

UNIVERSITE DE NANCY I
U. E. R. S. T. M. C. M.



THÈSE

présentée à
L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour obtenir
le grade de Docteur ès Sciences Naturelles

par
Jean-Marie HETIER

FORMATION ET EVOLUTION DES ANDOSOLS EN CLIMAT TEMPÉRÉ

Soutenue publiquement le 28 Mai 1975, devant la Commission d'Examen

Membres du Jury

MM. Ph. DUCHAUFOUR Président

G. MILLOT
F. JACQUIN
P. SEGALEN
B. SOUCHIER
F. WEBER

27 FEV. 1976

AVANT-PROPOS

Monsieur le Doyen MILLOT a bien voulu me faire l'honneur de participer à ce jury en témoignage de l'intérêt qu'il porte aux travaux du Centre de Pédologie biologique et je l'en remercie vivement.

Ce mémoire est le résultat d'un travail de recherches qui a trouvé son orientation et son aboutissement grâce au Centre de Pédologie biologique. C'est donc tout naturellement à son Directeur, Monsieur DUCHAUFOR, que vont en premier lieu, mes remerciements. Bénéficiant de son enseignement fondamental comme étudiant de 3ème cycle, j'ai pu, sous sa direction, acquérir l'essentiel de ma formation de pédologue de terrain et de chercheur, au cours d'un premier travail sur les sols volcaniques des Vosges. J'ai pu enfin, grâce à Monsieur DUCHAUFOR et à ses collaborateurs, Messieurs JACQUIN et SOUCHIER, surmonter le handicap de mon détachement à Cadarache, notamment dans la phase finale, toujours difficile, de la synthèse et de la rédaction.

Monsieur SEGALEN, qui a accepté d'être un des rapporteurs de ce travail, a toujours été pour moi un interlocuteur accueillant, précis et bienveillant ; malgré l'éloignement, son parrainage a constitué un soutien efficace au cours de ce travail.

Je veux aussi remercier Monsieur WEBER, autant pour ses talents de contradicteur réfléchi et exigeant que pour la grande disponibilité qu'il m'a témoignée en assurant les nombreuses déterminations analytiques réalisées dans son laboratoire, avec la collaboration de D. TRAUTH, R. NEFF et R. WENDLING.

Je dois à de nombreux professeurs et responsables des Sciences de la Terre, de m'avoir facilité mes années de formation à la recherche. Après avoir reçu l'enseignement de mes maîtres de l'Université de Grenoble, j'ai bénéficié à Nancy, des leçons de géochimie de Monsieur le Professeur ROCCI et de ses conseils de rigueur méthodologique.

Au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Monsieur De La ROCHE m'a permis d'acquérir, avant la carrière de pédologue, une formation très utile en minéralogie. J'ai aussi amplement profité des leçons de Monsieur P. LEYMARIE, qui m'a encore tout récemment prêté son concours, en collaboration avec Monsieur ISNARD, en matière de traitement statistique des données.

Les encouragements et les conseils de Monsieur le Professeur BROUSSE m'ont été très précieux et je lui exprime ici toute ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et l'aide du Laboratoire de Pétrographie d'Orsay.

Hors de France, la collaboration avec le Centre d'Edaphologie de Ténériffe a été très fructueuse, et je suis reconnaissant à Monsieur F. CALDAS pour la très intéressante mission qu'il organisa pour moi dans la zone des andosols des Canaries.

Monsieur YOSHINAGA, éminent spécialiste des andosols, m'a très aimablement communiqué les résultats d'analyses faites au Japon sur des échantillons du Massif Central. J'ai été très honoré de sa confiance et l'en remercie tout spécialement.

A mes amis du Centre de Pédologie biologique et de l'Equipe Universitaire de Nancy, je dois une mention toute spéciale de reconnaissance collective, car ils furent particulièrement sollicités : l'"association familiale" JEANROY, pour son aide polyvalente et le soutien moral apporté au rédacteur de ce mémoire, J. ROUILLER et Mlle Th. CHONE, pour leur aide déterminante sur le plan méthodologique, P. FAIVRE, pour les prélèvements de sols, Madame P. JEANSON, Messieurs DOIRISSE et BURTIN, et enfin, BRETHERS et DIATTA, pour les nombreuses analyses réalisées.

A l'Université, B. GUILLET, S. BRUCKERT et F. GUTTIEREZ m'ont prêté un concours scientifique important et désintéressé, et je n'oublie pas l'aide de Madame E. SCHOULLER et de Mlle B. MAHAUT.

Je dois beaucoup à P. SUEUR et à Madame E. JEANROY pour la réalisation du mémoire, les nombreuses figures et cartes, et remercie Madame PAPIIS pour le travail de brochage.

Hébergé au C.E.A. à Cadarache par le service de Radioécologie, je remercie Messieurs GRAUBY et SAAS pour leur accueil et leur aide. Au service de Radioagronomie, Monsieur de MONTGAREUIL m'a donné l'occasion et les moyens de réaliser une expérience importante grâce au maïs marqué au ^{14}C , dont l'emploi avait été proposé par Monsieur ANDRE. J'ai rencontré dans ce service, une ambiance et un esprit de collaboration très agréables et efficaces.

Grâce à l'ordre et à la précision de Mlle Ch. THOMANN, la rigueur des expériences préparées avec P. LESPINAT et réalisées avec l'aide de A. DIMON, ce programme a pu être mené à bien.

Comment ne pas évoquer ici les "Compagnons de la table ronde", MM. FARDEAU, JAPPE, LLIMOUX, GUIRAUD, BERLIER, BUSCARLET. J'ai reçu les conseils de nombreux chercheurs, collègues et amis, que je ne peux citer tous : MM. BABKINE, DEJOU, GACHON, KIEFFER, LAROCHE, De CONINCK, HERBILLON, QUANTIN, PEDRO, SIEFFERMANN, MOINEREAU, TARDY, JAMAGNE, TRICHET et MONTURIOL.

Je suis reconnaissant à Monsieur ROUX, Instituteur, et à Monsieur le Maire de Menet et de Ceyssat, de m'avoir fourni de très utiles informations.

Enfin, j'adresse un chaleureux merci à mes hôtes de Bois-le-Duc, qui ont rempli de leur amitié mes séjours à Nancy.

S O M M A I R E

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE : PROPRIETES ET ECOLOGIE DES ANDOSOLS

CHAPITRE I : CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES DES ANDOSOLS

CHAPITRE II : ETUDE ECOLOGIQUE DE LA REPARTITION DES SOLS

DEUXIEME PARTIE : RECHERCHES SUR LA NATURE ET LES PROPRIETES DE LA
PHASE ORGANO-MINERALE AMORPHE DES ANDOSOLS

CHAPITRE I : ETUDE DES CONSTITUANTS DU COMPLEXE D'ALTERATION

CHAPITRE II : ETUDE DYNAMIQUE

CONCLUSIONS GENERALES

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION GENERALE

Historiquement, les andosols ont d'abord été étudiés au niveau d'une famille de sols développés sur cendres volcaniques (les "volcanic ash soils"), ce qui leur conférait des propriétés très particulières.

Au Japon, certains de ces sols (Kuroboku) de climat tempéré humide et froid étaient très noirs (an-do = sol noir), ce qui leur a valu, de la part des pédologues américains, le nom d'Ando-soils. Cependant, les deux Congrès Internationaux consacrés à ce sujet (Tokyo, 1964 et Turrialba, 1969) consistaient essentiellement à débattre de la définition et des propriétés des "volcanic ash soils".

La plupart de ces propriétés très particulières étaient attribuées presque systématiquement à la présence d'allophane, corps mal défini, silico-aluminate amorphe et hydraté de composition variable et de structure indéterminée. Ce corps amorphe secondaire était supposé dériver plus ou moins directement des verres primaires dont l'importance dans la roche-mère est estimée selon des critères mal précisés.

L'extension des études des sols volcaniques analogues dans toutes les régions du monde, et les tentatives de classification ont ensuite conduit à remettre en cause les mécanismes et les modèles un peu schématiques des premières études, en raison des progrès et de la diversification des techniques employées.

Mais, même au cours de cette dernière phase de développement des recherches, la majorité des études était limitée à des objectifs spécialisés. La plupart des travaux étaient consacrés à la minéralogie des andosols, souvent dans le cadre d'études régionales, et un petit nombre seulement à la biochimie et à l'évolution des composés organiques.

C'est pourquoi le but de notre travail était de revenir à une vision plus globale de ce type de pédogénèse, que nous appellerons "andosolisation", en se fixant en priorité comme objet d'étude, la phase organo-minérale amorphe considérée dans son ensemble.

Pour cela, nous avons classiquement suivi une triple démarche :

- L'observation écologique régionale en vue de saisir les facteurs stationnels de l'andosolisation et de sélectionner des profils types n'a pu être menée à bien qu'au prix d'un effort méthodologique au niveau des analyses de caractérisation.

- L'analyse plus fine des constituants essentiels de la phase organo-minérale amorphe a pu être alors réalisée sans négliger pour autant celle des autres constituants dont ils procèdent ou qui en dérivent.

- L'étude dynamique basée sur les bilans géochimiques et sur l'expérimentation a permis alors de confirmer ou d'affiner les hypothèses émises.

L'ensemble permet, en conclusion, de proposer un schéma général d'interprétation de l'évolution des andosols en climat tempéré, qui nous l'espérons, contribuera à améliorer l'ensemble des connaissances sur les sols volcaniques de toutes les régions.

Pour en faciliter la lecture, l'exposé des recherches a été subdivisé en deux parties :

- La première commence par donner, d'emblée, la définition adoptée, la classification suivie, avant d'étudier rapidement, et à un niveau assez général, les propriétés des andosols. Puis on passe au compte rendu des études de terrain, allégé par de fréquents renvois à une annexe analytique où sont traités les problèmes particuliers des profils les plus significatifs. L'ensemble de cette première partie se termine par une analyse des facteurs de l'andosolisation, étayée par le calcul automatique, qui permet d'énoncer, sous forme d'hypothèse, les questions auxquelles nous avons tenté de répondre.

- La deuxième partie est d'abord consacrée à l'analyse des constituants minéraux, puis organiques (complexes organo-minéraux), le tout étant contrôlé par des examens en microscopie électronique. Puis, abandonnant ce point de vue statique, nous rendons compte, d'un point de vue dynamique, de l'évolution de la fraction minérale des profils types, grâce à l'étude géochimique et aux reconstitutions minéralogiques de la terre fine. Enfin, grâce à quelques expériences de laboratoire, nous étudions un aspect du phénomène géochimique majeur de l'andosolisation, la désilicification différentielle, puis nous reproduisons, grâce à des incubations de sol et de matériel végétal uniformément marqué, les deux aspects principaux de l'évolution des composés organiques :

- + minéralisation rapide des litières
- + accumulation des composés humifiés

Les conclusions générales font alors le bilan des réponses apportées par ce travail.

PREMIERE PARTIE

PROPRIETES ET ECOLOGIE DES ANDOSOLS

CHAPITRE I

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES DES ANDOSOLS

INTRODUCTION

Si les propriétés générales des andosols sont maintenant assez bien connues, leur définition et leur classification font encore l'objet de discussions de spécialistes dans la plupart des pays. Aussi, pour faciliter la lecture de ce mémoire, avons-nous décidé d'anticiper un peu et de présenter dès le départ, la définition et la classification qui ont été utilisées au cours de ce travail.

Puis, en nous appuyant surtout sur des données bibliographiques, nous rappellerons très brièvement, les principales propriétés des andosols en mentionnant les méthodes d'étude correspondantes. Nous n'insisterons un peu plus que sur les techniques physico-chimiques de séparation des constituants, à propos desquelles une contribution originale a été apportée dans le cadre des recherches technologiques menées au Centre de Pédologie biologique (Section Pédologie Générale).

