la podzolisation dans les Vosges.** Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. Nancy, 112 p.
- GUILLET, B. 1990. **Le vieillissement des matières organiques et des associations organo-minérales des andosols et des podzols.** *Sci. du Sol*, 28, 285-299.
- GUILLET, B. 1994. **L'abondance naturelle des isotopes du carbone comme moyen d'étude de l'âge, du renouvellement et de l'origine des matières organiques des sols. 2 - Constituants et propriétés du sol.** M. Bonneau & B. Souchier (Eds.), Masson, 2° éd., 297-315.

- GUILLET, B., J. ROUILLER & J.-C. VEDY. 1981. Dispersion et migration de minéraux argileux dans les podzols. Contribution des composés organiques associés, leur rôle sur les formes et l'état de l'aluminium. In: Colloques internationaux du CNRS N° 303 : Migrations organo-minérales dans les sols tempérés. Nancy 1979, 49-56.
- GUILLET, B., J.-C. VEDY, J. ROUILLER & B. SOUCHIER. 1979. Migrations de particules argileuses dans les milieux de géochimie organique très acide : exemple des podzols sur colluvium de grès vosgien. *Sci. Géol.*, 53, 13-18.
- GUNJIGAKE, N. & K. WADA. 1981. Effects of phosphorus concentration and pH on phosphate retention by active aluminium and iron of Ando soils. *Soil Sci.*, 132, 247-352.
- GURY, M. 1976. Evolution des sols en milieu acide et hydromorphe sur terrasses alluviales de la Meurthe. Thèse Doct. Univ., Univ. Nancy I, 100 p.
- GURY, M. 1990. Génèse et fonctionnement actuel des pseudogleys podzoliques sur terrasses alluviales dans l'est de la France. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 287 p.
- GUSTAFSSON, J. P., P. BHATTACHARYA, D. C. BAIN, A. R. FRASER & W. J. MCHARDY. 1995. Podzolisation mechanisms and the synthesis of imogolite in northern Scandinavia. *Geoderma*, 66, 167-184.
- HERBILLON, A. J. 1989. Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizons of low activity clay soils. In: Proc. 8th Int. Soil Classification Workshop : Classification, characterization and utilization of Oxisols. 12-23 May 1986, Brazil, 39-48.
- HERBILLON, A. J. 1994. Oxydes de fer, gibbsite, oxydes de manganèse et minéraux allophaniques. In: Pédologie. 2 - Constituants et propriétés du sol. M. Bonneau & B. Souchier (Eds.), Masson, 2^e éd., 17-45.
- HETIER, J.-M. 1968. Etude de quelques sols andosoliques sur roches volcaniques primaires des Vosges. Thèse Doct. Univ., Univ. Nancy I, 54 p.
- HETIER, J.-M. 1969. Etude de l'application du test FNa à l'estimation des constituants amorphes dans les sols tempérés. *Sci. du Sol*, 2, 91-97.
- HETIER, J.-M. 1975. Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. Nancy I, 194 p.
- HETIER, J.-M., N. YOSHINAGA & F. WEBER. 1977. Formation of clay minerals in Andosols under temperate climate. *Clay Miner.*, 12, 299-307.
- HONNA, T., S. YAMAMOTO & K. MATSUI. 1987. A procedure for determination of melanic index. In: ICOMAND, International Committee on the Classification of Andisols, Circular letter n° 10, 29 February 1988, N. Z. Soil Bureau, DSIR, Lower Hutt, New Zealand, 76-80.
- HUNTER, C. R., B. E. FRAZIER & A. J. BUSACCA. 1987. Lytell Series : a nonvolcanic Andisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 376-383.
- INOUE, K. & T. HIGASHI. 1988. Al- and Fe-humus complexes in Andisols. In: Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan, 1987. D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth & H. Eswaran (Eds.), SMSS, Washington DC, 81-96.
- JEANROY, E. 1983. Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mössbauer. Thèse Doct. Univ., Univ. Nancy I, 168 p.
- JEANROY, E. & B. GUILLET. 1981. The occurrence of suspended ferruginous particles in pyrophosphate extracts of some soil horizons. *Geoderma*, 26, 95-105.

- JOHNSON-MAYNARD, J. L., P. A. MCDANIEL, D. E. FERGUSON & A. L. FALEN. 1997. **Chemical and mineralogical conversion of Andisols following invasion by bracken fern.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 549-555.
- JUTEAU, T. & G. ROCCI. 1965. **Contribution à l'étude pétrographique du massif volcanique dévonien de Schirmeck (Bas-Rhin).** *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 18, 3, 145-176.
- JUTEAU, T. & G. ROCCI. 1966. **Etude chimique du massif volcanique dévonien de Schirmeck (Vosges Septentrionales). Evolution d'une série spilite-kératophyre.** *Sci. de la Terre*, T.XI, n°1, 68-104.
- KAISER, K. & W. ZECH. 1996. **Defects in estimation of aluminium in humus complexes of podzolic soils by pyrophosphate extraction.** *Soil Sci.*, 161, 452-458.
- KOUTIKA, L.-S. 1996. **Dynamique de la matière organique en relation avec les propriétés chimiques et structurales des sols dans une chronoséquence forêt-prairies de graminées en Amazonie orientale (Etat de Para, Bresil).** Thèse Doct. Univ., Univ. Henri Poincaré - Nancy I, 102 p.
- KOUTIKA, L.-S., F. BARTOLI, F. ANDREUX, C. C. CERRI, G. BURTIN, T. CHONE & R. PHILIPPY. 1997. **Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin.** *Geoderma*, 76, 87-112.
- LEAMY, M. L. 1984. **Andisols of the world.** In: Congreso Internacional de Suelos Volcanicos, Comunicaciones, Universidad de La Laguna Secretario de Publicaciones, serie informes 13, 368-387.
- LEAMY, M. L., G. D. SMITH, F. COLMET-DAAGE & M. OTOWA. 1980. **The morphological characteristics of Andisols.** In: Soils with variable charge. B. K. G. Theng (Ed.), New Zealand Soc. of Soil Sci., 17-34.
- LE BISSONNAIS, Y. 1996. **Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology.** *Europ. J. Soil Sci.*, 47, 425-437.
- LELONG, F. & B. SOUCHIER. 1970. **Bilans d'altération dans la séquence de sols vosgiens, sols bruns acides à podzols, sur granite.** *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 23, 3-4, 113-143.
- LORENZONI, P., A. MIRABELLA, D. BIDINI & L. LULLI. 1995. **Soil genesis on trachytic and leucitic lavas of Cimini volcanic complex (Latium, Italy).** *Geoderma*, 68, 79-99.
- MADEIRA, M., A. FURTADO, E. JEANROY & A. J. HERBILLON. 1994. **Andisols of Madeira Island (Portugal). Characteristics and classification.** *Geoderma*, 62, 363-383.
- MADEIRA, M. & E. JEANROY. 1984. **Mise en évidence de goethite en suspension dans les extraits pyrophosphate et tétraborate de certains sols gréseux du Portugal.** *Can. J. Soil Sci.*, 64, 505-514
- MAITAT, O., J.-P. BOUDOT, D. MERLET & J. ROUILLER. 1998. **Aluminium speciation, toxicity and transfert from soils to surface waters in two contrasting watersheds exposed to acid deposition in the Vosges Mountains (north-eastern France).** In: Proc. Second Int. Symposium ISMOM, Nancy, 3-6 septembre 1996. Plenum Publ. Co. New York, sous presse.
- MARTIN, J. P., H. ZUNINO, P. PEIRANO, M. CAIOZZI & K. HAIDER. 1982. **Decomposition of ¹⁴C-labeled lignins, model humic acid polymers, and fungal melanins in allophanic soils.** *Soil Biol. Biochem.*, 14, 289-293.
- MEHRA, O. P. & M. L. JACKSON. 1960. **Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate.** *Clays Clay Miner.*, 7, 317-327.
- MILLOT, G. 1964. **Géologie des argiles. Altérations, sédimentologie, géochimie.** Masson, Paris, 499 p.

- MIZOTA, C. & J. CHAPELLE. 1988. **Characterization of some Andepts and andic soils in Rwanda, central Africa.** *Geoderma*, 41, 193-209.
- MIZOTA, C. & L. P. VAN REEUWIJK. 1989. **Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions.** Soil Monograph 2, ISRIC, Wageningen, 185 p.
- MOINEREAU, J. 1977. **Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay-Vivarais-Coirons).** Thèse Doct. Sci., Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, 139 p.
- MOKMA, D. L. & P. BUURMAN. 1982. **Podzols and podzolization in temperate regions.** ISM monograph 1, Int. Soil Museum, Wageningen, 126 p.
- MORRISON, R. J., R. NAIDU, U. SINGH & D. M. LESLIE. 1988. **Andisols and related soils in the South Pacific Islands.** In: Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan, 1987. D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth & H. Eswaran (Eds.), SMSS, Washington DC, 494-501.
- NANZYU, M. 1988. **Phosphate reactions with andisols.** In: Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan, 1987. D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth & H. Eswaran (Eds.), SMSS, Washington DC, 567-579.
- NANZYU, M., R. A. DAHLGREN & S. SHOJI. 1993a. **Chemical characteristics of volcanic ash soils.** In: Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. S. Shoji, M. Nanzyo & R.A. Dahlgren (Eds.), *Developments in Soil Science* 21, 145-187.
- NANZYU, M., R. A. DAHLGREN & S. SHOJI. 1993b. **Physical characteristics of volcanic ash soils.** In: Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. S. Shoji, M. Nanzyo & R.A. Dahlgren (Eds.), *Developments in Soil Science* 21, 189-207.
- NDAYIRAGIJE, S. 1996. **Caractérisation d'une séquence d'altération de sols dérivés de matériaux pyroclastiques sous climat tropical humide des Antilles (Guadeloupe).** Thèse Doct. Sci., Univ. Catholique de Louvain, 181 p.
- NIEUWENHUYSE, A., A. G. JONGMANS & N. VAN BREEMEN. 1993. **Andisol formation in a Holocene beach ridge plain under the humid tropical climate of the Atlantic coast of Costa Rica.** *Geoderma*, 57, 423-442.
- NIZEYIMANA, E. 1997. **A toposequence of soils derived from volcanic materials in Rwanda: morphological, chemical, and physical properties.** *Soil Sci.*, 162, 350-360.
- NIZEYIMANA, E., T. J. BICKI & P. A. AGBU. 1997. **An assessment of colloidal constituents and clay mineralogy of soils derived from volcanic materials along a toposequence in Rwanda.** *Soil Sci.*, 162, 361-371.
- ORSINI, L. & J.-C. REMY. 1976. **Utilisation du chlorure de cobaltihexammine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols.** *Sci. du Sol*, 4, 269-275.
- OTOWA, M., S. SHOJI & M. SAIGUSA. 1988. **Allic, melanic and fulvic attributes of Andisols.** In: Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan, 1987. D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth & H. Eswaran (Eds.), SMSS, Washington DC, 191-202.
- PARFITT, R. L. 1986. **Towards understanding soil mineralogy. III. Notes on allophane.** N. Z. Soil Bureau Laboratory Report CM10, N.Z. Soil Bureau, DSIR, Lower Hutt, 19 p.
- PARFITT, R. L. 1990. **Soils formed in tephra in different climatic regions.** In: 14th Int. Congress of Soil Sci., Kyoto, Japan, Vol. VII, 134-139.
- PARFITT, R. L., C. W. CHILDS & D. N. EDEN. 1988. **Ferrihydrite and allophane in four Andepts from Hawaii and implications for their classification.** *Geoderma*, 41, 223-241.

- PARFITT, R. L. & B. CLAYDEN. 1991. Andisols - the development of a new order in Soil Taxonomy. *Geoderma*, 49, 181-198.
- PARFITT, R. L., M. RUSSEL & G. E. ORBELL. 1983. Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. *Geoderma*, 29, 41-57.
- PARFITT, R. L., M. SAIGUSA & J. D. COWIE. 1984. Allophane and halloysite formation in a volcanic ash bed under different moisture conditions. *Soil Sci.*, 138, 360-364.
- PARFITT, R. L. & A. D. WILSON. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: Volcanic soils. E. Fernandez Caldas & D. H. Yaalon (Eds.), Catena supplement 7, 1-8.
- PERTERSCHMITT, E. 1991. Les couvertures ferrallitiques des Ghâts occidentaux en Inde du Sud. Caractères généraux sur l'escarpement et dégradation par hydromorphie sur le revers. Thèse Univ. Nancy I, 145 p.
- QUANTIN, P. 1991. Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. Strasbourg, 470 p.
- RAUNET, M. 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. 438 p.
- RIGHI, D. 1977. Genèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. de Poitiers, 141 p.
- ROBERT, M. & A. HERBILLON. 1990. Application aux argiles des sols. Genèse, nature et rôle des constituants argileux dans les principaux types de sols des environnements volcaniques insulaires. In: Matériaux argileux. Structure, propriétés et applications. A. Decarreau (Ed.), Société Française de Minéralogie et de Cristallographie - Groupe Français des Argiles, Paris, 541-576.
- ROSELLO, V. 1984. Les sols bruns des Hauts (Ile de la Réunion). Thèse Univ. Paris VII, 200 p.
- ROUILLER, J., G. BURTIN & B. SOUCHIER. 1974. Note sur l'utilisation de l'hypochlorite de sodium dans l'analyse granulométrique des sols. *Bull. ENSAIA*, T. XVI, Fasc. I-II, 89-98.
- SAIGUSA, M., S. SHOJI & T. TAKAHASHI. 1980. Plant root growth in acid Andosols from northeastern Japan : 2. Exchange acidity Y_1 as a realistic measure of aluminium toxicity potential. *Soil Sci.*, 130, 242-250.
- SCHWERTMANN, U. 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitsch. Pflanzenern. Bodenkunde*, 105, 194-202.
- SHOJI, S. & Y. FUJIWARA. 1984. Active aluminium and iron in the humus horizons of Andosols from Northeastern Japan : their forms, properties, and significance in clay weathering. *Soil Sci.*, 137, 216-226.
- SHOJI, S., T. ITO, M. SAIGUSA & I. YAMADA. 1985. Properties of nonallophanic Andosols from Japan. *Soil Sci.*, 140, 264-277.
- SHOJI, S., M. NANZYU & R. A. DAHLGREN. 1993. Productivity and utilization of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. S. Shoji, M. Nanzyo & R.A. Dahlgren (Eds.), Developments in Soil Science 21, 209-251.
- SHOJI, S., M. NANZYU, R. A. DAHLGREN & P. QUANTIN. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soils Resources. *Soil Sci.*, 161, 604-615.