I.- DEFINITION

Les définitions proposées par les différentes classifications consistent à sélectionner un ou plusieurs caractères dans l'ensemble des propriétés plus ou moins spécifiques des andosols.

La classification mondiale des sols reproduit la définition américaine des Andepts, en s'appuyant sur la richesse en éléments vitreux (plus de 60 %) du matériau primaire, sur la faible densité apparente (inférieure à 0,85) et sur la "dominance" des matériaux amorphes dans le complexe d'échange, estimée par l'examen des spectres de diffraction des rayons X, ce qui, nous le verrons, ne peut pas conduire à une évaluation quantitative correcte.

Au Japon, où paradoxalement le terme "andosol" est peu usité, la définition repose essentiellement sur la "présence prédominante d'allophane" (WADA et AOMINE, 1973).

Dans les classifications soviétique et allemande, le caractère intrazonal des andosols ne fait pas l'objet d'une division majeure.

Dans le cadre du Précis de Pédologie, DUCHAUFOR parle plus simplement de sol à allophane sur matériau volcanique.

Enfin, dans une tentative de révision de la classification française de la C.P.C.S., le groupe de travail "Andosol" a proposé la définition suivante :

Les andosols constituent un ensemble de sols à profil AC ou A (B) C qui doivent l'originalité de leurs propriétés à l'abondance dans leur fraction minérale, de produits amorphes silico-alumineux hydratés associés à des quantités variables, mais souvent élevées, de matière organique. Ils doivent avoir au moins dans l'un de leurs horizons, les caractéristiques de terrain précisées ci-dessous :

- 1) *la structure est souvent fragmentaire, grumeleuse, très fine à fine ; elle peut être continue à l'état humide ; la cohésion interagrégats est faible.*
- 2) *la partie non graveleuse donne au toucher l'impression d'une texture limoneuse à limono-sableuse.*
- 3) *une motte, à l'état sec, est pulvérulente, très friable. A l'état humide, entre les doigts, elle résiste à une certaine pression, puis, brusquement, donne l'impression d'éclater ; certains matériaux libèrent alors de l'eau et donnent une masse fluide non collante (thixotropie des auteurs américains).*
- 4) *avec le test au fluorure, la couleur doit se développer, à température supérieure à 15°, en moins de 30 secondes.*

La deuxième partie de cette définition concernant les caractères de terrain, n'appelle pas de commentaire particulier.

La première partie reste valable sur le fond, mais compte tenu des éléments nouveaux apparus depuis 1972 aussi bien dans le présent travail que dans d'autres études (WADA et AOMINE, 1973 par exemple), il semblerait préférable de la formuler comme suit :

Les andosols constituent un ensemble de sols qui doivent leurs propriétés particulières à l'existence dans le complexe d'altération, d'une phase organo-minérale amorphe qui contient une quantité de silice et d'alumine largement supérieure à celle des argiles cristallisées.

Une telle définition doit nécessairement être assortie d'un rappel des méthodes servant à établir les quantités respectives d'amorphes silico-alumineux et d'argiles cristallisées. Grâce aux progrès réalisés dans les méthodes d'extraction des amorphes et de dispersion des argiles décrites ci-dessous, il nous a semblé possible de reprendre la notion d'abondance-dominance des éléments amorphes dans le complexe d'altération, mais en la précisant par des chiffres :

$$\Sigma_{\text{Si,Al}} (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) > 10 \% \text{ de la terre fine}$$

et $\Sigma_{\text{Si,Al}} / \text{Arg. crist.} > 1,5$

Ces critères de définition nous paraissent à la fois nécessaires, suffisants et applicables sur le terrain par le pédologue expérimenté, capable d'apprécier les quantités d'amorphes et d'argiles en valeur absolue et leurs proportions relatives.

II.- CLASSIFICATION

Après avoir commencé à élaborer, à partir des premières études de terrain, un système de classification provisoire, nous avons participé aux travaux de la Commission compétente du Service de Cartographie des Sols et adopté ses conclusions dans un souci de normalisation.

Rappelons que cette classification est la suivante :

CLASSE DES ANDOSOLS (IV)

IV.1. Sous-classe des Andosols peu différenciés

à profil A - C

a) Groupe des Andosols humiques

à profil A₁ mélanique

b) Groupe des Andosols vitriques

à profil A₁ chromique

IV.2. Sous-classe des Andosols différenciés

à profil A (B) C

a) Groupe des Andosols saturés

à taux de saturation en cations dans l'horizon (B) > 50 %

- Sous-groupe mélanique

à horizon A₁ mélanique

- Sous-groupe chromique

à horizon A₁ chromique

- Sous-groupe à accumulation

différenciation d'un horizon à précipitation de carbonates ou de silice

b) Groupe des Andosols désaturés

à taux de saturation en cations dans l'horizon (B) < 50 %

- Sous-groupe mélanique

à horizon A₁ mélanique

- Sous-groupe chromique

à horizon A₁ chromique

c) Groupe des Andosols perhydratés

à hydratation constamment très forte du profil, présentant au maximum, dans l'horizon (B) le phénomène de "thixotropie" et de "déshydratation irréversible".

La définition des termes "mélanique" et "chromique" qui signifient respectivement, et approximativement "de couleur noire" et de "couleur variable selon la roche-mère", est précisée par des valeurs chiffrées du code des couleurs Munsell (mélanique : chroma < 2).

Comme on peut le voir, cette classification est à un stade d'élaboration encore peu avancé, et il y manque en particulier des groupes intergrades qui sont particulièrement importants en climat tempéré.

Nous avons, quant à nous, utilisé :

- le terme de sol brun andique dans le cas des évolutions intermédiaires des zones climaciques de transition où les caractères d'andosol ou de sol brun sont peu affirmés. Dans ce cas, $\Sigma_{Si,Al}$ est compris entre 5 et 10 %.
- le terme d'andosol brunifié dans le cas où, soit à la suite d'une évolution naturelle, soit d'une intervention humaine, les horizons de surface subissent une évolution secondaire vers la brunification. Dans ce cas, la base du profil au moins doit présenter toutes les caractéristiques de l'andosol.
- le terme de sol andopodzolique dans le cas d'une évolution soit intermédiaire soit polycyclique, entre l'andosol et le sol podzolisé. L'horizon B_s présente alors tous les caractères des andosols.

En dehors des sols de l'étage pseudo-alpin (andosols humiques), presque tous les sols que nous avons étudiés dans le Massif Central sont à classer dans le groupe des Andosols désaturés ; la plupart sont "chromiques".

Grâce à cela, nous n'avons pas rencontré souvent la difficulté indéniable que présente sur le terrain, la subdivision au niveau du groupe par le taux de saturation.

Mais la discussion des problèmes de classification, aussi bien française qu'étrangère alourdirait inutilement ce mémoire, aussi passerons-nous sans plus tarder au rappel des propriétés générales des andosols.

III.- PROPRIETES GENERALES DES ANDOSOLS : APPLICATION AUX SOLS DU DU MASSIF CENTRAL

Lorsque nous avons commencé notre étude, la présence des andosols au sens strict dans le Massif Central français n'était pas établie avec certitude (DUPUIS et HOREMANS, 1966 ; PEDRO et ROBERT, 1968). Des sols à caractère andique plus ou moins affirmé étaient décrits dans le Massif des Coïrons (MOINEREAU, 1965) ou dans les Vosges (DUCHAUFOR et SOUCHIER, 1966 b). C'est pourquoi notre première démarche a consisté à vérifier que certains des sols observés dans le Cantal et la Chaîne des Puys présentaient bien les propriétés des andosols. Leur description a fait l'objet de nombreuses études qui sont pour la plupart, rassemblées dans quatre documents :

- la synthèse bibliographique de P. QUANTIN (1972)
- le compte rendu du Congrès de Turrialba (1969)
- le compte rendu du Congrès de Tokyo (1964)
- le document du Ministère de l'Agriculture japonais (1964)

Ces propriétés sont également décrites avec précision dans le document réalisé par la "Commission Andosol" C.P.C.S.

1.- PROPRIETES MORPHOLOGIQUES

La couleur est souvent noire ou très foncée (mélanique) dans les horizons de surface des profils différenciés ou dans tout le profil des sols peu différenciés. La couleur des horizons (B) est variable (chromique).

La structure est très finement grumeleuse en surface et s'apparente, vue de loin, à celle d'un moder, et de près à celle d'un mull (moder mullique de certains auteurs). En profondeur, elle est fondue à l'état humide et "soufflée" (fluffy) en cas de dessiccation.

Les transitions entre les horizons A et (B) des profils différenciés sont très progressives dans la plupart des cas. Par contre, la transition avec la roche-mère est généralement très brutale.

2.- PROPRIETES MICROMORPHOLOGIQUES (photos 1 et 2)

Les andosols du Cantal et de la Chaîne des Puys sont beaucoup plus semblables au microscope qu'à l'oeil nu.

En dehors des grains de sable plus abondants et souvent vitreux dans les sols récents, les éléments structuraux assez mal définis (pseudo-limons) sont dans les deux cas constitués d'un plasma isotrope brun jaunâtre, au sein duquel apparaissent quelques rares grains de minéraux primaires en lumière polarisée.

ANDOSOL TYPE MERCOEUR (865 3)

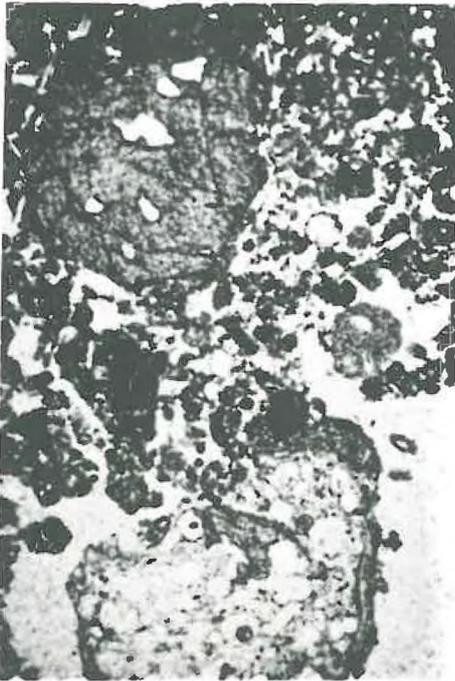
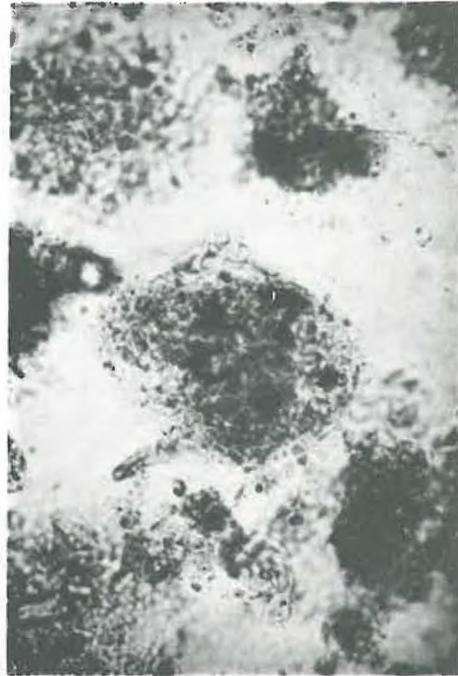
50 μ 10 μ

Photo 1

Photo 2

3.- PROPRIETES PHYSIQUES D'ENSEMBLE3.1.- Densité apparente

Les mesures effectuées font apparaître une légère différence entre les sols du Cantal et ceux de la Chaîne des Puys, qui est liée à la grande porosité interne des scories récentes.

De bas en haut des profils, on observe généralement des valeurs de 1^{er} ordre de

1,3 à 0,6 dans les sols du Cantal

1,1 à 0,4 dans les sols du Puy de Dôme

3.2.- Rétention de l'eau

Les propriétés de rétention de l'eau telles que les décrit COLMET DAAGE (1967) existent sous forme atténuée dans les sols du Massif Central, surtout en ce qui concerne l'irréversibilité des dessiccations dans les sols du Cantal. Les teneurs en eau à la capacité au champ varient de 30 à 70 %, surtout en fonction des teneurs en matière organique.

3.3.- La porosité

Nous n'avons pas effectué de mesures particulières de porosité qui est évidemment très élevée, comme le montrent les mesures de densité apparente (50 à 80 % du volume des horizons supérieurs).

Mais il existe un type de porosité spécifique des andosols qui est la porosité interne des grains de sable, ou même de limons. *Cette propriété est importante car elle est susceptible de fausser toutes les comparaisons de teneur effectuées sur des expressions pondérales avec les autres sols où les grains sont "pleins" et denses (WACQUANT, 1968).*

Les pesées de départ doivent donc être faites sur sol très finement broyé, sans quoi les différences ne sont significatives qu'au-delà d'un facteur 2 (densité apparente des sables : 1,3 au lieu de 2,6 dans les roches granitiques par exemple). Cette remarque est importante pour l'évaluation de l'"accumulation" du carbone dans les andosols

3.4.- Surface spécifique (tableau I₁)

Nous avons effectué des mesures sur des fractions de sol tamisé à moins de 250 μ avant et après H₂O₂ ainsi qu'après le traitement oxalate dithionite d'extraction des amorphes (cf. IIème Partie, chapitre I (I) Amorphes et allophane). Un échantillon de référence du Cameroun et des gels artificiels servent de terme de comparaison.

Les sols étudiés ont des surfaces qui ne dépassent guère 100 m²/g après élimination de la matière organique. Ces valeurs sont donc bien inférieures à celle de l'andosol de référence du Cameroun (400 m²/g)*.

La comparaison avec les surfaces spécifiques de gels artificiels de divers rapports Si/Al montre que les valeurs élevées de surfaces spécifiques ne sont pas significatives de la présence d'allophane au sens "silico-aluminate amorphe" tel que le définit par exemple De VILLIERS (1971). *Elles peuvent aussi bien signifier la présence de silice colloïdale non combinée.* Cette remarque est importante pour l'interprétation de la nature des amorphes, comme nous le verrons plus loin. Nous verrons également que le traitement oxalique élimine bien la totalité des amorphes, puisque la surface spécifique tombe à des valeurs très basses après l'extraction (en l'exprimant par rapport au poids de résidu insoluble).

Par contre, le traitement citrate-dithionite-bicarbonate qui provoque l'élimination d'une partie seulement des amorphes, et sans doute aussi de la matière organique, produit un effet analogue à notre traitement H₂O₂ : augmentation des surfaces spécifiques (KAWAI, 1969).

Ces attaques partielles de la phase organo-minérale amorphe ont sans doute pour effet de dégager des pores et des sites d'adsorption pour la couche monomoléculaire d'azote liquide que l'on mesure (CASES, 1968).

* Echantillon G. SIEFFERMANN, TKO 164

Tableau I₁. - Surface spécifique externe (Méthode B.E.T., 1 point. Mesures :
Mlle ICHTERTZ, O.R.S.T.O.M. Bondy)

Echantillon	Naturel	Surface spécifique m ² /g	
		Après H ₂ O ₂	Après O.D.
<u>Andosol humique</u> Cantal (723 ₃)	9,5	49,4	13,9 m ² /g de résidu
<u>Andosol brunifié</u> Cantal (589 ₂)	15	32	2,6
<u>Andosol évolué</u> Chaîne des Puys (865 ₂)	27	56	2,5
(865 ₄)	40	63	1,6
(865 ₆)	75	n.d.	n.d.
<u>Andosol vitrique</u> Chaîne des Puys (731 ₆)	86	115	4,8
<u>Sol andopodzolique</u> Puy de Dôme (716 ₃)	8	10	2,4
(716 ₆)	26	n.d.	n.d.
<u>Andosol Cameroun</u>	323	n.d.	2,9
Gels artificiels { Si	570		
{ Gels Si-Al	320 à 450		
{ Al seul	270		

3.5.- Propriétés mécaniques

Notons enfin deux propriétés des andosols qui sont importantes pour expliquer le comportement des andosols :

- La stabilité structurale élevée qui pourrait expliquer leur faible susceptibilité à l'érosion (SIEFFERMANN, 1969) ;

- La plasticité fluidité (limites d'Atterberg) qui correspondent bien à la "thixotropie" que l'on observe sur le terrain et qui, dans le Massif Central au moins, semble liée aux teneurs de matière organique (BONFILS et MOINEREAU, 1971).

4.- GRANULOMETRIE : TECHNIQUES DE SEPARATION DES FRACTIONS MINERALES

La séparation des fractions minérales constitue la première démarche de l'étude géochimique et minéralogique des sols types. C'est pourquoi son importance est fondamentale, et nous avons apporté un soin tout particulier à cette recherche méthodologique.

4.1.- Dissolution des ciments

La dissolution complète de tous les ciments est l'opération préalable indispensable à la séparation des fractions minérales définies comme constituées de particules élémentaires ou grains.

a) Ciments organiques

L'eau oxygénée, coûteuse et peu efficace, surtout dans le cas des andosols, a été avantageusement remplacée par l'hypochlorite de sodium qui présente en outre l'intérêt de ne pas attaquer les réseaux d'argile (ROBERT, 1970).

Le détail de la méthode est exposé dans la publication récente de ROUILLER et al. (1974).

En ce qui concerne le carbone, rappelons que sur l'andosol du Mercoeur, au bout de 24 heures de traitement à l'eau oxygénée, il reste encore 20 % du carbone initial. L'hypochlorite n'en laisse que 4 % pendant le même temps, et seulement 0,2 % au bout de 72 heures. Mais ce résultat doit être complété par les chiffres concernant l'"effet dissolvant" des deux réactifs vis-à-vis des éléments amorphes.

Tableau I₂.- Solubilisation des éléments minéraux (après 72 H d'action du réactif oxydant)

Echantillon Traitement	A ₁ Mercoeur			(B) Mercoeur		
	Fe ‰	Al ‰	Si ‰	Fe ‰	Al ‰	Si ‰
H ₂ O ₂ 5 jours	0	0	0,3	0	0	0,4
Lavage HCl 4N 2 x 100 ml	52	50	20	62	40	26
NaClO 1 jour	0	20	1,5	0	16	1,5
Lavage HCl 4N	50	32	29	50	30	31
Total	50	52	30,5	50	46	32,5
Réactif O.D.	60	48	19	58	42	23

Le tableau I₂ illustre le fait que, après oxydation de la matière organique, un seul lavage de 5 minutes par HCl 4N suffit à dissoudre tous les éléments amorphes.

Cette constatation est importante sur le plan pratique (réduction du prix de revient des analyses de routine), mais elle met également une première fois en évidence les liens étroits entre les composés organiques et la phase organo-minérale amorphe : nous aurons l'occasion de revenir longuement sur ce problème dans la seconde partie.

b) Ciments minéraux

La méthode d'utilisation du réactif oxalate dithionite qui est à la base de l'estimation quantitative des éléments minéraux amorphes, donc en dernière analyse de la définition des andosols, a fait l'objet d'une publication particulière (HETIER et JEANROY, 1973). Comme nous nous étendrons assez longuement sur ce sujet dans le début de la deuxième partie (Chapitre I (I)) nous y renvoyons le lecteur. Rappelons seulement que nos dernières données nous permettent d'affirmer que, dans le cas des andosols tout au moins, l'emploi du dithionite est superflu, ce qui présente l'avantage de respecter les réseaux des argiles 2/1 ferrifères.

4.2.- Dispersion

On obtient des dispersions stables après décationisation complète du milieu par une résine H⁺ (Amberlite IR 120) à pH 4, éventuellement suivie d'une saturation par une résine Na (pH 7).

A titre de précaution, il est prudent d'éliminer les particules de magnétite de très petite taille (5 à 0,5 μ) qui semblent susceptibles de provoquer une floculation lente en rassemblant autour d'eux les argiles sous forme d'un petit agrégat hérissé dont nous avons représenté un exemple dans les planches photographiques de la deuxième partie (Chapitre I, III Microscopie électronique).

Le fractionnement granulométrique qu'on effectue alors correspond à un tri par taille de particules élémentaires, car il ne subsiste aucun agrégat.

4.3.- Séparations densimétriques

A l'occasion des essais de reconstitution minéralogique sur les 5 profils types (IIème partie, chapitre II (I)), une méthode de séparation minéralogique par gradient de densité * a donné des résultats encore insuffisants, mais encourageants.

La qualité des séparations obtenues a été surtout limitée par celle du broyage qui n'était ni assez fin ni assez homogène (fragments polycristallins). A titre d'exemple, nous avons reporté dans la planche I₀, 6 diffractogrammes correspondant à 3 fractions séparées par cette méthode.

Dans le sol dioritique, chlorite et hornblende ont été séparés efficacement. Dans le sol brun sur labradorite, on observe un très bel enrichissement en hématite. Même dans l'andosol du Mercoeur, où les minéraux

* Inspiré des travaux de FRANCIS et al. (1970-1972) sur les argiles.