- SHOJI, S. & T. ONO. 1978. Physical and chemical properties and clay mineralogy of Andosols from Kitakami, Japan. *Soil Sci.*, 126, 297-312.
- SHOJI, S. & M. OTOWA. 1988. Distribution and significance of Andisols in Japan. In: Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan, 1987. D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth & H. Eswaran (Eds.), SMSS, Washington DC, 13-24.
- SHOJI, S., T. TAKAHASHI, M. SAIGUSA, I. YAMADA & F. C. UGOLINI. 1988. Properties of Spodosols and Andisols showing climosequential and biosequential relations in southern Hakkoda, northeastern Japan. *Soil Sci.*, 145, 135-150.
- SHOJI, S. & H.-M. YAMADA. 1991. Comparisons of mineralogical properties between tephra-derived Spodosols from Alaska and nontephra-derived Spodosols from New-England. *Soil Sci.*, 152, 162-183.
- SIEFFERMANN, G. 1973. Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun : variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Mémoires ORSTOM, N° 66, Paris.
- SIMONSON, R. W. 1979. Origin of the name "ando soils". *Geoderma*, 22, 333-335.
- SMITH, G. D. 1978. A preliminary proposal for the reclassification of Andepts and some Andic subgroups (ré-imprimé sous The Andisol Proposal, 1978, N. Z. Soil Bureau Record, 96, 1984).
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. Soil Taxonomy : a basic system for making and interpreting soil surveys. U. S. Dept. Agric. Nandbook N° 436, 754 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1990. Keys to Soil Taxonomy, 4th edition. SMSS Tech. Monogr. N° 19, Blacksburg, Virginia.
- SOIL SURVEY STAFF. 1992. Keys to Soil Taxonomy, 5th edition. SMSS Tech. Monogr. N° 19, Blacksburg, Virginia.
- SOIL SURVEY STAFF. 1994. Keys to Soil Taxonomy, 6th edition. USDA-SCS, U. S. Govt. Printing Office, Washington D.C., 306 p.
- SOLLINS, P., P. HOMANN & B. A. CALDWELL. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74, 65-105.
- SOUCHIER, B. 1971. Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 33, 134 p.
- SPAARGAREN, O. C. (Ed.). 1994. World Reference Base for Soil Resources. Draft. Wageningen / Rome, 162 p.
- STUSSI, J.-M. 1970. Le volcanisme associé au Culm des Vosges méridionales : tendances évolutives générales et géochimie de l' uranium et du thorium. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. Nancy I, 160 p.
- SUHARTA, N. 1992. Etude biodynamique de trois humus forestiers modèles de l'Est de la France : caractérisation fine des matières organiques par fractionnement granulométrique, datation ¹⁴C et observations ultrastructurales. Thèse Doct. Univ., Univ. Nancy I, 129 p.
- TAMM, O. 1922. Um best ämning ow de oorganiska komponenterna i markens gelcomplex. *Medd. Statens Skogsförsökst.*, 19, 385-404.
- THORP, J. & G. D. SMITH. 1949. Higher categories of soil classification : Order, suborder, and great soil groups. *Soil Sci.*, 67, 117.

- TISDALL, J. M. & J. M. OADES. 1982. **Organic matter and water-stable aggregates in soils.** *J. Soil Sci.*, 33, 141-163.
- UGOLINI, F. C. & R. A. DAHLGREN. 1987. **The mechanism of podzolization as revealed by soil solution studies.** *In: Podzols et podzolisation.* D. Righi & A. Chauvel (Eds.), AFES, INRA, 195-203.
- UGOLINI, F. C. & R. A. DAHLGREN. 1991. **Weathering environments and occurrence of imogolite/allophane in selected Andisols and Spodosols.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1166-1171.
- UGOLINI, F. C., R. DAHLGREN, S. SHOJI & T. ITO. 1988. **An example of andosolization and podzolization as revealed by soil solution studies, southern Hakkoda, northeastern Japan.** *Soil Sci.*, 145, 111-125.
- VEDY, J.-C., J. ROUILLER & D. MERLET. 1980. **Les solutions du sol dans deux écosystèmes des Basses-Vosges gréseuses triasiques.** *Mém. h. sér. Soc. géol. France*, 11, 127-134.
- VON ELLER, J.-P. 1964. **Dioritisation, granitisation et métamorphisme dans les Vosges cristallines du Nord. I - Région comprise entre la plaine d'Alsace, d'Andlau à Saint-Nabor, et le Champ-du-Feu.** *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 17, 3, 171-210.
- WADA, K. 1989. **Allophane and Imogolite.** *In: Minerals in Soil Environments.* 2nd Edition, J.B. Dixon & S.B. Weed (Eds.), Soil Sci. Soc. Am. Book Series, n°1, 1051-1087.
- WADA, K. & N. GUNJIGAKE. 1979. **Active aluminium and iron and phosphate adsorption in Ando soils.** *Soil Sci.*, 128, 331-336.
- WADA, K. & T. HIGASHI. 1976. **The categories of aluminium- and iron-humus complexes in Ando soils determined by selective dissolution.** *J. Soil Sci.*, 27, 357-368.
- WADA, K., Y. KAKUTO & H. IKAWA. 1986. **Clay minerals, humus complexes, and classification of four "andepts" of Maui, Hawaii.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1007-1013.
- WARKENTIN, B. P. & T. MAEDA. 1980. **Physical and mechanical characteristics of Andisols.** *In: Soils with variable charge.* B. K. G. Theng (Ed.), New Zealand Soc. of Soil Sci., 281-301.
- ZEBROWSKI, C. 1975. **Etude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion.** *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XIII, n° 3/4, 255-278.
- ZIDA, M. 1994. **Andisols et sols andiques dans le Massif Vosgien. Conditions de développement, caractéristiques et classification.** *Mém. D.E.A., Univ. Nancy I*, 52 p.
- ZUNINO, H., F. BORIE, S. AGUILERA, J. P. MARTIN & K. HAIDER. 1982. **Decomposition of ¹⁴C-labeled glucose, plant and microbial products and phenols in volcanic ash-derived soils of Chile.** *Soil Biol. Biochem.*, 14, 37-43.

ANNEXES

Annexe I

***PÉTROGRAPHIE ET COMPOSITION CHIMIQUE
DES ROCHES MÈRES***

Pétrographie

1. Roches volcaniques des Vosges méridionales

◆ Diabase à augite

Station de Ménard (STUSSI, 1970) : roches compactes, gris foncé, de texture microlitique, présentant de petites alvéoles calciteuses. De petits phénocristaux de plagioclase (labrador - oligoclase) très peu altérés tranchent sur une matrice à chlorite (fréquemment associée à de la calcite) et microlites de pyroxène (augite).

◆ Kératophyres quartziques

Stations de Goutte des Saules et de Tête de Demesy (FOURQUIN, 1973) : roches compactes à texture porphyrique glomérulaire présentant des vacuoles de calcite ou quartz auréolées de chlorite. La majeure partie des phénocristaux est représentée par des plagioclases (albite) groupés en amas et fréquemment altérés ; le reste étant constitué de quartz, chlorite et minéraux opaques. La pâte est essentiellement composée de microlites d'albite, quelquefois entourés par un mince liseré d'orthose, existant aussi en plages xénomorphes. Chlorite et minéraux opaques sont disséminés dans la pâte.

◆ Tufs kératophyriques

Station de Charborue (FOURQUIN, 1973) : ces roches sont caractérisées par une abondance plus grande des phénocristaux (par rapport aux roches précédentes) : quartz, albite, orthose, le plus souvent brisés. La pâte est pauvre en microlites d'albite et consiste en un assemblage granophyrique de quartz et feldspath ; de la chlorite et des minéraux opaques parsèment le fond.

◆ Porphyrites andésitiques basiques

Stations de Gsang, Rossberg, Masevaux, Saint Antoine et Schlüsselkopf (STUSSI, 1970) : roches de texture microlitique porphyrique présentant quelquefois des géodes de calcite. De petits phénocristaux de plagioclase blancs (3 à 4 mm) et plus rarement de pyroxène baignent dans une mésostase sombre aphanitique. Les plagioclases, en phénocristaux automorphes, sont séricitisés et chloritisés. Leur zonage va d'une composition labrador au coeur (An_{64}) à un cortex oligoclase (An_{30}). Les microlites, peu séricitisés, présentent le même zonage. Le pyroxène (augite) est surtout sous la forme de microlites dispersés dans la mésostase. Il était primitivement accompagné d'un périclase, entièrement pseudomorphosé en chlorite ou chlorite et quartz. Calcite et épidote complètent parfois cette paragenèse d'altération. La mésostase est aphanitique et fortement imprégnée de produits ferrugineux diffus lui conférant sa teinte sombre. Elle contient des microlites de plagioclase, de pyroxène, ainsi qu'un peu de pennine. Des alvéoles quartzo-chloriteuses peuvent se rencontrer.

◆ Porphyres trachytiques calco-magnésiens

Station de Belfahy (STUSSI, 1970) : roches de texture microlitique porphyrique. Des phénocristaux automorphes d'orthose, de plagioclase (albite séricitisée et chloritisée), de pyroxène (augite) et de biotite sont pris dans un fond gris brun foncé aphanitique (feldspatho-chloriteux).

◆ Brèches du Crémillot

Stations de Planche des Belles Filles et Croix du Choléra (FOURQUIN, 1973) : roches présentant une juxtaposition d'éléments acides rouges et trachylabradoritiques verts baignant dans un ciment formé des mêmes éléments mais plus fins.

◆ Trachyandésites porphyriques

Station de Tête des Sapins (FOURQUIN, 1973) : roches à faciès de porphyre vert présentant des phénocristaux de plagioclase (Andésine An₃₂) verts clairs très altérés, de clinopyroxènes frais et d'anciennes amphiboles entièrement pseudomorphosées en chlorite, calcite et serpentine. Le fond est constitué de microlites de feldspath et de petits pyroxènes ainsi que chlorite, calcite et oxydes de fer.

◆ Porphyres quartzifères rhyolitiques

Station d'Ordon (STUSSI, 1970) : roches de texture hyalo-porphyrique microbréchique. Des phénocristaux de quartz, de plagioclase (andésine séricitisée), de biotite et d'amphibole tranchent sur un fond brun aphanitique. Un peu d'augite apparaît en petits phénocristaux.

2. Roches volcaniques des Vosges septentrionales

◆ Tufs pyroclastiques basiques

Station de Champ du Feu (VON ELLER, 1964) : les roches basiques de la bande médiane du massif du Champ du Feu sont extrêmement variées du point de vue pétrographique : ce sont principalement des tufs pyroclastiques (faciès le plus répandu), des diabases, des microgabbros, des laves très basiques et des brèches volcaniques basiques ou à ciment basique

◆ Diabase microlitique à actinote

Stations de Grendelbruch, Schirmeck et Donon (JUTEAU & ROCCI, 1965) : roches gris-verdâtre, très finement grenues, à texture microlitique interstale, sans phénocristaux. La minéralogie est la suivante : albite - oligoclase, actinote, chlorite et minéraux opaques.

◆ Dolérites

Station d'Evau-B (JUTEAU & ROCCI, 1965) : roches grenues caractérisées par une texture subophitique. Les plagioclases automorphes (andésine) entrecroisés délimitent des interstices où brillent les pyroxènes (augite) plus ou moins chloritisés.

◆ Orthokératophyres quartziques

Station d'Evau-R (JUTEAU & ROCCI, 1965) : roches roses claires présentant les caractères d'une roche d'épanchement. La texture est de type pyroméride avec des shpérolites feldspathiques roses (orthose) et de muscovite sur un fond de quartz, calcédoine et albite.

◆ Basalte à olivine

Station de Servaumont (HETIER, 1968) : roche violacée massive, de texture microlitique porphyrique, à phénocristaux de plagioclase (labrador, An₅₀) et d'olivine, souvent à l'état de fantômes. Le fond présente une structure interstale et contient de l'augite microlitique. Les minéraux phylliteux sont des produits serpentineux et chloriteux provenant de l'altération des péridots et des augites.

◆ Tufs pyroclastiques acides

Station de Schliffstein (BAROZ & BENZAKOUR, 1989) : roches porphyriques claires fortement altérées. Elles présentent des enclaves énallogènes et une structure vitroclastique non orientée.

◆ Rhyolite hyperacide

Station de Blanc Rupt (BAROZ & BENZAKOUR, 1989) : roche gris-rosâtre massive présentant localement des enclaves de microquartzite micacé. La texture est de type porphyrique avec 30 à 40 % de phénocristaux de feldspath (sanidine) automorphes blanchâtres et de quartz, le plus souvent éclatés. Le fond est constitué d'une pâte gris-rosâtre quartzo-feldspathique.

◆ Rhyolite "normale"

Station de Malcôte (BAROZ & BENZAKOUR, 1989) : roches rouges à structure fluidale bien développée et légèrement porphyrique. Les feldspaths très altérés (sanidine) baignent dans une pâte quartzo-feldspathique à côté de petits pyroxènes très transformés.

3. Roches plutoniques

◆ Diorite de Neuntelstein

Station de Neuntelstein (DE BETHUNE *et al.*, 1968) : roche grenue sombre à phénocristaux de biotite et d'amphibole (40 %). Les plagioclases (55 %) automorphes sont séricitisés et le quartz interstitiel est présent en faible quantité (3 à 5 %). Les amphiboles (hornblende, 45 %), biotites et chlorites sont associées. La roche présente des veinules de hornblende, d'épidote et de préhnite.

◆ Diorite mésocrate à pyroxène

Stations de la Tête Niqueuse, Château-Lambert et la Pransière (ANDRE, 1983) : roches sombres grenues à tendance porphyroïde ou microgrenues, fréquemment orientées. Exceptionnellement du matériel microgrenu peut être observé en enclaves dans une diorite à pyroxène. Le plagioclase est un constituant important et apparaît en phénocristaux dans les faciès grenus (3 à 4 mm) ou en lattes inframillimétriques dans les faciès microgrenus. Il présente un coeur totalement séricitisé et une bordure de composition andésine (An₃₀) à oligoclase (An₂₅). Le pyroxène apparaît en cristaux limpides associés aux minéraux opaques mais il peut aussi ne subsister qu'en reliques au coeur des amphiboles. Les amphiboles sont les silicates ferro-magnésiens les plus abondants. Elles se développent en plages xénomorphes associées aux minéraux opaques ou sous forme fibreuse (actinote tardive). Les minéraux opaques sont en quantités importantes (ilménite, magnétite fortement hématisée). Les biotites se présentent en cristaux poecilitiques associées aux opaques. Des feldspaths potassiques peuvent localement être présents et le quartz est peu abondant (< 2 %).