PLANCHE I₀.- EFFICACITE DES SEPARATIONS DE MINERAUX
PAR LIQUEURS DENSES

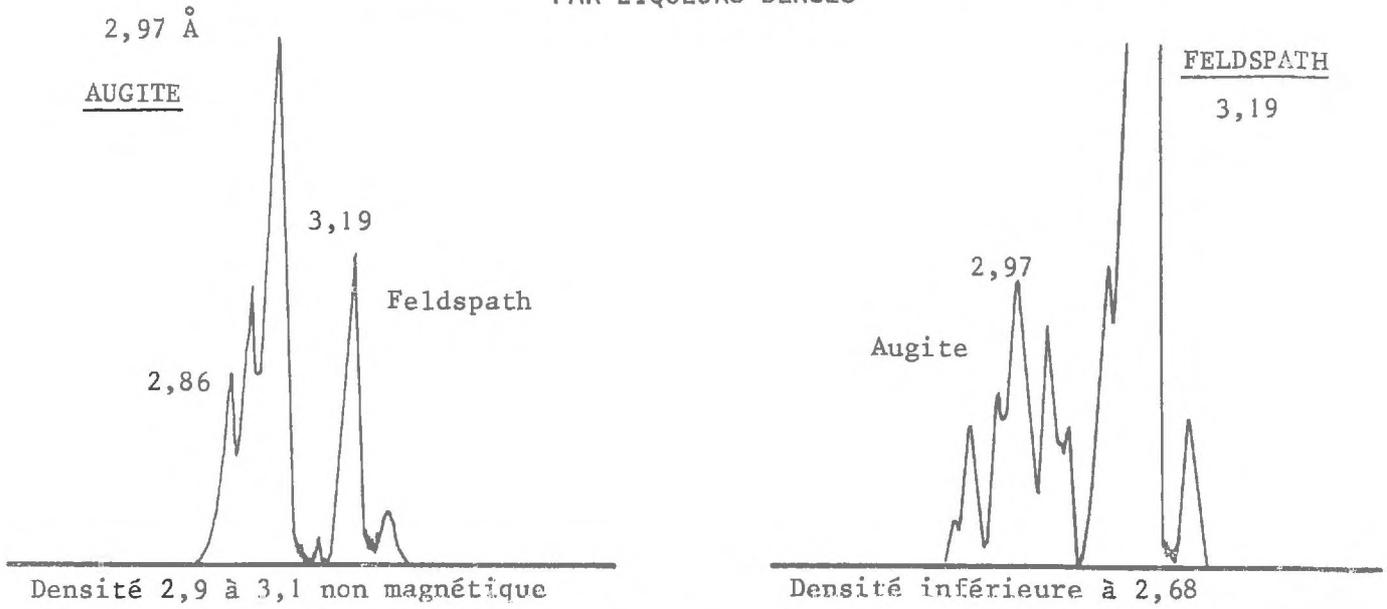


Fig. 3.- Andosol Mercoeur (R.M. 865) sur scorie basaltique

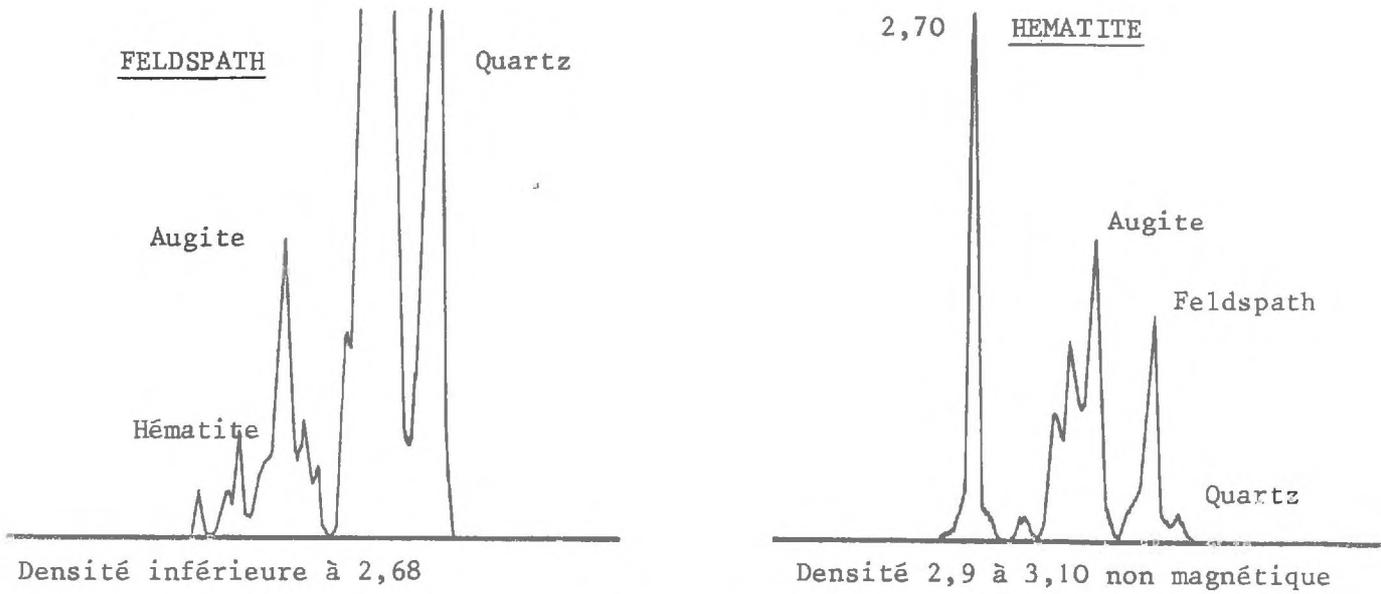


Fig. 2.- Sol brun Pontgibaud (12353) sur labradorite

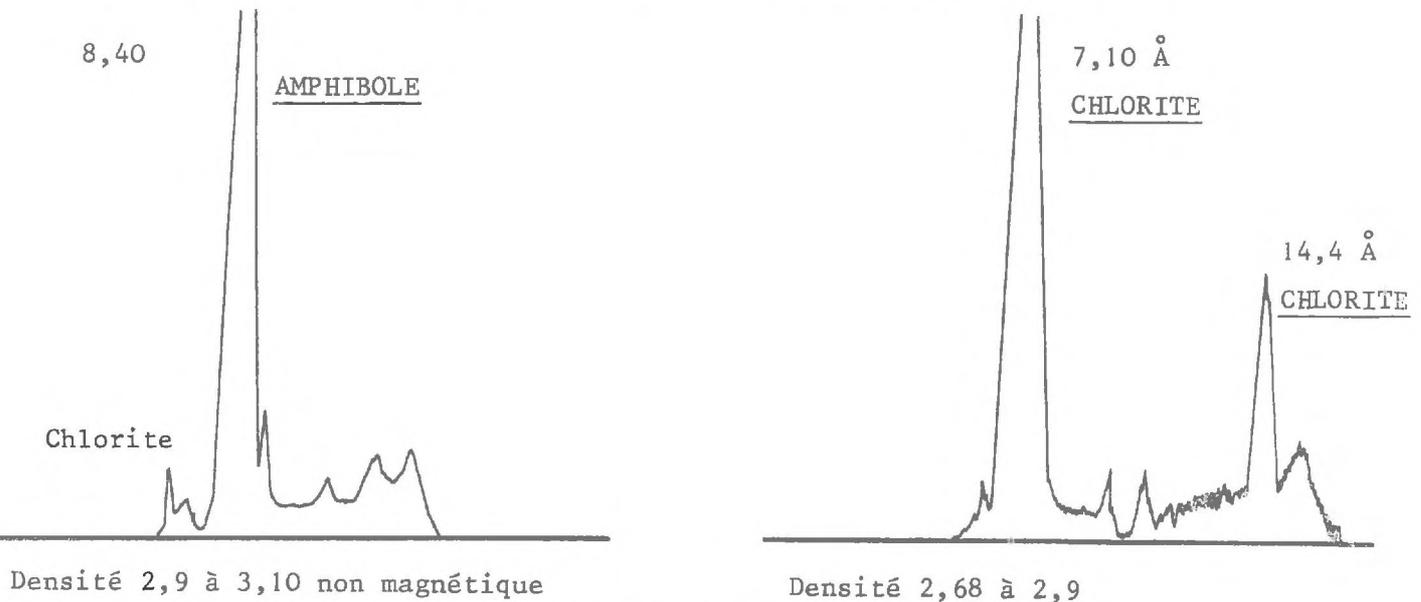


Fig. 1.- Sol brun Le Hohwald (R.M. 1095) sur diorite

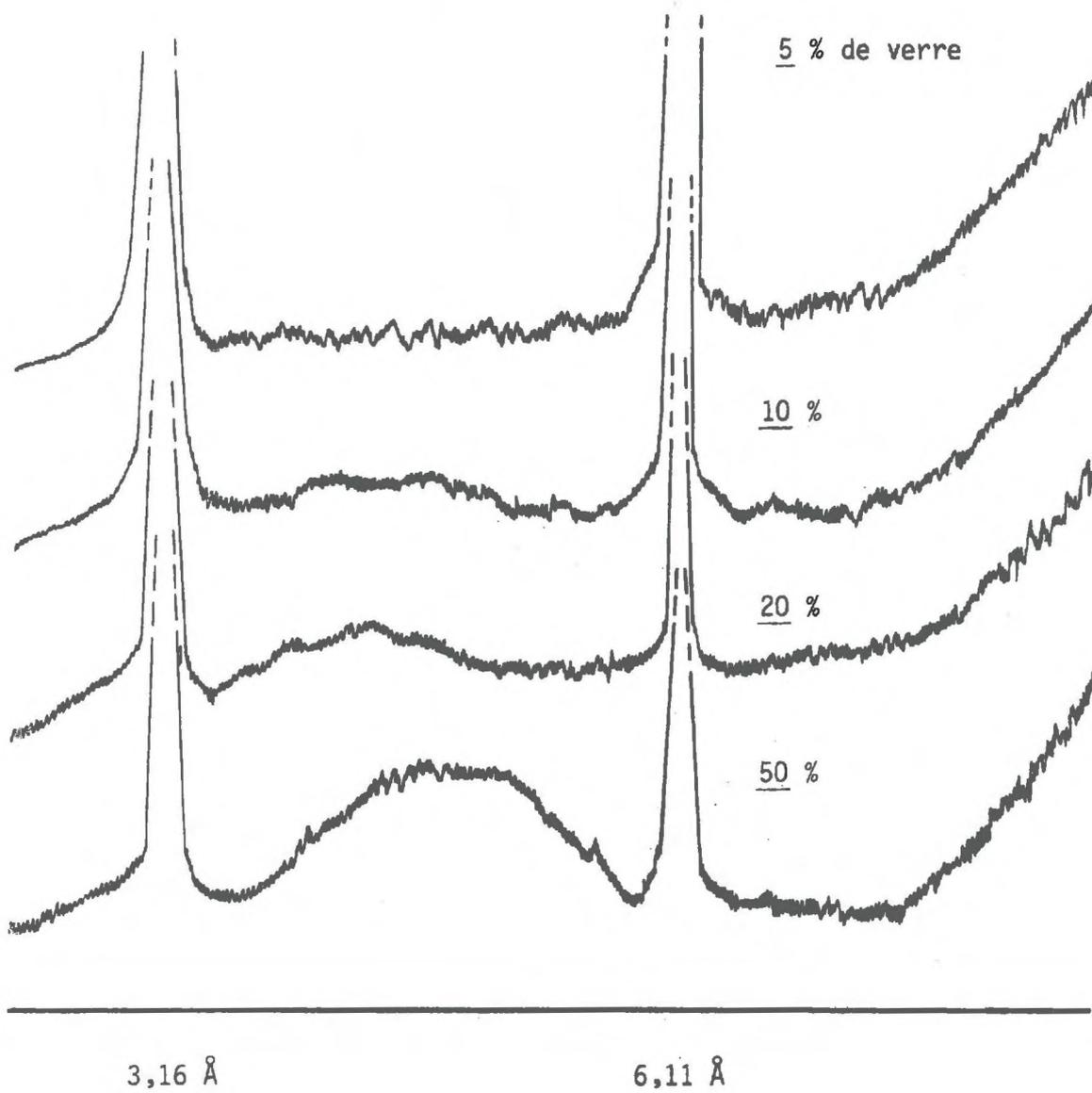
PLANCHE I₀. - ESSAIS DE DIFFRACTION SUR MELANGES VERRE-BOEHMITE

Figure 4

sont extrêmement fins et le broyage très insuffisant, on observe un enrichissement notable en pyroxène d'une part, feldspath d'autre part.

A l'occasion de ces séparations densimétriques, nous pensions également réaliser des enrichissements en verre dans les fractions les plus légères ($d < 2,5$). Or, ces fractions ont donné des diffractogrammes où les raies de feldspaths sont très nettes, mais où l'on observe jamais de façon appréciable des bombements ou raie de corps amorphe, caractéristiques des verres.

A titre de contrôle, nous avons effectué des mélanges d'obsidienne et de boehmite en proportion croissante, afin de voir à partir de quelle quantité le verre était ainsi décelable. La limite de détection réellement appréciable est d'environ 30 % de verre. Aucune fraction n'ayant présenté de tels bombements, nous avons pensé que les raies de feldspaths observées provenaient (dans le cas des roches relativement riches en plages isotropes) de domaines cristallins assez grands pour diffracter les rayons X ($> 200 \text{ \AA}$), mais trop petits et trop mal orientés entre eux pour polariser la lumière (théoriquement au moins 1000 \AA pour une biréfringence forte, pratiquement 5000 \AA).

L'observation de raies de diffraction de feldspaths à partir de verre volcanique, est d'ailleurs courante en minéralogie des roches volcaniques (BABKINE et VARET, communication personnelle).

L'altération serait donc finalement beaucoup moins conditionnée par le désordre dans l'arrangement des atomes, que par la finesse des particules des "verres" qui sont toujours microdivisés dans les roches volcaniques.

5.- PROPRIETES CHIMIQUES DU COMPLEXE ABSORBANT

5.1.- Le pH

Le milieu est fortement tamponné entre pH 4 et 5, à cause de la présence d'une grande quantité d'alumine précipitée. Des valeurs supérieures à 5 ne se rencontrent que dans les horizons en cours d'altération active, donc surtout dans la Chaîne des Puys.

5.2.- La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique a été souvent étudiée sur les andosols, dans l'espoir de trouver une méthode indirecte de dosage des allophanes, comme nous l'avons vu plus haut. Cette propriété a été étudiée d'une façon générale par ANDRE (1970), et dans le cas des andosols, par COLMET DAAGE (1972b). Nous nous contenterons donc de tenter de préciser la signification des mesures de routine (percolation à pH 7 à l'acétate d'ammonium), en confrontant les résultats de SHERMAN et al. (1964) et COLMET DAAGE (1972b), avec les mesures effectuées sur deux échantillons types (andosols types du Mercoeur et de Marlieux, horizons (B)).

Ces auteurs ont noté une diminution de la capacité d'échange cationique au cours de la dessiccation, diminution de l'ordre de 30 à 90 % selon les échantillons. D'autres auteurs, notamment FIELDS et SCHFIELD (1960), IMURA en 1960, BIRREL en 1961, YOSHINAGA et AOMINE en 1962, HOUNG en 1966 et JACKSON en 1968, ont étudié la variation de la capacité d'échange cationique en fonction du pH. Les charges (-) variables sont très abondantes et sont dues surtout aux Al liés, soit au

noyau allophanique, soit à la matière organique (De VILLIERS, 1971).

Au cours de l'extraction sélective des hydroxydes amorphes, on peut observer d'abord une augmentation du nombre de sites d'échange cationique masqués par ces hydroxydes, et ensuite, une diminution de la capacité d'échange jusqu'à des valeurs très faibles, après dissolution des allophanes proprement dites (COLMET DAAGE, 1969, KAWAI, 1969).

Les mesures ont été effectuées par agitation (12 h) dans des tampons acide acétique acétate d'ammonium aux pH convenables. Puis les suspensions sont centrifugées avant dosage.

	Humide	sec	pH 4	pH 8,5	Après extr. amorphes
Chaîne des Puys Mercoeur (B)	60	46	27	48	1,6
Cantal Marlieux (B)	42	33	16	35	8

Résultats en m.e./100 g de sol

Les résultats obtenus sur les échantillons types ne sont donc pas en contradiction avec ceux des auteurs précités.

La mesure de routine donne une valeur de capacité -'échange cationique des andosols par excès à cause de l'abondance des charges variables qui apparaissent entre pH 4 et pH 9. La diminution due à la dessiccation ne compense pas cette surestimation.

La désaturation est donc moins poussée qu'il n'y paraît; mais, même si la mesure était faite au pH du sol, et sur sol frais, les taux de saturation resteraient tout de même inférieurs à 20 % en surface dans les sols du Cantal et à 30 % dans l'andosol évolué de la Chaîne des Puys.

En conclusion, compte tenu des recherches en cours et de nos propres résultats, il semble que la meilleure méthode consisterait à établir une courbe continue des valeurs de la capacité d'échange cationique entre pH 4 et pH 9. Les mesures nécessaires sont effectuées facilement par la méthode agitation-centrifugation dans des solutions tamponnées convenables. Il est alors facile de retrouver la capacité d'échange au pH du sol. En outre, la variation de capacité d'échange avant et après extraction de la matière organique et des amorphes peut donner une bonne idée du rapport Amorphe/argile.

5.3.- Capacité d'échange anionique

Le mécanisme de la fixation des anions a été étudié en détail par FIELDS et SCHOFIELD (1960). Le pouvoir d'immobilisation des nitrates par les andosols (SINGH et KANEHIRO, 1969 ; SCHAEFFER et al., 1969) est moins bien connu que celui des phosphates (FARES, 1974 ; YOSHINAGA et YAMAGUCHI, 1970 ; GEBHARDT, 1974). Dans certains cas, la quantité de P_2O_5 immobilisée peut représenter jusqu'à 25 % de la fraction fine, bien que la fraction assimilable soit quasiment nulle (QUANTIN, 1972).

6.- PROPRIETES GENERALES DE LA MATIERE ORGANIQUE DES ANDOSOLS

Toutes les remarques que l'on peut trouver sur la matière organique des andosols concernent qu'au moins les taux de carbone et les valeurs du rapport C/N.

Plus rarement, sont rapportées des valeurs de taux d'extraction des matières humiques, et d'indices de polymérisation. Un petit nombre d'études seulement traitent de la structure moléculaire des composés organiques en utilisant des techniques spécialisées (analyse élémentaire et fonctionnelle, spectrométrie I.R. ou X).

6.1.- Méthodes d'extraction des composés humifiés

Les méthodes sont apparemment très nombreuses, mais elles peuvent en fait être considérées comme des variantes de quatre méthodes principales.

- La méthode TIURIN
- La méthode KONONOVA
- La méthode DABIN (O.R.S.T.O.M.)
- La méthode DUCHAUFOR-JACQUIN

Les innombrables variantes qu'il serait trop long d'énumérer ici, concernent surtout les temps et les températures d'extraction ainsi que les concentrations des réactifs qui sont presque toujours la soude N/10 ou le pyrophosphate de Na M/10 ou 1 %.

Dans les trois premières méthodes, les extractions sont progressives, mais toutes les liqueurs d'extraction où les résultats sont cumulés au niveau de l'établissement du rapport AF/AH, alors que dans la dernière, il est d'usage de les considérer séparément. Seules les deux dernières méthodes comportent une élimination préalable des débris végétaux par densimétrie (Acide phosphorique ou mélange bromoforme-alcool).

Ce point est important, car il est bien connu que l'hydrolyse de la matière organique fraîche par les réactifs alcalins peut fausser notablement les rapports AF/AH (THOMANN, 1963) et les taux d'extraction.

Il fallait également signaler l'extrême diversité des méthodes employées, afin de montrer la limite de validité des comparaisons dont nous allons rendre compte maintenant.

6.2.- Le carbone total

Tous les auteurs s'accordent à reconnaître que les andosols sont caractérisés par des taux élevés de carbone total, même lorsque cela ne se traduit pas par une couleur particulièrement sombre des horizons (B).

KOSAKA (1963) pense pouvoir fixer à 5 % de carbone dans les horizons A, la limite qui distinguerait les andosols des autres sols montagnards.

Pensant qu'il valait mieux considérer les valeurs mesurées dans les horizons (B), nous avons comparé une série de sols humifères sur granite du Plateau de Millevaches (NYS, 1973) et les andosols de l'étage montagnard du Cantal et de la Chaîne des Puys. Sur dix horizons (B) situés entre 40 et 60 cm de profondeur, nous trouvons des teneurs qui sont respectivement de l'ordre de 5 % dans les andosols, et de 1 % sur les sols granitiques.

Il ne faudrait pas en déduire que l'accumulation du carbone est 5 fois plus forte dans les andosols. En effet, si l'on admet que la densité de la matière organique humifiée est à peu près la même quel que soit le type de sol, il n'en est pas de même du squelette minéral des sols volcaniques et granitiques. En effet, les débris de roches volcaniques, fréquemment vacuolaires, ont une densité apparente égale à la moitié de celle des minéraux du granite, comme nous l'avons vu plus haut. L'expression pondérale des teneurs en carbone fausse donc la comparaison en faveur des andosols qui n'accumulent en fait, à volume égal, que deux à trois fois plus de carbone que les sols montagnards analogues.

6.3.- Le rapport C/N

Les valeurs varient très largement selon les régions étudiées. Nous avons, quant à nous, des valeurs qui sont systématiquement faibles (moins de 14) sauf dans trois ou quatre cas précis où la litière n'est composée que de feuilles de hêtre. Dans ces quelques cas, le C/N est élevé en surface et s'abaisse en profondeur, que le sol soit podzolique sur roche acide (588) ou andique sur moraine basaltique (868).

On trouve également des valeurs basses dans tout le profil, dans les autres sols volcaniques connus dans le Massif Central (MOINEREAU, 1968 ; BONFILS, 1972), ainsi qu'au Cameroun, à basse altitude (SIEFFERMANN, 1969), en Equateur (COLMET DAAGE, 1969) et en Colombie (LUNA, 1969). Par contre, ZAVALETA (1969), au Pérou, rapport des valeurs élevées, et sur l'ensemble des analyses connues en Amérique du Sud, MARTINI relève des valeurs variant entre 4 et 48. Comme à Madagascar, les valeurs de ce rapport, élevées en surface (ZEBROWSKI, 1971), s'abaissent généralement en profondeur.

A l'inverse, dans la plupart des cas, le C/N est plus élevé en profondeur qu'en surface dans les sols du Japon (TOKUDOME et KANNO, 1965a-b) ce qui, selon WADA et AOMINE (1973) va de pair avec une augmentation de l'âge du carbone.

De nombreux facteurs peuvent influencer sur ces variations apparemment incohérentes du C/N, dont notamment la nature de la végétation, la saison de prélèvement, l'âge des composés humiques, et enfin, la présence fréquente de carbons de bois, surtout dans les sols fossilisés par des retombées volcaniques.

Dans l'ensemble, nous retiendrons que les valeurs du rapport C/N sont le plus souvent basses en surface, ce qui est en liaison avec une bonne activité minéralisatrice. Les exceptions assez nombreuses à cette règle, semblent dues à la nature de la végétation pour les horizons de surface, et à l'âge des composés pour les horizons profonds.

6.4.- Les taux d'extraction

Bien que nous ayons constaté que pour des andosols, les rapports sol/réactif généralement employés (1/10 ou 1/20) sont trop élevés, tous les auteurs notent des taux d'extraction élevés (50 à 70 %). Nous verrons, dans la deuxième partie, que cette propriété révèle la nature du principal agent d'insolubilisation de l'humus des andosols : l'alumine, qui, étant soluble dans la soude à pH supérieur à 10, facilite l'extraction (Chapitre II (II)).

6.5.- Les rapports AF/AH

Avant d'aborder l'interprétation écologique des variations de ce rapport, il est bon de rappeler quelques unes des causes artificielles de variation.

Tout d'abord, deux artefacts peuvent fausser les résultats :

(1) les extractions incomplètes augmentent la proportion d'acides fulviques. Par contre, si le pH de floculation n'est pas contrôlé, l'abondance des gels d'hydroxydes floculés peut accroître la proportion d'acides humiques.

(2) Ensuite, ce rapport varie également en fonction de la végétation et de la saison de prélèvement d'une part, ainsi bien sûr qu'en fonction des conditions pédoclimatiques et de l'âge du sol.

WADA et AOMINE (1973) accordent une importance assez grande à ce dernier facteur. L'augmentation relative des acides humiques serait aussi attribuée à une action catalytique des allophanes qui peuvent, in vitro, accélérer le brunissement de polyphénols comme le pyrogallol (KYUMA et KAWAGUCHI, 1964).

Malgré tous les facteurs de variation de ce rapport, il semble possible de dégager une signification écologique des proportions d'acides fulviques et humiques, à partir de la séquence altitudinale étudiée en Equateur par COLMET DAAGE (1969) ; les résultats obtenus dans les autres régions semblent pouvoir s'ordonner, à âge égal, en fonction des conditions climatiques liées à la latitude ou/et à l'altitude.

Dans le tableau I₃, nous avons tenté de donner quelques exemples de la façon dont peuvent s'ordonner ces résultats. Malgré les réserves et incertitudes liées à ce type d'analyses, nous retiendrons que *les andosols sont caractérisés par des humus le plus souvent assez actifs biologiquement et des horizons où s'accumulent de grandes quantités de composés humifiés généralement peu polymérisés.*

Tableau I₃. - Variations climatiques du rapport AF/AH

Climats		Rapport AF/AH	Exemples
Avec dessiccation	Sec et froid d'altitude	AF < AH	Paramon (Andes Canaries (> 2 000 m))
	Tempéré chaud à saison sèche	AF < AH	Japon Sud Canaries (Altitude moyenne)
	Subtropical à saison sèche	AF < AH	Peu accentuée : Japon Sud Var. d'altitude : Ankaratra (Madagascar)
Sans dessiccation	Humide froid	AF > AH	Alaska Sols pseudo-alpins (Massif Central : > 1 400 m)
	Humide tempéré (dessic. faible)	AF > AH	Massif Central (1 000-1 400 m)
	Perhumide	AF > AH	Cameroun - Antilles - Equateur

CONCLUSION

Les propriétés particulières des andosols nous ont obligé à entreprendre une révision critique de la plupart des méthodes classiques qui s'avèrent généralement inapplicables, ou donnent des résultats incohérents sur ces sols.