◆ Syénogabbro holofeldspathique

Station de Langenberg (GUERIN, 1967) : roche moyennement grenue riche en plagioclases (56 %) de type labrador (An₆₀) sur lesquels tranchent les pyroxènes (22 %) verts foncés non ouralitisés. Les biotites, inaltérées, sont assez abondantes (8 %) et le feldspath alcalin occupe 11 % du volume. Le quartz est peu abondant (1,5 %). La roche présente quelques prismes d'apatite ; zircon et magnétite sont associés ou inclus dans les pyroxènes.

◆ Syénodiorite quartzifère leucocrate

Station de Plain des Boeufs (GUERIN, 1967) : roches de structure monzonitique constituées de grains moyens de même taille. Les plagioclases (An₃₈ à An₅₁) sont peu séricitisés et occupent la plus grande partie de la roche (45 %). Les plages roses d'orthose (18 %) englobent poecilitiquement les lattes de plagioclase et les minéraux colorés. Le clinopyroxène (13 %), le plus souvent transformé en ouralite ou en calcite, coexiste avec une hornblende primaire (13 %) et des biotites chloritisées (8 %) conférant à la roche son aspect syénodioritique. Le quartz est présent en faible quantité (5 %).

Composition chimique

Les données relatives à la composition chimique des roches mères étudiées sont consignées dans les Tab. A et B pour les roches volcaniques, C pour les roches plutoniques. Selon leurs teneurs en SiO₂, elles se répartissent en trois catégories :

- Roches pauvres en silice (47,3 à 51,9 % de SiO₂), présentant des teneurs assez élevées en Al₂O₃ (17 à 19 %). Elles sont moyennement riches en Fe₂O₃ et CaO (respectivement 8,4 à 12,2 % et 6,8 à 10,4 %), un peu moins en MgO (3 à 7,5 %) et pauvres en MnO (< 0,25 %). Leur alcalinité est faible (Na₂O de 1,3 à 5 % ; K₂O de 1,2 à 3,6 %).

- Roches de composition intermédiaire (52,3 à 64,8 % de SiO₂), avec des teneurs en Al₂O₃ légèrement plus faibles que les roches précédentes (14,4 à 17,5 %). De même elles sont un peu moins riches en Fe₂O₃ (4 à 11,8 %), CaO (0,9 à 8 %) et MgO (2 à 5 %). Leurs teneurs en MnO sont faibles (< 0,2 %) et leur alcalinité moyenne (Na₂O de 2,1 à 5,3 % ; K₂O de 1,4 à 5,4 %).

- Roches riches en silice (67,5 à 83,5 % de SiO₂), présentant des teneurs en Al₂O₃ un peu plus faibles (7,3 à 14,3 %). Elles sont pauvres en Fe₂O₃ (1 à 3,7 %), CaO (< 0,8 %) et MgO (< 2,4 %), avec des teneurs en MnO négligeables. Certaines présentent une faible alcalinité ; d'autres montrent de fortes teneurs en alcalins, notamment en K₂O.

Tab. A - Analyses chimiques des roches volcaniques des Vosges méridionales.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	52,76	72,32	71,62	49,82	54,62	50,53	59,96	57,60	64,79
Al ₂ O ₃	15,82	13,98	11,38	19,08	16,28	18,30	15,26	20,30	15,55
Fe ₂ O ₃	9,68	1,52	3,28	8,84	8,57	9,07	5,93	4,39	3,90
FeO									
MnO	0,15	0,00	0,02	0,15	0,08	0,16	0,09	0,11	0,09
MgO	4,36	0,29	0,87	2,94	1,98	4,35	3,07	1,31	2,19
CaO	6,13	0,07	0,18	6,78	0,89	8,05	3,18	4,49	2,31
Na ₂ O	4,01	0,20	0,20	4,90	5,30	3,71	3,45	5,66	3,12
K ₂ O	1,40	8,00	2,90	1,90	3,50	1,75	5,38	3,32	5,17
TiO ₂	1,39	0,27	0,27	1,18	1,20	1,07	0,74	0,80	0,47
P ₂ O ₅		0,02	0,01	0,31	0,39				
PF	4,32	1,39	2,11	4,08	2,59	2,99	3,23	2,30	2,50
Total	100,02	98,06	92,84	99,98	95,40	99,98	100,29	100,28	100,09

1 : Diabase à augite de Ménard d'après STUSSI (1970), moyenne de 9 analyses. ; 2 : Kératophyre quartzique de Goutte des Saules et Tête de Demesy ; 3 : Tufs kéraatophyriques de Charborue ; 4 : Porphyrite andésitique basique de Gsang ; 5 : Porphyrite andésitique basique de Rossberg ; 6 : Porphyrite andésitique de Masevaux, Saint-Antoine et Schlüsselkopf d'après STUSSI (1970), moyenne de 8 analyses ; 7 : Porphyres trachytiques de Belfahy d'après STUSSI (1970), moyenne de 14 analyses ; 8 : Trachyandésites porphyriques de Tête des Sapins d'après FOURQUIN (1973) ; 9 : Porphyres quartzifères rhyolitiques d'Ordon d'après STUSSI (1970), moyenne de 11 analyses.

Tab. B - Analyses chimiques des roches volcaniques des Vosges septentrionales.

	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	51,90	57,40	47,30	75,60	47,70	83,53	75,41	67,55
Al ₂ O ₃	18,25	14,50	18,20	12,50	17,48	7,28	11,57	14,28
Fe ₂ O ₃	2,10	11,78	9,43	0,98	8,39	0,72	1,64	3,55
FeO	6,80					2,14	0,3	0,11
MnO	0,25	0,19	0,19	0,03	0,16	0,00	0,03	0,03
MgO	4,30	2,58	5,77		7,51	0,25	0,96	2,40
CaO	7,65	2,38	10,39	0,29	6,32	0,75	0,15	0,34
Na ₂ O	1,35	4,72	2,88	2,12	3,27	4,44	1,05	0,32
K ₂ O	1,70	1,46	1,25	5,93	1,66	0,55	7,26	5,56
TiO ₂	1,25	1,24	0,96	0,12	1,20	0,01	0,11	0,54
P ₂ O ₅	0,20							
PF	3,65				6,18	0,05	1,03	4,18
Total	99,40	96,25	96,37	97,57	99,87	99,72	99,51	98,86

1 : Tufs pyroclastiques basiques de Champ du Feu d'après VON ELLER (1964) ; 2 : Diabase microlitique de Grendelbruch, Schirmeck et Donon d'après JUTEAU & ROCCI (1966) ; 3 : Dolérite d'Evaux-B d'après JUTEAU & ROCCI (1966) ; 4 : Orthokératophyre d'Evaux-R d'après JUTEAU & ROCCI (1966) ; 5 : Basalte de Servaumont d'après BAROZ & BENZAKOUR (1989), moyenne de trois analyses ; 6 : Tufs pyroclastiques acides de Schliffstein d'après BAROZ & BENZAKOUR (1989) ; 7 : Rhyolite hyperacide de Blanc Rupt d'après BAROZ & BENZAKOUR (1989) ; 8 : Rhyolite "normale" de Malcôte d'après BAROZ & BENZAKOUR (1989).

Tab. C - Analyses chimiques des roches plutoniques.

	1	2	3	4
SiO ₂	52,30	48,08	51,6	51,9
Al ₂ O ₃	17,50	16,92	17,6	17,9
Fe ₂ O ₃	3,80	12,23	8,51	8,51
FeO	6,10			
MnO	0,20	0,17	0,13	0,13
MgO	4,95	5,00	4,92	3,91
CaO	8,00	8,34	8,07	7,58
Na ₂ O	2,10	3,26	3,15	3,23
K ₂ O	1,50	2,43	2,55	3,57
TiO ₂	1,15	1,57	0,82	1,19
P ₂ O ₅	0,23			
PF	1,90	1,87	1,55	2,08
Total	99,73	99,87	98,9	100,00

1 : Diorite de Neuntelstein d'après DE BETHUNE *et al.* (1968) ; 2 : Diorite de Château-Lambert, la Pransière et Tête Niqueuse d'après ANDRE (1983) ; 3 : Syénogabbro de Langenberg GUERIN (1967) ; 4 : Syénodiorite de Plain de Boeufs d'après GUERIN (1967).

Annexe II

FICHES DE SOLS

Profil n° 1 - Sol brun andique : Ménard (ZIDA, 1994)

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 931,1 ; y = 2315,1.

Altitude : 840 m.

Topographie : Haut de versant.

Exposition : S.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1500 mm.

Roche mère : Diabase à augite.

Végétation : Hêtre, quelques chênes, noisetiers ; ronces.

Description

0-10 cm	Mull ; noir ; grumeleux ; graveleux ; caillouteux ; nombreuses racines ; transition progressive.
A ₁ B 10-45/50 cm	Noir ; microagrégats floconneux ; très caillouteux ; très organique ; très nombreuses racines ; lombrics présents ; transition brutale.
B +50 cm	Brun jaunâtre ; microagrégats très caillouteux ; sensation cireuse au toucher ; quelques racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR3/2	0,8	77	4,4	3,8	0,6	7,6	8,9	13
40-50	10YR2/2	10YR5/3	0,9	76	4,4	4,0	0,4	4,7	5,1	13

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _{o+1/2Fe_o}	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	1,10	1,66	0,07	0,90	1,09	1,93	0,8	0,7
40-50	1,26	1,80	0,12	1,03	1,19	2,16	0,8	0,7

Profil n° 2 - Sol brun andique : Ordon (ZIDA, 1994)

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 933,9 ; y = 2315,2.

Altitude : 900 m.

Topographie : Haut de pente.

Exposition : SE.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1550 mm.

Roche mère : Porphyres quartzifères rhyolitiques.

Végétation : Hêtraie pure ; quelques fougères femelles, rares ronces ; strate herbacée presque nulle ; tapis de feuilles mortes.

Description

0-10 cm	Moder très noir ; microagrégats coprogènes agglomérés gravelo-caillouteux ; nombreuses racines ; nombreux filaments mycéliens ; transition floue.
A ₁ B 10-45/50 cm	Brun noir ; microagrégats floconneux à grumeleux très caillouteux ; nombreuses racines ; transition nette.
B +50 cm	Jaunâtre ; microagrégats floconneux à grumeleux très caillouteux ; quelques racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR2/1	0,7	76	4,2	3,8	0,4	7,1	10,1	15
40-50	10YR2/2	10YR3/2	0,9	79	4,4	4,2	0,2	4,0	6,0	17

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _{o+1/2Fe_o}	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	0,92	1,08	0,04	0,88	1,00	1,46	1,0	0,9
40-50	1,38	1,12	0,18	1,28	1,06	1,94	0,9	0,9

Profil n° 3 - Sol brun andique : Tête des Sapins (ZIDA, 1994)

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 932,1 ; y = 2316,5.

Altitude : 960 m.

Topographie : Haut de versant.

Exposition : NO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1650 mm.

Roche mère : Trachyandésite porphyrique.

Végétation : Hêtre, rares épicéas ; ronces, fétuque ; quelques luzules, canches, polytric.

Description

A ₁	0-5 cm	Mull à mull-moder ; grumeleux ; noir ; riche en MO ; nombreuses racines ; quelques cailloux ; transition assez nette.
A ₁ B	5-25 cm	Brun foncé ; microagrégé à grumeleux ; quelques cailloux ; nombreuses racines ; meuble ; transition progressive.
B	25-60 cm	Brun beige ; grumeleux à grumeleux polyédrique ; meuble mais plus dense ; quelques cailloux ; nombreuses racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR3/3	0,8	78	4,5	4,0	0,5	6,2	7,0	15
40-50	10YR3/2	10YR5/3	1,2	74	4,5	4,3	0,2	3,1	3,1	15

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _o +1/2Fe _o	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	1,18	1,32	0,06	1,03	1,09	1,84	0,9	0,8
40-50	1,32	0,90	0,14	1,08	0,63	1,77	0,8	0,7

Profil n° 4 - Podzol : Tête de Charborue versant EST

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 932,6 ; y = 2316,8.

Altitude : 1090.

Topographie : 20 m sous sommet.

Pente : Moyenne.

Exposition : Est.

Drainage : Bon.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1700 mm.

Roche mère : Tufs kératophyriques.

Végétation : Hêtres, sapins et sorbiers ; myrtille, canche, callune ; dicranum et hypnum.

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	Mor ; noir ; L : 2 cm, feuilles et aiguilles, très nombreuses racines ; F : 1 cm ; H : 7 cm, compact, s'effrite en microagrégats.
E	10 - 60 cm	Brun légèrement rosé ; structure sub-polyédrique ; limono-sableux ; très nombreux cailloux et blocs ; transition nette.
B _h	60 - 65 cm	Noir très foncé légèrement rosé ; structure pelliculaire ; plus riche en MO ; plus humide ; nombreuses racines sub-horizontales ; très caillouteux.
B _{hs}	65 - 100 cm	Brun jaunâtre foncé ; structure pelliculaire et légèrement consolidé par endroits ; limono-sableux ; nombreux blocs ; quelques racines entre les blocs ; passage progressif.
BC	+ 100 cm	Brun jaunâtre foncé ; très nombreux cailloux et blocs.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/1	10YR2/2	3,2	2,5	0,7	30,28	1,26	24
10-60	7,5YR4/2	10YR6/3	3,6	2,8	0,8	0,96	0,08	12
60-65	10YR2/2	10YR4/4	4,0	3,7	0,3	5,62	0,24	23
65-100	10YR3/4	10YR5/4	4,2	4,1	0,1	3,89	0,14	28
+ 100	10YR3/6	10YR5/4	4,3	4,1	0,2	3,11	0,12	26

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)					
0-10	0,10	0,06	0,00	0,01	0,13	0,027
10-60	0,11	0,02	0,00		0,12	0,051
60-65	0,96	0,92	0,03		1,42	1,231
65-100	1,10	0,52	0,06		1,36	0,689
+ 100	0,98	0,46	0,06		1,21	0,502

Profil n° 5 - Podzol : Tête de Charborue versant OUEST

Cf. page 109.

Profil n° 6 - Sol brun ocreux : Croix du Choléra

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 931,1 ; y = 2317,2.

Altitude : 700 m.

Topographie : 50 m sous sommet.

Pente : Forte.

Exposition : O.

Température (moyenne annuelle) : ~ 8,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1700 mm.

Roche mère : Brèche du Crémillot.

Végétation : Sapinière, quelques hêtres et chênes ; canche, myrtille, polytric.

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	L et F : 3 cm ; A ₁ : mull-moder, noir, léger, meuble, nombreuses racines , microagrégé.
A ₁ B	10 - 40 cm	Noir très foncé ; microagrégé à sur-structure sub-polyédrique ; sablo-limoneux ; meuble ; friable ; très nombreux cailloux et racines.
B	+ 40 cm	Brun jaunâtre foncé ; microagrégé à sur-structure sub-polyédrique ; sablo-limoneux ; meuble ; friable ; très nombreux cailloux et racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/2	10YR3/3	4,1	3,7	0,4	7,36	0,46	16
40-50	10YR3/4	10YR5/4	4,3	4,0	0,3	4,08	0,20	20

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	0,80	0,64	0,04	1,12	0,430
40-50	0,94	0,64	0,14	1,26	0,211

Profil n° 7 - Sol brun ocreux : Planche des Belles Filles

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 933,2 ; y = 2317,8.

Altitude : 1020 m.

Topographie : Talus proche crête.

Pente : Faible.

Exposition : N.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1800 mm.

Roche mère : Brèche du Crémillot.

Végétation : Hêtraie, quelques sapins ; canche, myrtille.

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	Moder ; noir ; petite litière, F : 3 cm.
AB	10 - 50 cm	Noir très foncé de 10 à 30 cm puis brun foncé ; microagrégé ; sablo-limoneux ; meuble ; friable ; poreux ; nombreux cailloux et blocs ; nombreuses racines.
B	50 - 80 cm	Brun jaunâtre foncé ; microagrégé ; sablo-limoneux ; meuble ; friable ; poreux ; nombreux cailloux et blocs ; nombreuses racines.
BC	+ 80 cm	Brun jaunâtre foncé ; microagrégé ; sablo-limoneux ; meuble ; friable ; poreux ; nombreux cailloux et blocs.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/1	10YR3/2	3,8	3,1	0,7	18,64	1,13	17
10-30	10YR2/2	10YR3/3	4,4	3,8	0,6	9,81	0,60	16
30-50	10YR3/3	10YR4/4	4,6	4,1	0,5	7,63	0,43	18
50-80	10YR3/4	10YR5/4	4,6	4,2	0,4	5,00	0,27	19
+ 80	10YR3/6	10YR6/4	4,8	4,3	0,5	1,63	0,09	18

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _p	Fe _p	Fe _t
	(%)						
0-10	0,44	1,18	0,02	0,01	0,39	1,15	0,40
10-30	0,98	1,54	0,03		0,90	1,55	0,11
30-50	1,56	1,32	0,10		1,30	1,15	0,07
50-80	1,32	0,70	0,14		1,11	0,64	0,05
+ 80	0,82	0,26	0,12				

Prof. (cm)	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o	Allophanes (%)	Al _o +1/2Fe _o (%)	DOEO
0-10	0,9	1,0	0,2	1,03	0,792
10-30	0,9	1,0	0,4	1,75	0,687
30-50	0,8	0,9	1,2	2,22	0,681
50-80	0,8	0,9	0,8	1,67	0,422
+ 80				0,95	0,211

Profil n° 8 - Andosol : Belfahy (ZIDA, 1994)

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 930,9 ; y = 2318,6.

Altitude : 835 m.

Topographie : Haut de versant.

Exposition : E-SE.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1700 mm.

Roche mère : Porphyre trachytique calco-magnésien.

Végétation : Sapinière à hêtre, noisetier ; fétuque, ronce.

Description

	0 - 10 cm	Mull noir ; finement grumeleux et microagrégé ; nombreuses racines ; transition assez nette.
A ₁ B ₁	10 - 25 cm	Brun foncé ; microagrégé ; très léger ; meuble ; sensation cireuse au toucher ; caillouteux ; nombreuses racines ; transition progressive.
A ₁ B ₂	25 - 65 cm	Brun de plus en plus clair ; microagrégé ; meuble ; cailloux et blocs.
B/C	65 - 80 cm	Arène jaunâtre très caillouteux.
	+ 80 cm	Arène tassée ; caillouteux.

Prof. (cm)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N	Im
	H ₂ O	KCl					
10-20	4,4	4,0	0,4	6,2	8,6	16	1,93
40-50	4,9	4,2	0,7	3,7	5,8	18	1,92

Prof. (cm)	Couleur Munsell		H ₂ O 15 bar (%)		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)
	Humide	Sec	Humide	Sec		
10-20	10YR2/2	10YR3/3	22	24	0,6	87
40-50	10YR3/2	10YR5/3	19	22	0,9	86

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p			Allophanes	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
				Al _p	Fe _p	Al _o +1/2Fe _o			
10-20	1,44	1,08	0,13	1,24	0,92	1,98	0,8	0,9	0,9
40-50	1,60	1,06	0,21	1,39	0,90	2,13	1,0	0,9	0,8

Profil n° 9 - Sol brun ocreux : Goutte des Saules

Cf. page 110.

Profil n° 10 - Andosol : Saint-Antoine (ZIDA, 1994)

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 933,7 ; y = 2319.

Altitude : 1065 m.

Topographie : Haut de pente.

Exposition : NO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Porphyrite andésitique basique.

Végétation : Hêtre, rares sapins ; fétuque, luzule, fougère femelle, polytric.

Description

0-5 cm	Mull-moder ; grumeleux à massif ; quelques cailloux ; nombreuses racines ; transition assez nette.
A ₁ B ₁ 5-25 cm	Brun foncé ; microagrégé ; floconneux ; meuble ; sensation cireuse au toucher ; quelques cailloux ; nombreuses racines.
A ₁ B ₂ 25-70 cm	Brun ; microagrégé ; graveleux ; meuble ; sensation cireuse au toucher ; quelques cailloux et racines.

Prof. (cm)	pH		Δ pH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N	Im
	H ₂ O	KCl					
10-20	4,3	3,9	0,4	7,3	9,9	17	2,27
40-50	4,6	4,3	0,3	3,6	6,7	18	2,43

Prof. (cm)	Couleur Munsell		H ₂ O 15 bar (%)		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)
	Humide	Sec	Humide	Sec		
10-20	10YR2/2	10YR3/2	29	33	0,8	86
40-50	10YR3/3	10YR5/3	21	30	0,9	87

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p / Fe _p			Allophanes	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
				Al _p / Fe _p (%)					
10-20	1,22	1,70	0,06	1,05	1,38	2,07	0,6	0,9	0,8
40-50	1,52	1,66	0,11	1,31	1,55	2,35	0,9	0,9	0,9

Profil n° 11 - Sol brun andique : Plain des Boeufs (ZIDA, 1994)

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 934,4 ; y = 2320,2.

Altitude : 900 m.

Topographie : Replat de croupe en haut de versant.

Exposition : NO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Syénodiorite quartzifère leucocrate.

Végétation : Hêtraie-sapinière ; tapis de fétuque.

Description

	0 - 10 cm	Mull ; noir ; grumeleux et microagrégé ; meuble ; pas de cailloux ; nombreuses racines fines.
A ₁ B	10 - 20 cm	Brun foncé ; microagrégé ; floconneux ; meuble ; pas de cailloux ; très nombreuses racines moyennes ; transition assez nette.
B	20 - 50 cm	Brun ocre ; microagrégé ; floconneux ; meuble ; rares cailloux ; nombreuses racines ; transition progressive.
B/C	50 - 70 cm	Brun beige ; grumeleux ; meuble ; pas de cailloux ; quelques racines ; transition progressive.
	+ 70 cm	Arène ; gris beige ; meuble.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/2	10YR3/3	0,8	66	4,4	3,8	0,6	6,0	5,4	17
40-50	10YR3/4	10YR5/4	0,8	75	4,4	4,2	0,2	2,7	3,8	19

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _o +1/2Fe _o	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	0,66	1,18	0,03	0,56	0,91	1,25	0,8	0,8
40-50	1,10	1,36	0,08	0,94	1,25	1,78	0,9	0,9

Profil n° 12 - Sol brun ocreux : Tête de Demesy

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 934,1 ; y = 2320,1.

Altitude : 1100 m.

Topographie : 30 m sous crête.

Pente : Faible.

Exposition : N-NO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Kérotophyres quartziques.

Végétation : Pessière à hêtre ; tapis de canche, myrtilles abondantes ; polytric, dicranum.

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	Moder ; noir ; microagrégats de MO ; nombreuses racines. L et F : 4 cm.
A ₁ B	10 - 20 cm	Noir très foncé ; structure en agrégats anguleux ; sub-ployédrique ; toucher gluant ; meuble ; quelques racines et cailloux.
B	20 - 50 cm	Noir très foncé ; plus microagrégé et sur-structure sub-polyédrique ; toucher gluant ; très humide ; caillouteux ; quelques racines.
BC	+ 50 cm	Brun jaunâtre foncé ; sablo-graveleux caillouteux.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/1	10YR3/2	3,3	2,7	0,6	19,38	1,08	18
10-20	10YR2/2	10YR3/3	3,9	3,5	0,4	8,40	0,43	20
20-50	10YR2/2	10YR4/3	4,3	4,0	0,3	7,18	0,35	21
+ 50	10YR3/4	10YR4/4	4,5	4,2	0,3	6,37	0,28	23

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _p	Fe _p	Fe _t
	(%)						
0-10	0,32	0,54	0,02	0,02	0,30	0,41	0,20
10-20	0,60	0,96	0,02		0,55	0,81	0,21
20-50	1,32	0,98	0,06		1,25	0,85	0,12
+ 50	1,50	0,38	0,12		1,30	0,30	0,06

Prof. (cm)	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o	Allophanes (%)	Al _o +1/2Fe _o (%)	DOEO
0-10	0,9	0,8	0,1	0,59	0,484
10-20	0,9	0,8	0,2	1,08	0,642
20-50	1,0	0,9	0,3	1,81	0,914
+ 50	0,9	0,8	0,7	1,69	0,704

Profil n° 13 - Andosol : Tête Niqueuse

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 929,3 ; y = 2327,9.

Altitude : 720 m.

Topographie : Paysage bosselé, 20 m sous sommet.

Pente : Faible.

Exposition : E-NE.

Drainage : Circulations latérales probables.

Température (moyenne annuelle) : ~ 8,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Diorite mésocrate à pyroxène.

Végétation : Hêtraie, quelques sapins et épicéas ; canche, myrtille.

Description

0-6 cm	Litière de feuilles de hêtre ; F : feuilles de hêtre décomposées et aiguilles ; quelques cailloux ; nombreuses racines.
A ₁ 6-10 cm	Moder, noir ; limono-argileux ; microagrégé ; grains non revêtus ; meuble ; léger ; poreux ; quelques cailloux ; nombreuses racines.
A ₁ B 10-50 cm	Brun noir (10YR2/1) ; toucher gluant ; microagrégé ; très humide ; très nombreux cailloux et racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR3/3	4,3	3,9	0,4	13,94	0,73	19
40-50	10YR2/1	10YR3/4	4,4	4,1	0,3	14,95	0,69	22

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	1,40	1,06	0,05	1,93	1,349
40-50	2,18	1,80	0,06	3,08	2,313

Profil n° 14 - Sol brun andique : La Pransière

Localisation : Giromagny 1:25000 - x = 932,3 ; y = 2326,6.

Altitude : 930.

Topographie : Proche sommet.

Pente : Très faible.

Exposition : S.

Drainage : Circulations latérales probables.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Diorite mésocrate à pyroxène.

Végétation : Sapinière à hêtre ; canche, myrtille.

Description

0-3 cm	F, H : débris de feuilles de hêtre.
A ₁ 3-8 cm	Moder ; noir ; grumeleux ; léger ; meuble ; nombreuses racines fines et moyennes.
A ₁ B 8-50 cm	Brun chocolat (10YR2/1 à 10YR2/2) ; microagrégé ; aspect poudreux ; circulations latérales probables ; nombreux cailloux et blocs ; nombreuses racines moyennes et plus grosses.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR3/3	4,5	4,1	0,4	7,73	0,36	21
40-50	10YR2/2	10YR3/4	4,4	4,3	0,1	5,67	0,26	22

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	0,96	0,88	0,05	1,40	0,716
40-50	1,14	0,64	0,10	1,46	0,688

Profil n° 15 - Andosol : Château-Lambert

Cf. page 68.

Profil n° 16 - Sol brun andique : Langenberg (ZIDA, 1994)

Localisation : Masevaux 1:25000 - x = 939,3 ; y = 2321,5.

Altitude : 900 m.

Topographie : Ressaut en haut d'une pente forte.

Exposition : N.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 2000 mm.

Roche mère : Syénogabbro holofeldspathique.

Végétation : Hêtraie + quelques rares sapins ; tapis de feuilles mortes (5 à 10 cm) ; quelques fougères et framboisiers.

Description

0-5 cm	Humus curieux : noir, plutôt massif mais meuble (s'effrite en microagrégats floconneux).
A ₁ B 5-60 cm	Brun foncé et très riche en MO humifiées ; microagrégé floconneux ; très meuble ; texture plutôt fine ; quelques blocs ; nombreuses racines fines et moyennes, horizontales ou obliques ; toucher juteux, gluant.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/2	10YR3/3	0,8	74	4,3	3,9	0,4	5,8	7,8	19
40-50	10YR2/2	10YR4/3	0,7	81	4,4	4,2	0,2	4,4	6,8	20

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _o +1/2Fe _o	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	1,04	1,18	0,06	0,92	0,99	1,63	0,9	0,8
40-50	1,30	1,04	0,11	1,14	1,01	1,82	0,9	1,0

Profil n° 17 - Sol brun andique : Masevaux

Localisation : Masevaux 1:25000 - x = 947,7 ; y = 2320,7.

Altitude : 640 m.

Topographie : Replat.

Pente : Faible.

Exposition : S.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1800 - 2000 mm.

Roche mère : Porphyrite andésitique basique.

Végétation : Chênaie avec quelques sapins, épicéas et noisetiers ; Aspérule, anémone.

Description

- A₁ 0 - 10 cm Litière de feuilles de chêne et épinas.
- A₁B 10 - 20 cm Brun noir (10YR2/1) ; grumeleux ; nombreux cailloux et racines ; transition progressive.
- A₁B 40 - 50 cm Brun sombre (10YR3/3) ; limono-sableux graveleux ; grumeleux à tendance polyédrique ; meuble ; léger ; poreux ; nombreux cailloux et blocs ; nombreuses grosses racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR5/3	4,4	3,7	0,7	5,07	0,26	20
40-50	10YR3/3	10YR5/3	4,9	3,8	1,1	3,03	0,15	20

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	0,66	0,62	0,06	0,97	0,348
40-50	0,72	0,66	0,10	1,05	0,270

Profil n° 18- Sol brun andique : Rossberg

Cf. page 111.