Cette étape indispensable du travail a été effectuée au cours des analyses de caractérisation qui étayaient l'étude écologique. L'effort a surtout porté sur les trois points essentiels pour la compréhension de la nature des constituants de la phase amorphe organo-minérale et des mécanismes de sa formation :

- Séparation des constituants minéraux primaires et secondaires,
- Estimation correcte des amorphes totaux sans détruire ou endommager les argiles,
- caractérisation des constituants organiques.

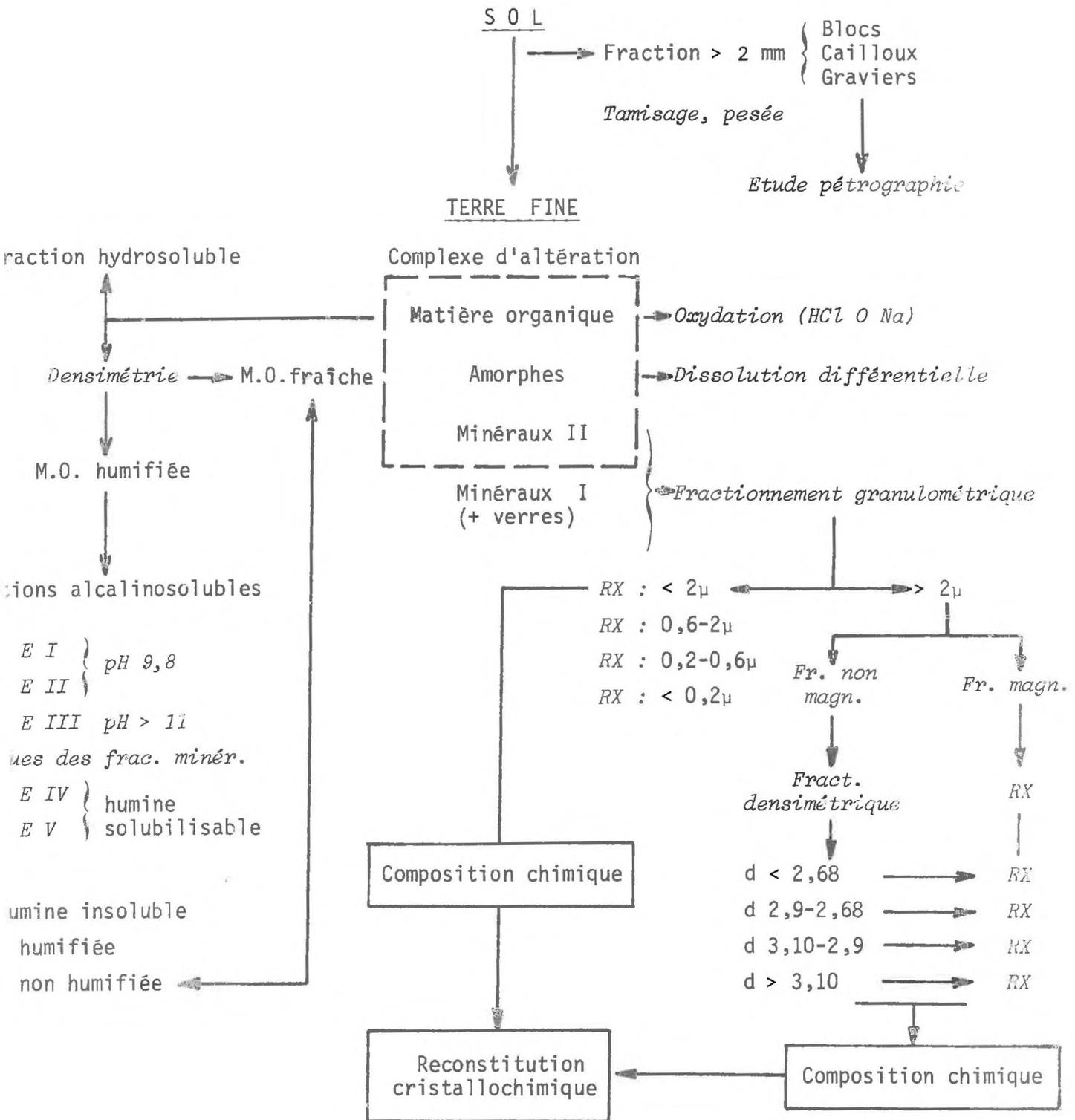
Sur le premier point, nous sommes parvenu à de très bonnes séparations granulométriques, mais en sacrifiant l'étude des constituants fragiles tels que l'imogolite dont l'étude n'est possible que par la méthode de dispersion du sol total ou très faiblement attaqué (YOSHINAGA, 1962 - 1966).

L'avantage de cette démarche apparaît par contre au niveau de l'étude des minéraux argileux qui ne sont plus engagés dans les pseudo-limons : ceux-ci se trouvent en effet parfaitement dissociés après l'attaque des ciments organiques et minéraux, par des méthodes efficaces mais non destructives pour les réseaux des phyllosilicates.

Enfin, l'étude critique des protocoles habituels de caractérisation de la matière organique nous a amené à contribuer aux progrès accomplis ces dernières années, en faisant porter l'effort sur les méthodes d'extraction plutôt que sur la chimie des molécules extraites dans des conditions mal connues.

Toutes les opérations effectuées sur les échantillons des profils types sont récapitulées dans le tableau I₄.

Tableau I4.- SCHEMA GENERAL DE L'ISOLEMENT DES FRACTIONS DU SOL



CHAPITRE II

ETUDE ECOLOGIQUE DE LA REPARTITION DES SOLS

INTRODUCTION

Après l'étude des sols volcaniques des Vosges (DUCHAUFOR et SOUCHIER, 1966b; HETIER, 1968), nous avons axé l'étude de l'andosolisation en climat tempéré sur deux régions du Massif Central français, dont l'étendue et la diversité des formations volcaniques permettaient une étude écologique d'ensemble.

A l'époque où nous avons commencé ce travail (1969), les études écologiques d'ensemble n'étaient pas encore très nombreuses, mais il apparaissait déjà que le seul moyen de tirer parti des études de terrain était d'envisager les séquences climatiques, donc altitudinales les plus complètes possibles.

Nous ne nous sommes pas contentés de prospecter seulement les formations récentes de la Chaîne des Puys, où l'on trouve les andosols typiques dans quelques stations favorables. Les formations anciennes, les basaltes des plateaux notamment, couvrent des surfaces tellement plus vastes que l'on se devait de les étudier afin de préciser la portée des conclusions tirées de l'étude des sols types (carte schématique d'ensemble du Massif Central : Plaque I₁), et de préciser l'influence de l'âge des matériaux.

Pour des raisons d'opportunité (parution des études géologiques du Cantal et de la Chaîne des Puys), nous avons commencé par l'étude d'un secteur de la bordure nord-ouest du Massif du Cantal, où se trouvent regroupés, sur une surface assez restreinte, des roches-mères variées d'une part, et d'autre part une séquence altitudinale assez complète sur laves basaltiques. La cartographie et l'étude de caractérisation des sols de cette région ont fait l'objet d'une première publication (HETIER, 1971).

D'après ce que nous avons pu voir dans le reste du Cantal, les Monts Dorés, ainsi que dans l'Aubrac, les Coirons et le Velay, et plus au sud, l'Escandorgue, la région étudiée peut être considérée comme suffisam-

PLANCHE I1.- LE VOLCANISME DU MASSIF CENTRAL FRANCAIS



SH : Socle hercynien

CP : Couverture périphérique
secondaire et tertiaire

GO : Grabens et bassins oligocènes

VN : Volcanisme néogène

1. Ch. de la Sioule

2. Chaîne des Puys

3. Limagne

4. Mont Dore

5. Cézallier

6. Cantal

7. Aubrac

8. Causses

9. Escandorgue

10. Bas Languedoc

11. Bourgogne

12. Forez

13. Bassin du Puy

14. Devès

15. Velay

16. Bas Vivarais

17. Coiron

ment représentative de l'ensemble des sols des formations volcaniques anciennes du Massif Central pour que les conclusions soient de portée assez générale.

Pour la Chaîne des Puys, il n'a pas été possible de déterminer un secteur limité suffisamment représentatif de l'ensemble des Monts Dômes, et le document cartographique présenté est un schéma d'ensemble.

Compte tenu des publications antérieures, et pour limiter le volume du présent ouvrage, la présentation des observations écologiques sera faite à deux niveaux.

Dans ce chapitre, nous avons traité les problèmes descriptifs à un niveau général, en regroupant les types de stations et les types de sols.

En annexe, on trouvera les analyses commentées des principaux sols qui ont servi à étayer les raisonnements tirés de l'étude écologique.

Enfin, avant d'aborder l'analyse générale des facteurs écologiques de l'andosolisation, nous rappellerons quelques observations faites en dehors des secteurs étudiés dans le Massif Central.

I.- RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Il serait long et fastidieux d'énumérer un par un tous les travaux effectués dans les différentes parties du monde sur les andosols, et ceci d'autant plus que la plupart d'entre eux sont passés en revue dans trois documents importants : les Comptes rendus du Congrès de Tokyo (1964), de Turrialba (1969) et la synthèse bibliographique de P. QUANTIN (1972).

En ce qui concerne les très nombreux travaux des auteurs japonais, l'article récent de WADA et AOMINE (1973) fait également le point des résultats essentiels.

Sans prétendre faire une revue exhaustive, nous avons tenté de présenter, en les regroupant par grande région climatique, les résultats caractérisant le type et le degré d'évolution andosolique, en fonction des conditions pédoclimatiques et de la nature de la roche-mère.

LES REGIONS ARCTIQUES

L'article récent de HEILMANN et GASS (1974) vient combler une lacune sur ce point. Au niveau de la mer, ces auteurs décrivent comme des podzols, toute une série de sols d'Alaska, sur des roches volcaniques variées. Même sur basalte, un horizon A₂ de 1 à 2 cm d'épaisseur apparaît. Le climat est perhumide et les températures sont très basses, même pendant la brève saison de végétation. Compte tenu de la richesse en éléments amorphes des horizons dits spodiques, on ne comprend pas pourquoi ces sols ne sont pas rattachés aux andosols.

En Islande, il ne semble pas que les sols volcaniques aient été étudiés en tant qu'andosols.

LES REGIONS TEMPEREES

- Sibérie

Au Kamchatka (SOKOLOV et al., 1964, 1966, 1969), les sols andésitiques formés sous climat froid et humides sont sans doute des andosols, bien que ce ne soit pas explicitement précisé. Ils ont surtout été étudiés du point de vue de l'altération sous l'influence des composés organiques.

- Amérique du Nord

Aux U.S.A., dans l'Oregon, les sols formés aux dépens des projections rhyolitiques et dacitiques relativement récentes (6600 ans) évoluent sous un climat contrasté et relativement sec. L'évolution de ces matériaux est assez particulière.

Nous retiendrons de ces études (YOUNGBERG et DYRNESS, 1964 ; CHICHESTER et al., 1969) que ces formations acides sont peu altérées et que l'alternance des dessiccations dirige l'évolution du complexe d'altération vers des néosynthèses d'argiles 2/1.

- Japon

L'extension de l'archipe japonais fait que les sols volcaniques évoluent sous des climats bien différents dans les Iles du nord et dans celles du sud. Par contre, les cendres, scories et lapillis sont surtout de nature andésitique et dacitique. Les âges des dépôts sont très variables, du début du quaternaire à nos jours.

Aussitôt après leur dépôt, ces projections sont très acides (présence de sulfates). Les premières pluies éliminent l'excès de produits acides, puis l'altération libère une grande quantité de bases et le sol peut devenir alcalin pendant une période au cours de laquelle les silicates peuvent être dispersés et lessivés durant les premiers stades de la formation des gels siliceux et alumineux.