Profil n° 19 - Andosol : Gsang

Cf. page 69.

Profil n° 20 - Sol brun andique : Schlüsselkopf (ZIDA, 1994)

Localisation : Munster 1:50000 - x = 960,3 ; y = 2333,2.

Altitude : 850 m.

Topographie : 30 m sous sommet.

Exposition : NO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1200 mm.

Roche mère : Porphyrite andésitique basique.

Végétation : Hêtraie-sapinière-herablaie ; tapis de fétuque, mercuriale et aspérule.

Description

0 - 10 cm	Mull noir ; grumeleux ; sablo-limoneux graveleux ; nombreux graviers et cailloux ; meuble ; friable ; nombreuses racines fines ; transition progressive.
A ₁ B 10 - 50 cm	Brun foncé ; sablo-limoneux graveleux + nombreux cailloux anguleux ; structure microagrégée fine, friable ; nombreuses racines fines et moyennes ; transition assez nette.
B - B/C 50 - 80 cm	Brun ; sablo-limoneux ; très nombreux cailloux anguleux ; structure microagrégée à sous structure grumeleuse ; quelques racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR4/1	0,8	58	4,9	4,0	0,9	2,7	8,6	18
40-50	10YR2/2	10YR5/2	0,9	63	4,7	4,0	0,7	6,4	2,0	20

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _o +1/2Fe _o	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	0,77	0,40	0,04	0,80	0,45	0,97	1,0	1,1
40-50	0,92	0,45	0,08	0,90	0,50	1,15	1,0	1,1

Profil n° 21 - Sol brun andique : Servaumont (ZIDA, 1994)

Localisation : Sainte-Marie aux Mines 1:25000 - x = 948,2 ; y = 2382,1.

Altitude : 780 m.

Topographie : Haut de versant près de la ligne de crête, pente 10 %.

Exposition : SO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1300-1500 mm.

Roche mère : Basalte à olivine.

Végétation : Pessière + quelques sureau, frêne et sorbier ; tapis herbacé : épilobe, lamier jaune, mercuriale, Sénéçon de Fuchs.

Description

A ₁	0 - 10 cm	Mull brun rouge foncé (5YR3/2) ; toucher tixotropique ; grumeaux très fins ; très poreux ; peu cohérent ; quelques racines fines.
A ₁ B	10 - 15 cm	Horizon de transition
B ₁	15 - 55 cm	Brun rouge (5YR4/2) ; caractère tixotropique affirmé ; très fine structure grumeleuse dans un ensemble fondu ; porosité élevée ; légère cohésion due au tassement ; quelques racines moyennes ; transition progressive.
B ₂	55 - 80 cm	Brun rouge (5YR4/3) ; même description que l'horizon sus-jacent mais moins de racines et plus de cailloux et de blocs.
BC	+ 80 cm	Brun rouge (5YR4/4) ; toucher tixotropique ; nombreux cailloux et blocs enrobés d'un produit d'altération fin et léger (Da = 0,8).

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	5YR3/2	10YR4/3	0,8	66	4,4	4,0	0,4	9,5	2,8	14
40-50	5YR3/3	5YR5/4	0,7	85	4,8	4,2	0,6	5,3	1,6	15

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _o +1/2Fe _o	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	0,88	0,45	0,1	0,69	0,35	1,11	0,8	0,8
40-50	1,50	0,70	0,45	0,46	0,20	1,85	0,3	0,3

Profil n° 22 - Sol brun andique : Champ du Feu (ZIDA, 1994)

Localisation : Sélestat 1:50000 - x = 963,6 ; y = 1090,0.

Altitude : 1010 m.

Topographie : Presque sommet, pente : 3 %.

Exposition : N.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1500 mm.

Roche mère : Tufs pyroclastiques basiques.

Végétation : Hêtraie + quelques rares épicéas ; luzule, canche.

Description

0-10 cm	Moder : L (6 cm) : feuilles de hêtre ; H (4 cm) : noir, massif, plastique ; transition nette.
A ₁ B 10-40 cm	Brun noir ; sablo-limoneux ; très caillouteux ; microagrégé ; floconneux ; nombreuses racines ; meuble ; aéré ; friable ; riche en MO ; transition progressive.
B 40-70 cm	Brun ; sablo-limoneux ; très caillouteux + blocs ; structure microagrégée à sous structure faiblement grumeleuse ; quelques racines ; présence encore de MO.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		Da (g.cm ⁻³)	Rét.P (%)	pH		ΔpH	Al éch. cmol/kg	C (%)	C/N
	Humide	Sec			H ₂ O	KCl				
10-20	10YR2/1	10YR3/2	0,5	76	4,0	3,6	0,4	14,7	11,7	18
40-50	10YR2/2	2,5YR4/4	0,6	85	4,5	4,1	0,4	9,1	10,3	18

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Al _{o+1/2} Fe _o	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o
	(%)							
10-20	1,00	1,50	0,04	1,05	1,40	1,75	1,1	0,9
40-50	1,55	1,50	0,10	1,50	1,40	2,30	1,0	0,9

Profil n° 23 - Sol brun andique : Neuntelstein

Localisation : Molsheim 1:50000 - x = 969,4 ; y = 1092,1.

Altitude : 960 m.

Topographie : Proche sommet.

Pente : Faible.

Exposition : O-SO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1500 mm.

Roche mère : Diorite de Neuntelstein.

Végétation : Plantation d'épicéas (~ 40 ans) ; Quelques fétuques.

Description

		Litière d'aiguilles de 2 cm.
A ₀ A ₁	0 - 2 cm	Noir (10YR2/1) ; microagrégats organiques ; fragments d'aiguilles ; nombreux cailloux.
A ₁	2 - 10 cm	Brun noir ; limono-sableux-argileux ; grumeleux ; meuble ; poreux ; nombreux cailloux ; nombreuses racines d'épicéas ; transition progressive.
A ₁ B	10 - 25 cm	Brun foncé (10YR 2/2) ; limono-sableux-argileux ; grumeleux ; meuble ; poreux ; nombreux cailloux et racines.
B	25 - 50 cm	Brun (10YR3/6) ; limono-sableux-argileux ; grumeleux à tendance polyédrique ; meuble ; très nombreux cailloux ; nombreuses racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-2	10YR2/1	10YR3/2	3,9	3,3	0,6	12,83	0,81	16
10-20	10YR2/2	10YR4/3	4,3	3,9	0,4	5,95	0,43	14
40-50	10YR3/6	10YR5/4	4,4	4,1	0,3	2,90	0,23	13

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
0-2	0,56	0,60	0,03	0,86	0,541
10-20	0,78	0,56	0,05	1,06	0,365
40-50	1,00	0,60	0,15	1,30	0,257

Profil n° 24 - Sol brun andique : Evaux - B

Localisation : Cirey-sur-Vezouze 1:50000 - x = 956,7 ; y = 1092,6.

Altitude : 550 m.

Topographie : Haut de pente dans thalweg.

Pente : Moyenne.

Exposition : SE.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1300 mm.

Roche mère : Dolérite.

Végétation : Sapin ; Canche.

Description

10 - 20 cm Rouge ; meuble ; poreux.

40 - 50 cm Rouge ; meuble ; poreux.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	2,5YR2,5/4	5YR3/2	4,3	3,9	0,4	9,06	0,68	13
40-50	2,5YR3/6	5YR4/4	4,3	4,2	0,1	2,94	0,21	14

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	1,28	0,58	0,19	1,57	0,534
40-50	1,32	0,62	0,31	1,63	0,160

Profil n° 25 - Sol brun ocreux : Evaux - R

Localisation : Cirey-sur-Vezouze 1:50000 - x = 956,4 ; y = 1093,0.

Altitude : 600 m.

Topographie : 10 m sous sommet aplati.

Pente : Faible.

Exposition : SO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1300 mm.

Roche mère : Orthokératophyres quartziques.

Végétation : Sapin et épicéas ; ronces, canche, polytric..

Description

10 - 20 cm Rouge ; meuble ; poreux.

40 - 50 cm Rouge ; meuble ; poreux.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	2,5YR2,5/4	5YR3/3	3,6	3,0	0,6	5,07	0,20	25
40-50	2,5YR3/4	5YR4/3	4,2	3,8	0,4	3,46	0,15	23

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	0,46	0,66	0,06	0,79	0,598
40-50	0,84	0,56	0,13	1,12	0,403

Profil n° 26 - Sol brun : Schirmeck

Localisation : Molsheim 1:50000 - x = 961,5 ; y = 1096,9.

Altitude : 480 m.

Topographie : Haut de pente.

Pente : Moyenne.

Exposition : O.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1250 mm.

Roche mère : Diabase microlitique à actinote.

Végétation : Chênaie, quelques sapins, mélèzes et charmes ; Nombreuses fétuques et aspérules.

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	Mull ; brun noir (10YR2/1) ; sablo-limoneux graveleux ; grumeleux ; meuble ; poreux ; très caillouteux ; nombreuses racines.
A ₁	10 - 40 cm	Brun foncé (10YR2/2) ; limono-sableux graveleux ; grumeleux ; nombreux petits cailloux ; nombreuses racines fines et moyennes ; transition progressive.
B	+ 40 cm	Brun (10YR3/3) ; limono-sableux graveleux ; grumeleux à tendance polyédrique ; caillouteux ; nombreuses racines moyennes.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/1	10YR3/3	4,4	3,6	0,8	6,35	0,39	16
10-20	10YR2/2	10YR5/3	4,3	3,5	0,8	4,60	0,27	17
40-50	10YR3/3	10YR5/3	4,6	3,6	1,0	3,30	0,19	17

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
0-10	0,34	0,50	0,04	0,59	0,264
10-20	0,38	0,62	0,04	0,69	0,215
40-50	0,38	0,62	0,05	0,69	0,188

Profil n° 27 - Sol brun : Grendelbruch

Localisation : Molsheim 1:50000 - x = 968,8 ; y = 1101,1.

Altitude : 600 m.

Topographie : 50 m sous sommet.

Pente : Faible.

Exposition : O.

Drainage : Bon.

Température (moyenne annuelle) : ~ 6,5 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1300 mm.

Roche mère : Diabase microlitique à actinote.

Végétation : Sapinière, hêtraie ; Fétuque, aspérule, mercuriale.

Description

- A₁ 0 - 10 cm Mull ; brun noir à noir (10YR2/1) ; limono-sableux-argileux ; grumeleux ; meuble ; poreux ; aéré ; nombreux cailloux et blocs ; quelques racines ; transition progressive.
- A₁B 10 - 50 cm Brun foncé (10YR2/2 à 10YR3/3) ; limono-sableux-argileux ; grumeleux ; meuble ; poreux ; aéré ; nombreux cailloux et blocs ; quelques rares racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/1	10YR3/2	4,3	3,4	0,9	6,66	0,47	14
10-20	10YR2/2	10YR4/2	4,6	3,7	0,9	4,62	0,35	13
40-50	10YR3/3	10YR5/3	4,9	3,9	1,0	3,63	0,26	14

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
0-10	0,54	0,78	0,06	0,93	0,391
10-20	0,56	0,76	0,08	0,94	0,322
40-50	0,52	0,74	0,06	0,89	0,337

Profil n° 28 - Podzol : Schliffstein

Localisation : Molsheim 1:50000 - x = 962,4 ; y = 1103,3.

Altitude : 450 m.

Topographie : 50 m sous sommet aplati.

Pente : Faible.

Exposition : O.

Température (moyenne annuelle) : ~ 8,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1250 mm.

Roche mère : Tufs pyroclastiques acides.

Végétation : Sapins ; polytric, leucobryum, dicranum.

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	Noir ; débris végétaux ; aiguilles ; nombreux cailloux et racines.
E	10 - 35 cm	Noir-gris ; sombre ; meuble ; poreux ; sablo-graveleux ; structure particulière ; nombreux cailloux et blocs.
B _h	35 - 40 cm	Noir ; discontinu ; meuble ; grains bien revêtus ; nombreux cailloux.
B _h B _s	40 - 50/60 cm	Taches rouille brun-noir ; aliotique ; nombreux cailloux et blocs.
B _s	50/60 - 80 cm	Ocre ; alios ; cimenté.
C	+ 80 cm	Arène grise ; sablo-graveleux entre les blocs.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/1	10YR2/1	3,3	2,4	0,9	23,13	0,72	32
10-35	7,5YR3/2	10YR4/1	3,7	3,0	0,7	5,44	0,18	30
35-40	10YR2/2	10YR3/2	4,2	3,6	0,6	17,35	0,58	30
40-50/60	7,5YR3/4	10YR3/4	4,4	3,9	0,5	12,85	0,40	32
50/60-80	7,5YR4/6	10YR6/4	4,5	4,5	0,0	4,87	0,14	35
+ 80	7,5YR5,4	10YR7/3	4,5	4,0	0,5	0,43	0,02	21

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _p	Fe _p	Fe _t
(%)							
0-10	0,22	0,08	0,01	0,00	0,20	0,05	
10-35	0,18	0,06	0,01		0,16	0,05	0,05
35-40	2,24	0,40	0,23		2,10	0,30	0,20
40-50/60	4,80	0,42	0,41		3,65	0,26	0,48
50/60-80	5,40	0,44	2,32		0,75	0,06	
+ 80	0,12	0,02	0,02				

Prof. (cm)	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o	Allophanes (%)	Al _o +1/2Fe _o (%)	DOEO
0-10	0,9	0,6	0,1	0,26	0,152
10-35	0,9	0,8	0,1	0,21	0,567
35-40	0,9	0,8	-	2,44	3,636
40-50/60	0,8	0,6	4,9	5,01	3,212
50/60-80	0,1	0,1	16,2	5,62	0,687
+ 80			-	0,13	0,074

Profil n° 29 - Sol brun andique : Donon

Localisation : Cirey-sur-Vezouze - x = 953,8 ; y = 1100,45.

Altitude : 760 m.

Topographie : Haut de pente.

Pente : Très faible.

Exposition : O.

Température (moyenne annuelle) : ~ 7,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1400 mm.

Roche mère : Diabase microlitique à actinote.

Végétation : Hêtraie, sapinière et plantation d'épicéas.

Description

A ₁	0 - 5 cm	Epaisse litière de feuilles de hêtre se décomposant mal ; transition brutale.
B	5 - 50 cm	Mull ; noir ; limono-sableux-argileux ; faiblement grumeleux ; compact ; tassé. Brun (7,5YR3/2 à 7,5YR3/4) ; limono-sableux-argileux ; grumeleux à tendance polyédrique ; meuble ; poreux ; nombreux cailloux et racines.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
10-20	7,5YR3/2	10YR4/4	4,3	4,0	0,3	4,89	0,31	16
40-50	7,5YR3/4	10YR5/4	4,4	4,1	0,3	2,72	0,17	16

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)				
10-20	0,92	0,94	0,07	1,39	0,332
40-50	0,95	0,92	0,13	1,41	0,220

Profil n° 30 - Sol ocre podzolique : Blanc Rupt

Localisation : Cirey-sur-Vezouze 1:50000 - x = 954,0 ; y = 1105,0.

Altitude : 954 m.

Topographie : Replat de pente dans thalweg.

Pente : Faible.

Exposition : SO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 8,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1300 mm.

Roche mère : Rhyolite hyperacide.

Végétation : Sapin ; canche, myrtille ; leucobryum, polytric..

Description

A ₀ A ₁	0-15 cm	Noir ; microagrégats organiques ; déjections ; beaucoup de racines ; L : 1 cm ; A ₁ F : 5 cm ; A ₁ : 9 cm ; limite très irrégulière.
EBh	15-30 cm	Gris à gris-brun ; très irrégulier ; sablo-graveleux ; tendance polyédrique ; meuble ; nombreux cailloux et racines ; quelques blocs.
Bs	30-60 cm	Ocre ; microagégé à sur-structure à tendance polyédrique ; légèrement floconneux ; nombreux cailloux et blocs ; nombreuses grosses racines.
C	+ 60 cm	Arène ; gris-beige ; sablo-graveleux.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-15	7,5YR2/0	10YR2/1	3,5	2,8	0,7	14,52	0,86	17
15-30	7,5YR3/2	10YR4/3	3,6	3,0	0,6	4,71	0,19	25
30-60	7,5YR3/4	10YR4/4	4,1	3,8	0,3	5,65	0,21	27
+ 60	7,5YR4/6	10YR5/4	4,3	4,1	0,2	2,66	0,10	27

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _p	Fe _p	Fe _t
(%)							
0-15	0,24	0,18	0,02	0,00	0,17	0,14	0,06
15-30	0,20	0,22	0,02		0,12	0,15	0,11
30-60	1,12	0,54	0,14		0,85	0,40	0,15
+ 60	0,78	0,30	0,19		0,40	0,20	0,02

Prof. (cm)	Al _p /Al _o	Fe _p /Fe _o	Allophanes	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
(%)					
0-15	0,7	0,8	0,3	0,33	0,283
15-30	0,6	0,7	-	0,31	0,269
30-60	0,8	0,7	1,0	1,39	0,888
+ 60	0,5	0,7	1,3	0,93	0,281

Profil n° 31 - Sol brun ocreux : Malcôte

Localisation : Cirey-sur-Vezouze 1:50000 - x = 953,5 ; y = 1105,5.

Altitude : 490 m.

Topographie : Bas de pente, fond de thalweg.

Pente : Moyenne.

Exposition : SO.

Température (moyenne annuelle) : ~ 8,0 °C.

Pluviométrie (m.a.) : ~ 1300 mm.

Roche mère : Rhyolite "normale".

Végétation : Sapin ; luzule ; polytric, dicranum..

Description

A ₀ A ₁	0 - 10 cm	Moder ; noir ; L : aiguilles de sapin ; F : débris végétaux, agrégats noirs humifiés et filaments mycéliens ; A ₁ : noir, agrégats anguleux ; nombreux cailloux et racines.
E	10 - 30 cm	Beige-bistre clair ; limono-sableux-argileux ; faiblement grumeleux ; très poreux ; nombreux cailloux et racines.
B	30 - 60 cm	Brun ocre ; limono-sableux-argileux ; légèrement floconneux ; structure à tendance polyédrique ; poreux ; meuble ; nombreux cailloux ; quelques racines moyennes.
C	60 - 80 cm	Gris beige ; sablo-graveleux ; non structuré ; caillouteux.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C	N	C/N
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl				
0-10	10YR2/2	10YR3/1	3,6	3,0	0,6	12,25	0,59	21
10-30	10YR4/4	10YR5/4	4,4	4,0	0,4	3,18	0,13	24
30-60	7,5YR4/6	10YR6/4	4,5	4,2	0,3	1,64	0,09	18
60-80	7,5YR4/4	10YR6/4	4,5	4,1	0,4	0,43	0,05	9

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)					
0-10	0,24	0,26	0,01	0,00	0,37	0,386
10-30	0,60	0,32	0,08		0,76	0,194
30-60	0,92	0,30	0,26		1,07	0,119
60-80	0,38	0,16	0,09		0,46	0,045

Profil n° 32 - Andosol : Mercoeur (HETIER, 1975)

Cf. page 112.

Profil n° 33 - Andosol : Suc de Bauzon

Localisation : Thueyts Bruzet 1:25000 - x = 743,4 - y = 3273,2.

Altitude : 1340 m ; *Topographie* : Talus ; *Pente* : Faible ; *Exposition* : S.

Roche mère : Volcanisme quaternaire très récent : projections bréchiqes et pouzzolanes.

Végétation : Hêtraie et quelques sapins ; sureau ; myrtille.

Description

A ₁	0-10 cm	Litière de feuilles de hêtres (2 cm) ; mull ; noir ; très léger, poreux et meuble ; microagrégé floconneux ; coprogène ; beaucoup de racines fines et moyennes.
A ₁₁ B ₁₁	10-40 cm	Brun, très léger, meuble et poreux ; microagrégé ; limoneux ; beaucoup de racines fines et moyennes ; quelques cailloux.
A ₁₂ B ₁₂	40-60 cm	Brun-ocre ; plus compact ; tassé ; polyédrique ; limono-sablo-argileux ; quelques racines moyennes ; faiblement caillouteux.
BC	60-90 cm	Jaunâtre ; compact, très tassé ; quelques revêtements organiques ; débit en plaquettes et en blocs.
C	+90 cm	Graveleux ; un peu de matériel limono-sableux entre les blocs.

Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N	Da g.cm ⁻³
	Humide	Sec	H ₂ O	KCl					
0-10	10YR2/1	10YR3/1	4,2	3,7	0,5	23,95	1,47	16	
10-40	10YR2/2	10YR3/2	4,8	4,4	0,4	14,10	0,85	17	0,5
40-60	10YR2/2	10YR4/3	5,1	4,9	0,2	6,22	0,37	17	0,7
60-90	10YR3/4	10YR5/4	5,4	5,2	0,2	3,78	0,22	17	
+90	10YR3/4	10YR5/4	5,8	5,5	0,3	0,70	0,04	18	

Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
	(%)					
0-10	1,78	2,14	0,18	0,06	2,85	2,026
10-40	3,66	3,60	0,70		5,46	2,025
40-60	4,90	2,58	1,84		6,19	1,037
60-90	5,70	2,94	2,52		7,17	0,667
+90	4,10	2,46	2,44		5,33	0,250

Profil n° 34 - Andosol : Pub du Volcan

Localisation : Thueyts Bruzet 1:25000 - x = 742,5 - y = 3273,3 ; *Altitude* : 1260 m ; *Pente* : Faible ; *Exposition* : S ; *Roche mère* : Volcanisme quaternaire : projections bréchiqes et pouzzolanes surmontant une coulée basaltique.

Description

Semblable à la station de Suc de Bauzon.

Hori- zons	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		ΔpH	C (%)	N (%)	C/N	Da g.cm ⁻³
		Humide	Sec	H ₂ O	KCl					
A ₁	0-10	10YR2/1	10YR3/2	4,9	4,0	0,9	24,73	1,60	15	
A ₁ B	10-30	10YR2/2	10YR3/3	5,0	4,4	0,6	13,64	0,82	17	0,5
A ₁ B	30-50	10YR2/2	10YR3/3	5,1	4,5	0,6	13,25	0,75	18	0,6
B/C	50-90	10YR2/2	10YR3/3	5,3	4,6	0,7	10,43	0,59	18	
C	+90	10YR3/3	10YR5/3	5,5	5,0	0,5	2,65	0,13	20	

Hori- zons	Prof. (cm)	Al _o	Fe _o	Si _o	Mn _o	Al _o +1/2Fe _o	DOEO
		(%)					
A ₁	0-10	1,60	0,98	0,26	0,08	2,09	1,315
A ₁ B	10-30	4,30	2,06	1,06		5,33	2,098
A ₁ B	30-50	4,30	2,36	1,06		5,48	2,021
B/C	50-90	4,80	1,94	1,36		5,77	1,807
C	+90	4,40	0,82	2,04		4,81	0,430

Annexe III

TABLEAUX D'ANALYSES

Tab. IA : Propriétés générales de CHATEAU-LAMBERT (Andosol - n°15).

Horiz.	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH			Δ pH	C	N	C/N	Rét.P (%)
		Humide	Sec	H2O	KCl	NaF					
A0A1	0-10	10YR2/1	10YR3/2	3,8	3,3	7,1	0,5	27,5	1,45	19	76
A1B1	10-30	10YR2/2	10YR3/3	4,3	4,0	10,1	0,3	13,4	0,69	19	93
A1B2	30-50	10YR2/2	10YR3/4	4,4	4,2	10,8	0,2	12,6	0,59	21	96
A1B3	50-70	10YR2/2	10YR3/4	4,4	4,2	10,7	0,2	11,4	0,50	23	95
BC	70-100	10YR2/2	10YR4/3	4,4	4,3	10,7	0,1	5,0	0,19	26	77

Tab. IB : Propriétés générales de GSANG (Andosol - n°19).

Horiz.	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH			Δ pH	C	N	C/N	Rét.P (%)
		Humide	Sec	H2O	KCl	NaF					
A0A1	0-10	10YR2/1	10YR3/2	4,3	3,6	8,7	0,7	19,4	1,09	18	84
A1B1	10-30	10YR2/2	10YR3/3	4,3	3,9	9,9	0,4	11,7	0,62	19	93
A1B2	30-50	10YR2/2	10YR3/4	4,5	4,1	10,2	0,4	10,0	0,52	19	94
A1B3	50-70	10YR2/2	10YR3/4	4,5	4,1	10,5	0,4	9,1	0,43	21	95
B	70-100	10YR3/4	10YR5/6	4,6	4,4	10,4	0,2	3,3	0,16	21	87
BC	100-130	10YR3/4	10YR5/6	4,7	4,3	10,1	0,4	1,7	0,11	15	70
C	130-150	10YR3/4	10YR5/6	4,7	4,2	9,3	0,5	0,6	0,04	15	53

Tab. IC : Propriétés générales de MERCOEUR (Andosol - n°32).

Horiz.	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C	N	C/N	Da g/cm3
		Humide	Sec	H2O	KCl					
A0A1	0-10	10YR2/1	10YR3/2	5,1	4,4	0,7	23,0	1,73	13	nd
A1	10-30	10YR2/1	10YR3/2	5,6	4,8	0,8	13,3	0,97	14	0,5
A1B1	30-50	10YR2/1	10YR3/2	6,1	5,2	0,9	8,4	0,52	16	0,6
B1	50-70	10YR2/2	10YR3/3	6,0	5,2	0,8	7,8	0,50	16	nd
B2	70-90	10YR2/2	10YR3/3	6,1	5,3	0,8	6,4	0,43	15	nd
B/C	90-120	7,5YR3/2	10YR4/6	6,5	5,5	1,0	0,9	0,04	23	nd
C	> 120	7,5YR3/4	10YR4/6	6,4	5,5	0,9	0,9	0,04	23	nd

Tab. ID : Propriétés générales de ROSSBERG (Sol brun andique - n°18).

Horiz.	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C	N	C/N
		Humide	Sec	H2O	KCl				
A1	0-10	5YR2,5/2	7,5YR3/2	4,3	3,6	0,7	11,4	0,82	14
A1B	10-40	5YR3/2	7,5YR4/2	4,3	3,8	0,5	7,0	0,45	16
B	40-80	5YR3/3	7,5YR4/4	4,5	4,1	0,4	4,1	0,24	17
B/C	> 80	5YR3/4	7,5YR5/4	4,6	4,1	0,5	1,1	0,06	18

Tab. IE : Propriétés générales de GOUTTE DES SAULES (Sol brun ocreux - n°9).

Horiz.	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C	N	C/N
		Humide	Sec	H2O	KCl				
A0A1	0-10	10YR2/1	10YR3/2	3,3	2,6	0,7	19,3	1,01	19
A1B	10-30	10YR2/2	10YR3/3	3,8	3,1	0,7	11,9	0,54	22
B	30-80	10YR3/4	10YR5/4	4,1	3,5	0,6	5,3	0,21	25
BC	> 80	10YR4/6	10YR6/4	4,3	3,9	0,4	4,5	0,13	35

Tab. IF : Propriétés générales de CHARBORUE OUEST (Podzol - n°5).

Horiz.	Prof. (cm)	Couleur Munsell		pH		Δ pH	C	N	C/N
		Humide	Sec	H2O	KCl				
A0A1	0-10	10YR2/1	10YR3/1	3,5	2,8	0,7	13,1	0,72	18
E	10-40	7,5YR4/2	10YR6/2	3,6	3,2	0,4	2,3	0,14	16
Bh	40-50	10YR2/2	10YR2/2	4,1	3,7	0,4	19,4	0,87	22
BhBs	50-55	10YR3/4	10YR5/4	4,3	4,2	0,1	8,8	0,27	33
C	> 55	10YR4/4	10YR6/4	4,5	4,5	0,0	1,1	0,04	28

Tab. IIA : Granulométrie et éléments échangeables de CHATEAU-LAMBERT (Andosol - n°15).

Horiz.	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H	CEC	Taux Sat.	CEC (DO)
		SG	SF	LG	LF	A											
A0A1	0-10	15,0	13,8	10,4	32,1	28,7	0,88	0,63	0,45	0,13	0,50	0,06	14,0	0,78	17,43	12,0	16,52
A1B1	10-30	18,5	14,7	10,6	30,3	25,9	0,15	0,22	0,15	0,06	0,04	0,01	6,4	0,09	7,12	8,1	6,04
A1B2	30-50	20,5	15,6	9,1	30,6	24,2	0,13	0,13	0,09	0,29	0,01	0,01	4,2	0,05	4,91	13,0	4,17
A1B3	50-70	24,1	18,5	14,4	27,5	15,5	0,13	0,08	0,05	0,07	0,00	0,00	4,2	0,06	4,59	7,2	3,95
BC	70-100	41,8	23,5	10,2	16,8	7,7	0,05	0,05	0,04	0,07	0,00	0,00	1,8	0,03	2,04	10,3	1,82

Tab. IIB : Granulométrie et éléments échangeables de GSANG (Andosol - n°19).