Mais à partir de ce stade, il semble établi, d'après OHMASA (1964) que l'évolution puisse prendre plusieurs directions en fonction des conditions stationnelles. Sous couverture forestière, on a des sols bruns acides ou des sols podzolisés. Ce n'est qu'au pied des volcans, sur des replats et des pentes faibles, qui ne sont pas occupées par l'activité agricole mais par des landes à graminées, que l'on trouve des sols particuliers que les Japonais nomment KUROBOKU (Kuro = sombre ou noir ; Boku = friable) et les pédologues américains, ando-soils.

C'est à partir de ces sols qu'ont été étudiées les propriétés particulières, et progressivement définis et classés, les andosols. Dans ce pays, la classification est établie sur des bases plus pratiques que théoriques, et l'âge des sols tient une grande place à cause de l'ensevelissement répété des profils avant qu'ils n'aient atteint le terme de leur évolution climacique normale.

L'interprétation n'est généralement proposée qu'au niveau minéralogique (travaux de WADA, AOMINE et coll.) ou au niveau des caractères de la matière organique (TOKUDOME et KANNO par exemple). Sur le premier plan, il semble admis que l'on puisse envisager la formation simultanée d'allophane, d'imogolite et de gibbsite dans différents microsites du même matériau (WADA et MATSUBARA, 1968). Le premier élément se formerait par

altération des interstices et des bords des grains élémentaires qui forment la particule volcanique. La précipitation d'un gel moins siliceux, peut-être sous l'influence de l'activité biologique dont les signes sont nombreux, donne naissance à l'imogolite qui enrobe l'ensemble des éléments du sol. La gibbsite, elle, se forme à un endroit précis, au contact d'un morceau de roche-mère différent.

L'importance de cette observation tient pour nous au fait que, même en présence de moins de 0,6 % de carbone dans le sol total, il n'est pas possible d'envisager que les tout premiers stades de l'altération puissent avoir lieu indépendamment de l'activité biologique et des composés organiques.

L'évolution des composés organiques et des minéraux secondaires des sols japonais, est examinée par ailleurs.

Pour l'instant, nous retiendrons que les caractères des andosols n'ont été reconnus au Japon que sur une catégorie bien précise de sols volcaniques définis par des conditions écologiques particulières. Bien qu'il ne soit pas explicitement envisagé, le rôle des composés organiques dans la formation des gels n'est pas exclu par les auteurs japonais.

La couleur noire des sols Kuroboku est attribuée aux caractères particuliers de la matière organique humifiée issue des litières de graminées, par opposition à celle qui résulte de l'évolution des litières forestières. La teinte spécifiquement noire des complexes organo-minéraux est aussi mentionnée.

Aux nombreux résultats obtenus par les chercheurs japonais, viennent s'ajouter les travaux effectués, sous des climats comparables, par les pédologues néo-zélandais (FIELDES et al.) qui portent surtout sur les propriétés des allophanes.

- Europe

En Allemagne, les tufs quaternaires de l'Eifel (MEYER et SARK, 1970 ; BALLMAN, 1972) de composition andésitique, donnent des sols bruns andiques plus riches en argiles qu'en amorphes.

L'existence d'andosols en climat méditerranéen humide ou montagnard est également signalée en Italie (MOURIER-TCHERNIA, 1968), en Espagne (BECH-BORRAS et al., 1974), et en Sardaigne (ESCHENA et GESSA, 1967).

LES REGIONS TROPICALES ET EQUATORIALES

- Iles Pacifiques

De très nombreuses études effectuées dans les Iles du Pacifique, Hawaï (SWINDALE, 1964 ; LAI SUNG-HO et SWINDALE, 1969), Nouvelles Hébrides (QUANTIN, 1974), ainsi qu'en Indonésie (TAN, 1966 ; DUDAL, 1960) montrent que dans les séquences allant des andosols aux sols ferrallitiques, l'andosolisation rapide (1000 ans) va de pair avec la permanence de l'humidité et la stabilité d'une matière organique abondante.

- Afrique

En Afrique, SIEFFERMANN (1969) aboutit à des conclusions du même ordre en étudiant une séquence non pas altitudinale, mais purement climatique qui va des andosols perhydratés situés au pied du Mont Cameroun

aux sols ferrallitiques proches du Lac Tchad.

- Madagascar, Réunion

A Madagascar, après SEGALÉN (1957), ZEBROWSKI (1971) a décrit des andosols sur roches anciennes et récentes, puis une séquence altitudinale complète à la Réunion, comportant en altitude des sols d'abord décrits comme des profils complexes (RIQUIER, 1960), puis comme des podzols (ZEBROWSKI, 1973). Ensuite, viennent des andosols typiques, puis en bas de chaîne, des sols ferrallitiques.

- Amérique Centrale

Enfin, en Amérique Centrale et en Amérique du Sud, sans oublier les très nombreux travaux effectués dans les différents pays où passe la Chaîne des Andes (ZAWALETA, LUNA, MARTINI, CORTES et FRANZMEYER par exemple) nous nous limiterons à rappeler les séquences décrites par COLMET-DAAGE (1967, 1969, 1972, 1974), car ce sont sans doute les plus complètes qui aient été étudiées. Du haut en bas, on trouve successivement des sols à profil AC comparables aux sols pseudo-alpins sous climat froid et relativement sec (plus de 3000 m). L'humidité augmentent, on passe aux andosols typiques, puis, lorsqu'elle diminue, à nouveau les sols sont plus argileux. Enfin, au climat équatorial très humide du bas de la séquence, correspondent des andosols perhydratés.

Nous pouvons maintenant aborder le compte rendu de nos propres observations dont l'interprétation s'inscrira plus facilement dans l'ensemble des études faites dans les différentes régions du monde.

II.- LES REGIONS VOLCANIQUES DU MASSIF CENTRAL FRANCAIS

1.- LA CHAÎNE DES PUYs

1.1.- Généralités

a) Situation géographique (Planche I₂)

L'ensemble volcanique récent que constitue la Chaîne des Puy est situé au nord du Massif Central, en bordure de la plaine de Limagne. Il comporte une zone axiale (appareils et projections meubles) large de 3 à 5 km, qui s'étend dans le sens Nord-Sud, sur environ 30 km.

De cette zone axiale se détachent quelques coulées qui s'étalent assez largement sur le plateau granitique ou, au contraire, empruntent des vallées par lesquelles certaines parviennent jusqu'en Limagne à une altitude d'environ 500 m.

Le Puy de Dôme (1465 m) domine largement les autres appareils qui culminent en général entre 1100 et 1200 m au-dessus du plateau granitique (800 à 900 m).

b) Géologie, lithologie, géomorphologie

α) Géologie

A partir des travaux et documents cartographiques consacrés à la Chaîne des Puy, parmi lesquels nous citerons la récente carte géologique au 1/50 000 et les études plus anciennes de GLANGEAUD (1913), JUNG (1946), BENTOR (1954), BROUSSE (1969), ainsi que les observations en cours de BABKINE, on peut présenter schématiquement les grandes unités géologiques de la Chaîne des Puy de la manière suivante (carte de la planche I₂) :

- Le volcanisme ancien

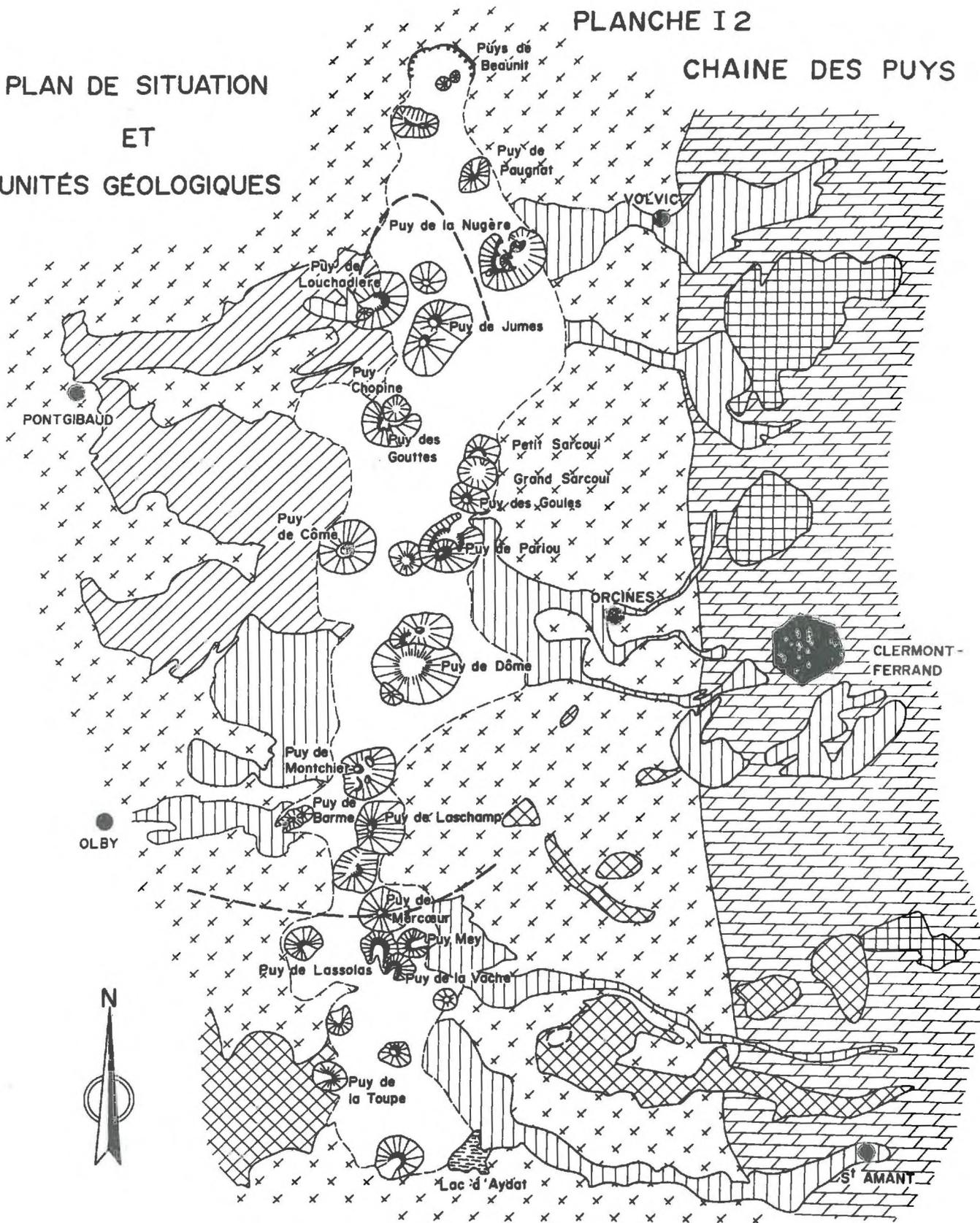
Sur le plateau granitique, à la périphérie des appareils récents, les restes des coulées basaltiques pliocènes sont passablement érodées et dépourvues de toute couverture scoriacée. Une grande coulée pliocène de basalte "tache de soleil" (KIEFFER, 1968) qui culmine à 1040 m près du Lac d'Aydat et descend jusqu'en Limagne, a particulièrement retenu notre attention : il s'agit de la Montagne de Serre. (Cf. annexe n° 735).

Les entablements basaltiques du plateau de Gergovie, des côtes de Clermont ou de Nohanent, sont encore beaucoup plus altérés et seraient d'âge miocène (BOUT et al., 1966). On peut rapprocher de ces formations, d'autres buttes témoins en Limagne, formées de pépérites qui sont des brèches volcano-sédimentaires sous lacustres, composées de marne stampienne et d'éléments magmatiques très vitreux (MICHEL, 1953).