Horiz.	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H	CEC	Taux Sat.	CEC (DO)
		SG	SF	LG	LF	A											
A0A1	0-10	11,0	6,1	10,2	35,5	37,2	4,35	0,99	0,45	0,10	0,08	0,17	10,2	0,21	16,55	35,6	16,00
A1B1	10-30	14,3	7,3	13,2	30,7	34,5	0,48	0,28	0,14	0,10	0,02	0,02	7,6	0,08	8,72	11,5	6,63
A1B2	30-50	20,8	7,0	9,9	30,2	32,1	0,63	0,19	0,07	0,09	0,01	0,00	4,4	0,02	5,41	18,1	4,72
A1B3	50-70	21,0	7,1	12,5	29,2	30,2	0,50	0,19	0,05	0,07	0,01	0,01	4,0	0,03	4,86	16,7	3,70
B	70-100	54,3	7,5	10,3	15,6	12,3	0,15	0,12	0,03	0,09	0,00	0,00	1,2	0,00	1,59	24,5	2,22
BC	100-130	40,7	12,7	19,8	18,7	8,1	0,15	0,11	0,03	0,10	0,00	0,00	1,0	0,00	1,39	28,1	1,69
C	130-150	24,3	18,8	24,4	22,2	10,3	0,20	0,11	0,04	0,11	0,00	0,00	1,2	0,02	1,68	27,4	1,76

Tab. IIC : Granulométrie et éléments échangeables de MERCOEUR (Andosol - n°32).

Horiz.	Prof. (cm)	Granulométrie (%)*					Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H	CEC	Taux Sat.	CEC (DO)
		SG	SF	LG	LF	A											
A0A1	0-10	21,8	19,3	14,7	32,9	11,3	12,8	2,68	0,40	0,20	0,04	0,12	2,15	0,12	18,51	86,9	16,87
A1	10-30	nd	nd	nd	nd	nd	4,8	1,58	0,14	0,13	0,03	0,02	0,35	0,06	7,11	93,5	7,63
A1B1	30-50	27,0	23,8	11,4	25,7	12,1	5,8	1,68	0,04	0,11	0,02	0,01	0,10	0,06	7,82	97,6	7,92
B1	50-70	nd	nd	nd	nd	nd	5,8	1,68	0,05	0,13	0,01	0,01	0,05	0,05	7,78	98,5	7,88
B2	70-90	29,3	22,8	19,6	23,6	4,7	5,8	1,58	0,05	0,13	0,01	0,01	0,00	0,05	7,63	99,1	7,88
B/C	90-120	nd	nd	nd	nd	nd	4,8	1,53	0,10	0,21	0,00	0,01	0,00	0,04	6,69	99,3	5,87
C	> 120	94,6	3,2	0,6	1,0	0,6	2,8	1,18	0,12	0,21	0,00	0,02	0,05	0,03	4,41	97,7	4,10

* d'après HETIER (1975)

Tab. IID : Granulométrie et éléments échangeables de ROSSBERG (Sol brun andique - n°18).

Horiz.	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H	CEC	Taux Sat.	CEC (DO)
		SG	SF	LG	LF	A											
A1	0-10	21,1	8,0	10,0	25,7	35,2	2,7	1,05	0,54	0,17	0,05	0,17	6,00	0,31	10,99	40,6	9,76
A1B	10-40	23,1	8,5	10,2	27,3	30,9	1,1	0,49	0,22	0,17	0,02	0,09	5,05	0,19	7,33	27,0	7,07
B	40-80	33,9	11,2	15,5	24,5	14,9	0,3	0,17	0,11	0,10	0,00	0,03	2,10	0,10	2,91	23,4	3,08
B/C	> 80	44,9	11,1	11,6	22,6	9,8	0,3	0,36	0,24	0,16	0,00	0,02	1,35	0,11	2,54	41,7	2,08

Tab. IIE : Granulométrie et éléments échangeables de GOUTTE DES SAULES (Sol brun ocreux - n°9).

Horiz.	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H	CEC	Taux Sat.	CEC (DO)
		SG	SF	LG	LF	A											
A0A1	0-10	19,2	9,1	9,9	24,7	37,1	0,9	0,74	0,38	0,22	0,83	0,03	13,0	2,62	18,72	12,0	17,49
A1B	10-30	22,5	13,3	12,5	22,7	29,0	0,2	0,39	0,20	0,37	0,46	0,02	11,0	0,82	13,46	8,6	12,58
B	30-80	26,3	18,4	17,8	20,0	17,5	0,2	0,16	0,13	0,11	0,10	0,01	6,0	0,24	6,95	8,6	5,04
BC	> 80	43,1	8,5	8,5	15,8	24,1	0,1	0,07	0,06	0,01	0,03	0,00	1,6	0,09	1,96	12,2	2,05

Tab. IIF : Granulométrie et éléments échangeables de CHARBORUE OUEST (Podzol - n°5).

Horiz.	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Al	H	CEC	Taux Sat.	CEC (DO)
		SG	SF	LG	LF	A											
A0A1	0-10	40,4	9,1	6,8	17,5	26,2	1,8	0,75	0,66	0,13	0,06	0,22	1,85	2,28	7,75	43,1	7,32
E	10-40	37,5	10,0	9,4	17,4	25,7	0,2	0,12	0,27	0,10	0,03	0,03	1,90	0,45	3,10	22,3	2,82
Bh	40-50	33,3	5,4	3,7	16,1	41,5	0,3	0,30	0,35	0,13	0,13	0,02	8,25	0,25	9,73	11,1	8,46
BhBs	50-55	55,6	11,7	8,2	11,5	13,0	0,1	0,04	0,14	0,07	0,01	0,00	0,70	0,07	1,13	31,0	0,02
C	> 55	67,8	13,8	6,8	6,4	5,2	0,1	0,06	0,25	0,06	0,00	0,02	0,30	0,06	0,85	55,3	0,65

Tab. IIG : Granulométrie sans pré-traitements de CHATEAU-LAMBERT (Andosol - n°15) et GSANG (Andosol - n°19).

Profil	Horiz.	Granulométrie (%)				
		SG	SF	LG	LF	A
Château-Lambert	A0A1	15,9	9,4	22,4	45,8	6,5
	A1B1	16,1	9,3	26,7	39,8	8,1
	A1B2	18,4	11,5	24,6	38,3	7,2
	A1B3	20,5	13,5	22,7	36,0	7,3
	BC	39,3	20,9	13,8	21,8	4,2
Gsang	A0A1	15,4	5,5	20,4	43,5	15,2
	A1B1	22,3	7,0	13,9	42,7	14,1
	A1B2	24	7,3	11,3	43,3	14,1
	A1B3	27,4	5,4	10,4	37,9	18,9
	B	55,5	7,6	7,9	21,5	7,5
	BC	43,8	13,2	18,8	19,9	4,3
	C	28	21,8	27,1	19,3	3,8

△

Tab. IIIA : Données des extractions sélectives de CHATEAU-LAMBERT (Andosol - n°15).

Horiz.	Prof. (cm)	Alo	Feo	Sio	Mno	Alp	Fep	Cp	Ald	Fed	Sid	Fet	Alp/Alo	Fep/Feo	Allophanes		Alo+1/2Feo (%)	DOEO
															Al/Si*	(%)		
A0A1	0-10	0,64	1,26	0,02	0,02	0,50	1,01	7,1	0,68	1,86	0,32	0,33	0,8	0,8	7,3	-	1,27	1,155
A1B1	10-30	1,64	2,08	0,03	nd	1,35	1,65	5,8	1,94	2,80	0,24	0,09	0,8	0,8	10,0	-	2,68	1,276
A1B2	30-50	1,96	1,86	0,05	nd	1,85	1,58	6,3	2,70	2,60	0,30	0,07	0,9	0,9	2,3	0,5	2,89	1,387
A1B3	50-70	1,90	1,26	0,10	nd	1,70	1,04	6,7	2,50	1,80	0,28	0,11	0,9	0,8	2,1	0,7	2,53	1,943
BC	70-100	1,24	0,73	0,09	nd	0,95	0,55	3,3	1,32	1,22	0,20	nd	0,8	0,8	3,3	1,4	1,61	0,894

Tab. IIIB : Données des extractions sélectives de GSANG (Andosol - n°19).

Horiz.	Prof. (cm)	Alo	Feo	Sio	Mno	Alp	Fep	Cp	Ald	Fed	Sid	Fet	Alp/Alo	Fep/Feo	Allophanes		Alo+1/2Feo (%)	DOEO	DO HCl N
															Al/Si*	(%)			
A0A1	0-10	1,16	0,96	0,07	0,02	0,87	0,72	7,0	1,32	1,92	0,32	0,12	0,8	0,8	4,3	-	1,64	1,238	0,594
A1B1	10-30	1,54	1,06	0,14	nd	1,20	0,78	4,7	1,80	2,14	0,34	0,09	0,8	0,7	2,5	1,4	2,07	0,976	0,545
A1B2	30-50	1,84	1,14	0,23	nd	1,40	0,83	4,3	2,10	2,26	0,36	0,04	0,8	0,7	2,0	1,6	2,41	0,876	0,490
A1B3	50-70	2,16	1,14	0,38	nd	1,55	0,75	4,4	2,50	2,26	0,40	0,04	0,7	0,7	1,7	2,3	2,73	1,135	0,582
B	70-100	2,20	0,58	0,68	nd	0,56	0,11	1,7	1,36	1,58	0,24	nd	0,3	0,2	2,5	6,8	2,49	0,363	0,208
BC	100-130	1,44	0,40	0,40	nd	0,42	0,11	1,1	0,92	1,48	0,22	nd	0,3	0,3	2,6	4,0	1,64	0,207	0,115
C	130-150	0,60	0,26	0,14	nd	0,26	0,07	0,6	0,54	1,48	0,20	nd	0,4	0,3	2,5	1,4	0,73	0,167	0,028

Tab. IIIC : Données des extractions sélectives de MERCOEUR (Andosol - n°32).

Horiz.	Prof. (cm)	Alo	Feo	Sio	Mno	Alp	Fep	Cp	Ald	Fed	Sid	Fet	Alp/Alo	Fep/Feo	Allophanes		Alo+1/2Feo (%)	DOEO	DO HCl N
															Al/Si*	(%)			
A0A1	0-10	3,30	2,86	0,82	0,08	2,20	1,70	nd	nd	nd	nd	0,04	0,7	0,6	1,4	4,9	4,73	2,196	1,016
A1	10-30	4,80	3,80	1,44	nd	2,30	1,85	nd	nd	nd	nd	0,02	0,5	0,5	1,8	10,1	6,70	1,803	0,943
A1B1	30-50	6,00	3,96	2,20	nd	1,55	1,15	nd	nd	nd	nd	0,01	0,3	0,3	2,1	15,4	7,98	1,855	0,865
B1	50-70	5,90	3,96	2,28	nd	1,35	0,87	nd	nd	nd	nd	0,01	0,2	0,2	2,1	16,0	7,88	1,827	0,764
B2	70-90	5,60	3,76	2,28	nd	1,05	0,69	nd	nd	nd	nd	0,01	0,2	0,2	2,1	16,0	7,48	1,436	0,665
B/C	90-120	2,80	3,68	2,52	nd	0,20	0,15	nd	nd	nd	nd	0,00	0,1	0,0	1,1	12,6	4,64	0,377	0,273
C	> 120	2,14	2,54	1,68	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3,41	0,310	0,225

* rapport atomique ((Alo-Alp)/Sio)*28/27

Tab. IIID : Données des extractions sélectives de ROSSBERG (Sol brun andique - n°18).

Horiz.	Prof. (cm)	Alo	Feo	Sio	Mno	Alp	Fep	Fet	Alp/Alo	Fep/Feo	Allophanes		Alo+1/2Feo (%)	DOEO	DO HCl N
											Al/Si*	(%)			
A1	0-10	0,68	0,80	0,05	0,07	nd	nd	0,08	nd	nd	nd	nd	1,08	0,625	0,322
A1B	10-40	0,74	0,86	0,04	nd	0,78	0,70	0,09	1,1	0,8	-1,0	-	1,17	0,517	0,293
B	40-80	0,98	0,78	0,11	nd	0,90	0,65	0,04	0,9	0,8	0,8	0,6	1,37	0,328	0,202
B/C	> 80	0,62	0,34	0,11	nd	nd	nd	0,02	nd	nd	nd	nd	0,79	0,112	0,067

Tab. IIIE : Données des extractions sélectives de GOUTTE DES SAULES (Sol brun ocreux - n°9).

Horiz.	Prof. (cm)	Alo	Feo	Sio	Mno	Alp	Fep	Fet	Alp/Alo	Fep/Feo	Allophanes		Alo+1/2Feo (%)	DOEO	DO HCl N
											Al/Si*	(%)			
A0A1	0-10	0,39	0,70	0,00	0,00	0,30	0,84	0,36	0,8	1,2	-	-	0,74	0,471	0,201
A1B	10-30	0,66	1,82	0,01	nd	0,47	1,83	0,53	0,7	1,0	19,7	-	1,57	0,690	0,394
B	30-80	0,82	1,44	0,02	nd	0,64	1,42	0,17	0,8	1,0	9,3	-	1,54	0,372	0,249
BC	> 80	1,08	1,36	0,10	nd	0,75	1,00	0,06	0,7	0,7	3,4	1,6	1,76	0,305	0,177

Tab. IIIF : Données des extractions sélectives de CHARBORUE OUEST (Podzol - n°5).

Horiz.	Prof. (cm)	Alo	Feo	Sio	Mno	Alp	Fep	Fet	Alp/Alo	Fep/Feo	Allophanes		Alo+1/2Feo (%)	DOEO	DO HCl N
											Al/Si*	(%)			
A0A1	0-10	0,06	0,04	0,00	0,02	0,07	0,03	0,01	1,2	0,8	-	-	0,08	0,033	0,022
E	10-40	0,06	0,06	0,00	nd	0,05	0,05	0,02	0,8	0,8	-	-	0,09	0,075	0,027
Bh	40-50	2,04	1,32	0,05	nd	2,15	1,33	0,25	1,1	1,0	-2,3	-	2,70	3,235	2,278
BhBs	50-55	3,80	0,24	0,66	nd	2,30	0,16	0,04	0,6	0,7	2,4	6,6	3,92	1,548	0,994
C	> 55	0,90	0,12	0,29	nd	0,33	0,03	0,01	0,4	0,3	2,0	2,0	0,96	0,132	0,082

* rapport atomique ((Alo-Alp)/Sio)*28/27

Tab. IV : Analyses des éléments totaux des horizons et des roches mères des sols étudiés, rapportées à la fraction minérale.

Profil	Horiz.	Prof. (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Perte au Feu
			%										%
Gsang n°19 Andosol	A1B2	30-50	55,39	23,54	10,53	0,13	2,04	1,04	4,26	1,28	1,43	0,35	29,54
	B	50-70	54,71	24,52	9,71	0,11	2,20	1,29	4,50	1,34	1,32	0,30	17,73
	R		51,95	19,90	9,22	0,16	3,07	7,07	5,11	1,98	1,23	0,32	4,08
Mercoeur n°32 Andosol	A1B1	30-50	35,25	24,80	18,36	0,30	7,53	6,89	1,66	0,30	3,78	1,13	33,33
	B1	50-70	35,93	24,63	18,02	0,30	7,05	7,40	1,73	0,29	3,63	1,01	30,61
	R**		47,14	16,57	11,08	0,20	7,00	10,28	3,55	1,46	2,72	?	?
Rossberg n°18 Sol brun andique	A1B	10-40	60,74	18,66	8,73	0,13	1,86	0,44	3,63	4,02	1,31	0,48	20,02
	B	40-80	60,42	19,14	8,95	0,15	1,90	0,28	3,40	4,00	1,29	0,47	13,99
	R		58,85	17,54	9,23	0,09	2,13	0,96	5,71	3,77	1,29	0,42	2,59
Goutte des Saules n°9 S. brun ocreux	A1B	10-30	68,19	15,53	8,56	0,03	0,98	0,30	2,40	2,69	1,15	0,18	25,39
	B	30-80	67,34	17,77	7,46	0,00	1,15	0,21	2,13	2,76	1,05	0,13	18,06
	R		74,81	14,46	1,57	0,00	0,30	0,07	0,21	8,28	0,28	0,02	1,39
Charborue Ouest n°5 Podzol	E	10-40	75,65	15,21	2,88	0,02	0,58	0,07	0,22	5,00	0,29	0,08	6,18
	Bh	40-50	60,70	24,35	8,06	0,02	0,65	0,16	0,22	4,92	0,29	0,63	48,93
	R		78,94	12,54	3,62	0,02	0,96	0,20	0,22	3,20	0,30	0,01	2,11
Sols bruns acides*	A		71,27	15,37	3,48	0,15	1,38	0,32	2,23	5,15	0,65	nd	7,11
	B		70,58	15,82	3,54	0,11	1,52	0,33	2,20	5,24	0,66	nd	4,61
	C		69,79	15,60	3,59	0,06	1,67	0,93	2,42	5,30	0,62	nd	3,03
	R		68,90	14,66	3,23	0,05	2,09	1,59	2,90	6,01	0,56	nd	1,44
Sols à podzolisation faible ou modérée*	A		75,90	13,95	2,65	0,06	0,41	0,33	1,66	4,60	0,44	nd	13,46
	B		74,82	14,62	2,80	0,04	0,49	0,35	1,72	4,76	0,40	nd	7,42
	C		73,73	15,28	2,56	0,05	0,71	0,30	1,92	5,11	0,33	nd	3,40
	R		73,91	13,55	2,25	0,05	0,68	1,08	3,12	5,09	0,27	nd	1,23
Sols à podzolisation accentuée*	A		77,18	12,85	1,63	0,01	0,13	0,17	1,49	6,16	0,37	nd	17,62
	E		79,10	11,58	1,67	0,00	0,07	0,21	1,74	5,39	0,23	nd	4,70
	B1		75,78	13,99	2,18	0,01	0,27	0,09	1,81	5,62	0,24	nd	10,37
	B2		75,65	14,32	1,93	0,02	0,31	0,17	1,92	5,45	0,24	nd	6,50
	C		76,79	13,65	1,63	0,02	0,39	0,08	1,44	5,84	0,16	nd	2,73
	R		74,57	14,94	1,22	0,02	0,43	0,50	3,01	5,14	0,17	nd	1,50

* d'après LELONG & SOUCHIER (1970)

** d'après HETIER (1975)

Tab. V : Bilans du fractionnement physique et des extractions chimiques des horizons étudiés.

	Profils	Andosol vosgien Gsang n° 19				Andosol référence* n°32	Sol brun Rossberg n°18	Sol brun ocreux G.Saules n°9	Podzol Charborue Ouest n°5
		A1B1	A1B2	A1B3	B	A1B1	A1B	A1B	Bh
		Horizons	10-30	30-50	50-70	70-100	30-50	10-40	10-30
Fraction < 2000 µm	C total (%)	11,72	10,74	8,52	3,95	9,07	6,31	8,47	14,41
	C/N	18	19	20	22	15	14	20	24
Racines	C (% C total)	5,74	3,66	2,59	1,04	0,26	1,17	2,98	2,51
C hydrosoluble	C (% C total)	0,50	0,33	0,22	0,62	0,48	0,49	0,58	0,45
2 mm - 50 µm	C (% C total)	3,34	8,40	3,98	4,34	0,81	3,12	5,15	8,79
Fraction < 50 µm	C (% C total)	90,42	87,61	93,21	94,00	98,45	95,22	91,29	88,25
	C (%)	13,17	11,56	9,80	5,77	11,18	7,66	10,39	22,54
	C/N	17	18	19	19	14	14	19	24
Extraction NaOH N/10									
Humine	C (% C total)	49,70	46,78	38,16	43,13	36,96	54,78	59,81	24,51
	C (% < 50 µm)	54,97	53,39	40,94	45,88	37,54	57,53	65,52	27,77
	C/N	21	22	23	27	13	16	24	22
Alcalino- solubles	C (% C total)	40,72	40,83	55,05	50,87	61,49	40,44	31,48	63,74
	C (% < 50 µm)	45,03	46,61	59,06	54,12	62,46	42,47	34,48	72,23
	Q4/6	6,9	7,7	6,7	10,2	3,7	7,2	12,2	3,3
AH	C (% C total)	19,69	17,92	22,86	10,95	26,77	12,44	9,49	27,99
	C (% < 50 µm)	21,77	20,46	24,53	11,65	27,19	13,07	10,39	31,71
	Q4/6	5,6	6,0	4,9	9,2	5,7	7,2	11,2	5,0
AF	C (% C total)	21,03	22,91	32,19	39,92	34,72	28,00	21,99	35,75
	C (% < 50 µm)	23,26	26,15	34,53	42,47	35,27	29,40	24,09	40,52
AF/AH		1,07	1,28	1,41	3,65	1,30	2,25	2,32	1,28
Extraction NaOH N/10 + Na4P2O7 1%									
Humine	C (% C total)	nd	44,55		nd		49,69	56,51	22,10
	C (% < 50 µm)	nd	50,85		nd		52,19	61,90	25,04
	C/N	nd	22		nd		16	24	21
Alcalino- solubles	C (% C total)	nd	43,06		nd		45,53	34,78	66,15
	C (% < 50 µm)	nd	49,15		nd		47,81	38,10	74,96
	Q4/6	nd	7,5		nd		6,9	10,5	3,40
AH	C (% C total)	nd	15,32		nd		16,03	9,15	21,89
	C (% < 50 µm)	nd	17,49		nd		16,83	10,03	24,81
	Q4/6	nd	7,7		nd		7,7	11,8	7,30
AF	C (% C total)	nd	27,74		nd		29,5	25,63	44,26
	C (% < 50 µm)	nd	31,66		nd		30,98	28,07	50,15
AF/AH		nd	1,81		nd		1,84	2,8	2,02

* Chaîne des Puys

Tab. VI : Taux d'agrégats stables à l'eau des différents profils.
 (agrégats > 250 µm déduits de la teneur en sables grossiers,
 en pourcentage de la fraction de terre fine)

Profil	Horiz.	Prof. (cm)	Agrégats stables à l'eau (%)			
			1	2	3	Moyenne
Andosol vosgien Gsang n°19	A0A1	0-10	63,0	57,9	52,7	57,9
	A1B1	10-30	34,4	47,2	45,9	42,5
	A1B2	30-50	53,7	53,0	53,1	53,3
	A1B3	50-70	49,8	45,9	52,0	49,2
	B	70-100	10,7	14,4	16,4	13,8
	BC	100-130	9,0	7,5	9,6	8,7
	C	130-150	18,6	12,8	13,3	14,9
Andosol de référence* Mercoeur n°32	A0A1	0-10	60,1	60,6	67,3	62,7
	A1	10-30	41,1	36,0	36,2	37,8
	A1B1	30-50	42,3	45,9	52,6	46,9
	B1	50-70	35,0	47,8	52,5	45,1
	B2	70-90	54,1	56,3	50,7	53,7
	B/C	90-120	18,3	19,7	21,2	19,7
	C	> 120	21,2	17,6	20,1	19,6
Sol brun Rossberg n°18	A1	0-10	46,6	56,9	62,3	55,3
	A1B	10-40	33,9	38,0	54,1	42,0
	B	40-80	47,2	44,0	49,6	46,9
	B/C	> 80	11,3	12,6	19,9	14,6
Sol brun Ocreux	A0A1	0-10	56,1	57,7	61,3	58,4
	A1B	10-30	51,8	50,2	58,3	53,4
Goutte des Saules n°9	B	30-80	53,5	52,6	49,5	51,9
	BC	> 80	43,6	44,9	45,3	44,6
Podzol Charborue	A0A1	0-10	47,4	38,4	41,6	42,5
	E	10-40	28,1	27,9	28,3	28,1
Ouest n°5	Bh	40-50	36,4	34,1	37,7	36,1
	BhBs	50-55	36,1	38,9	39,4	38,1
	C	> 55	10,2	7,6	13,4	10,4

* Chaîne des Puy

Tab. VII : Teneurs en argiles dispersables à l'eau des différents profils.

Profil	Horiz. (Prof. cm)	Rapport sol/eau**	Argiles dispersées (% argile totale sol)	pH suspension
Andosol vosgien Gsang n°19	A1B (10-70)	0,01	12,10	5,7
		0,03	16,43	5,1
		0,04	28,57	5
		0,06	26,66	4,9
		0,09	24,14	4,8
		0,11	25,75	4,8
		0,13	13,77	4,7
		0,14	18,46	4,7
		0,15	7,89	4,5
		0,18	9,07	4,5
	B (70-100)	0,02	2,53	5,1
		0,03	0,51	5,6
		0,06	0,38	4,7
		0,10	0,17	4,7
		0,13	0,00	4,7
		0,16	0,10	4,7
		0,19	0,08	4,6
		0,22	0,07	4,4
		0,26	0,06	4,5
0,29	0,08	4,5		
Andosol de référence* Mercoeur n°32	A1B (30-50)	0,02	5,57	6
		0,13	5,92	5,2
		0,21	2,59	5
		0,33	0,20	4,8
Sol brun Rossberg n°18	A1B (10-40)	0,02	16,89	4,9
		0,10	4,10	4,3
		0,17	0,38	4,25
		0,28	0,04	4,2
Sol brun Ocreux Goutte des Saules n°9	A1B (10-30)	0,01	21,52	4,4
		0,09	6,27	3,9
		0,15	0,92	3,9
		0,23	0,10	3,8
Podzol Charborue Ouest n°5	Bh (40-50)	0,01	8,88	4,9
		0,08	1,04	4,2
		0,14	0,26	4,2
		0,22	0,13	4,2

* Chaîne des Puys

** sol < 2 mm sec 105°C / 200 ml H₂O

Mademoiselle ARAN Delphine

DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-I
en PEDOLOGIE

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 8 octobre 1988 n° 73

Le Président de l'Université



Résumé

Le concept d'Andosol a subi, durant ces dernières années, une profonde évolution conduisant les commissions internationales à adopter de nouvelles règles de définition et de classification de ces sols. Un inventaire de terrain et l'application de ces critères dans le Massif Vosgien, où des sols à caractères andiques avaient été signalés autrefois, aboutissent à la mise en évidence de l'existence d'Andosols. La caractérisation précise de ces sols, l'étude de leur fonctionnement actuel ainsi que des comparaisons avec d'autres sols vosgiens et avec des Andosols d'autres régions, permettent de déterminer les conditions nécessaires et les facteurs limitants au développement du processus d'andosolisation dans ce massif montagneux où dominent habituellement brunification et podzolisation.

Les Andosols vosgiens à peu près dépourvus d'allophanes sont riches en complexes organo-métalliques stables non mobiles mais leur degré d'évolution ainsi que leur extension géographique demeurent modestes. La formation d'Andosols exige la conjonction de conditions climatiques et de roche mère favorables : les conditions climatiques humides propices à l'altération des minéraux et froides affaiblissant l'activité biologique minéralisatrice des matières organiques ne peuvent être rencontrées que dans les parties les plus élevées du massif. Dans de tels environnements, l'andosolisation nécessite la présence de roches mères basiques riches en minéraux altérables. La composition chimique de ces roches apparaît comme principal responsable de l'orientation de la pédogenèse. Sa texture, sa minéralogie, sa compacité sont déterminantes dans le degré de développement du processus. L'absence de matériaux pyroclastiques vitreux meubles explique certaines particularités de cette andosolisation : faible développement et absence d'allophanes.

Mots-clés : Andosolisation, Hautes Vosges, Pédogenèse, Classification, Propriétés andiques, Fonctionnement actuel, Brunification, Podzolisation.

Abstract

During the last few years, the Andosol concept has undergone significant modifications leading to the setting up of new definition and classification rules by the international commissions. In the Vosges mountains, where some soils with andic features have been studied in the past, the use of these criteria coupled with a field survey shows the presence of Andosols. The limiting factors and the necessary conditions for andosolisation in the Vosges, where brunification and podzolisation usually prevail, have been established by a precise characterisation of these soils, a study of the processes occurring within them and a comparison with other soils from the Vosges or with Andosols from other areas.

Andosols from the Vosges have low contents of allophanes and high amounts of stable and immobile organo-metallic complexes, but they show a weak stage of development and they cover only a small area. Andosol formation needs the union of favourable climatic conditions and parent rock : the former can only be found in the highest parts of the mountains, where humid conditions allow mineral weathering and cold temperatures reduce the mineralisation of organic matter by biological activity. In such environments, andosolisation needs basic rocks with high amounts of weatherable minerals. The chemical composition of the parent rock appears to be the main factor governing pedogenesis. The development stage of the process is mainly governed by the rock's texture, mineralogy and compactness. The absence of loose pyroclastic materials rich in glass can explain some particularities of this andosolisation : weak development and absence of allophanes.

Key-words : Andosolisation, Hautes Vosges, Pedogenesis, Classification, Andic properties, Brunification, Podzolisation.