- Le volcanisme récent

Les formations récentes constituent une partie axiale importante comprenant tous les appareils et la plupart des projections meubles, et des coulées latérales qui s'étalent sur le plateau granitique à l'ouest, et descendent vers l'est jusqu'en Limagne par des vallées étroites. La partie axiale, large de 3 km et longue de 30, comporte trois parties :

PLAN DE SITUATION
ET
UNITÉS GÉOLOGIQUES



LÉGENDE

ECHELLE



Dessin : P. Sueur

Quaternaire



Coulées récentes



Coulées anciennes



Limites nord et sud des projections domitiques

Tertiaire



Pliocène



Miocène



Sédimentaire



Socle et R. métamorphiques



Projections de la zone axiale

Une partie nord, limitée par le Puy de la Nugère, serait la plus ancienne et n'aurait pas été atteinte par les projections dômiques. Une partie médiane, comportant les appareils dômiques (Puy de Dôme, Sarcoui et Chopine) dans laquelle des surfaces importantes sont recouvertes par des projections trachytiques dont la répartition, très complexe dans le détail, est fonction de l'orientation des versants par rapport au point d'émission d'une part, et de l'érosion intervenue durant les 8200 ans (BROUSSE et al., 1969) qui ont suivi sa mise en place d'autre part. La partie méridionale est à la fois la plus réduite et la plus récente. Certaines formations, au sude du Puy de Mercoeur, ont en effet été mises en place après les émissions de dômite.

β) Lithologie

Les basaltes tertiaires sont massifs et bien cristallisés. On les différencie bien sur le terrain, par leur position géographique et leur degré d'altération.

Toutes les coulées quaternaires sont encore pourvues de leur couverture scoriacée à partir de laquelle se développent les sols. C'est pourquoi nous nous intéresserons surtout aux propriétés de ces scories et des projections aériennes qui les recouvrent souvent.

La dômite, trachyte alcalin à biotite ou hornblende, n'affleure guère que sous forme de projections blanches ou jaunâtres très fines, enrobant parfois des blocs (Nuée ardente).

Les andésites et les basaltes apparaissent sous forme de lapillis, fragments de petite taille (3 à 5 cm) sur les flancs des cônes, et dont la couleur varie selon les conditions de mise en place et le chimisme des magmas.

Sur les coulées, on peut trouver également des placages de pouzzolanes, mais le plus souvent, il s'agit d'éléments plus grossiers et de blocs scoriacés encore peu altérés. La teneur en verre, variable, est difficilement chiffrable d'après l'examen des lames minces. BENTOR (1954) donne des estimations variant entre 5 et 30 %, mais très souvent la pâte est entièrement composée de microlites feldspathiques et d'oxydes opaques, seuls les bords des vacuoles étant réellement vitreux.

γ) Géomorphologie

L'érosion a fort peu modifié la morphologie des cônes et des coulées. Les appareils semblent à peu près intacts et, sur le plateau granitique, les inversions de relief sont à peine amorcées. Dans les vallées quidescendent en Limagne, elles sont un peu plus marquées, comme par exemple à St-Saturnin, où le ruisseau a surcreusé de 40 m à côté de la coulée mise en place il y a 7600 ans.

La faiblesse des phénomènes d'érosion est sans doute due à l'absence d'action glaciaire depuis la mise en place de la chaîne d'une part, et d'autre part à l'action protectrice de la couverture végétale qui a dû se mettre rapidement en place. En effet, lorsqu'on observe actuellement l'effet du ruissellement dans les zones artificiellement dénudées, on comprend que sans cette protection, les reliefs auraient été bien davantage modifiés. En dehors de l'entraînement mécanique des fractions meubles, ajoutons que, sur les coulées, la faiblesse de l'érosion est due au fait que l'altération n'a pas eu le temps de modifier les matériaux et de les "préparer" à l'érosion.

Pour estimer dans le détail l'importance de cette érosion, les placages de dômite pourraient fournir deux types de repères : tout d'abord, sur les surfaces planes du plateau granitique ou des coulées, de la couche dômite qui devait être à l'origine continue, il ne subsiste que des placages isolés entre lesquels la formation sous-jacente réapparaît. Par ailleurs, l'étude des dépôts des fonds de cratère, dans la partie centrale (Puy de Pariou, Puy des Goules, par exemple : sols 738-739), montre que la dômite n'est enfouie que sous une faible profondeur de colluvium autochtone provenant des flancs du cône, actuellement dépourvus de dômite. Ceci nous montre qu'après le décapage de cette couverture dômite, l'érosion a été assez faible. Entre le Puy des Gouttes et le Puy de Côme, les sols hydromorphes de piedmont comportent également des niveaux de dômite (sol 867).

Parmi les observations de cet ordre, il faut encore signaler les recouvrements des coulées de vallée qui descendent jusqu'en Limagne. Au moment de leur mise en place, ou peu de temps après, la surface de ces coulées a été polluée d'éléments allochtones, notamment d'arènes granitiques provenant des versants. Bien que ces coulées soient maintenant légèrement en relief par rapport aux roches encaissantes, ces recouvrements sont encore en place. Ceci empêche d'observer sur ces coulées des séquences altitudinales de sols volcaniques, depuis l'altitude de la sortie de l'appareil jusqu'à celle du front de coulée.

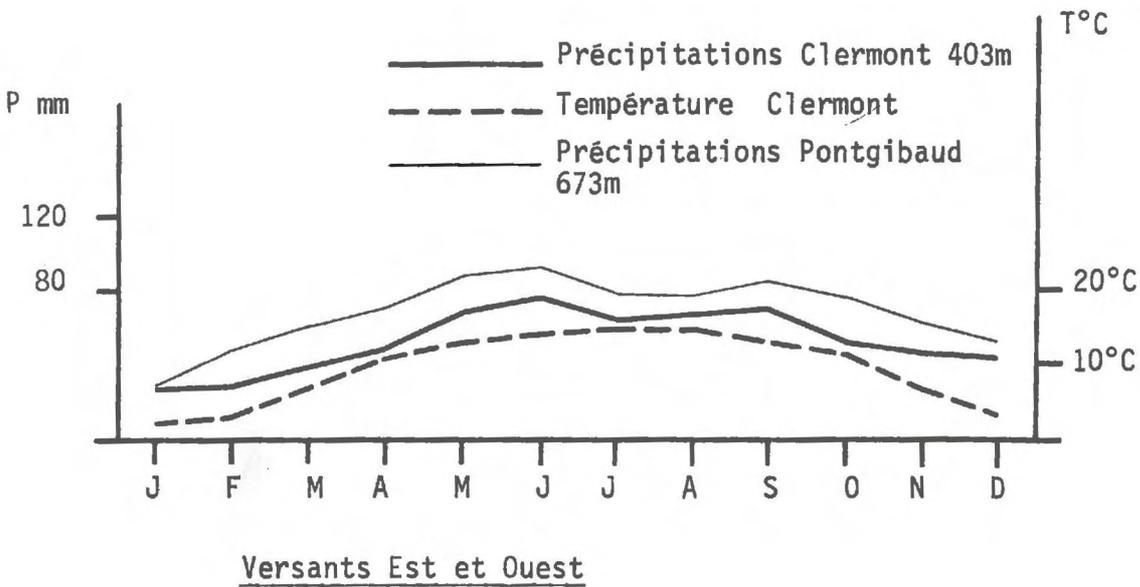
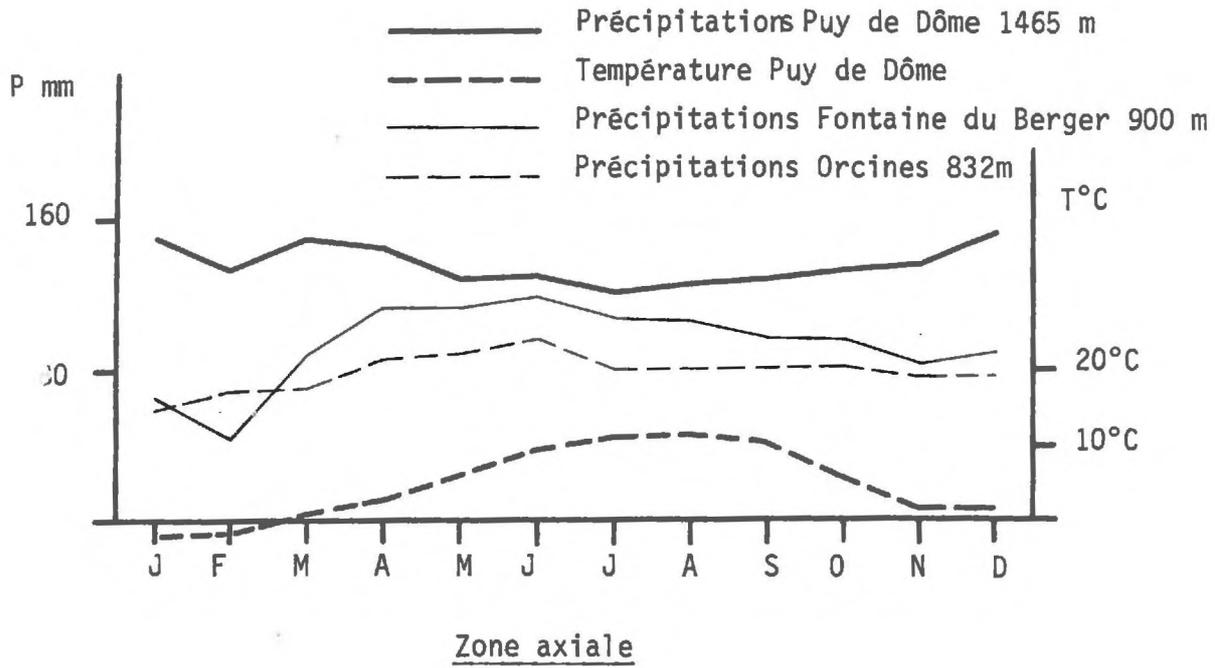
c) Climat

Les précipitations sont moins abondantes que dans le Cantal. D'après ESTIENNE (1956), la moyenne des précipitations annuelles dépasserait légèrement un mètre avec une répartition dissymétrique marquée au profit du versant ouest. Même le sommet du Puy de Dôme est moins arrosé (1500 mm environ) que la plupart des planèzes de l'ouest du Cantal. Sur les sommets, on a un maximum hivernal des précipitations, alors que sur le plateau, surtout dans la partie est, on observe un maximum printannier ou estival bien net (Planche I2_{bis}).

Les températures moyennes annuelles varient entre 11°C (Clermont-Ferrand), 6,6°C (Fontaine du Berger, 900 m) et 4,5°C au sommet du Puy de Dôme. En fait, l'exposition des versants ou la topographie locale déterminent de très grandes variations microclimatiques, comme par exemple des inversions du gradient altitudinal des températures (ensoleillement hivernal des sommets).

Compte tenu de la faiblesse des précipitations et de la grande perméabilité des scories, les sols sont théoriquement susceptibles de se dessécher partout, sauf au sommet du Puy de Dôme. En fait, sous couvert forestier, on peut trouver, au-delà de 1100 m, des stations exposées au nord-est où les sols restent humides toute l'année. La forme circulaire des appareils permet d'ailleurs de constater que l'opposition climatique des versants ne partage pas les cônes en une partie nord et une partie sud, mais plutôt une partie nord-nord-est et une partie sud-sud-ouest en ce qui concerne la dessiccation des profils. Il est probable que cela est dû à ce que l'ensoleillement matinal à des heures où la température est encore basse, provoque une moindre évapotranspiration que celui des dernières heures de la journée, plus chaudes.

PLANCHE I_{2bis}.- DONNEES CLIMATIQUES DE LA CHAINE DES PUY



d) Végétation

La carte des groupements végétaux de la région a été dressée par LEMEE en 1951. Il ne subsiste à peu près rien des associations primitives.

- Les étages inférieurs de la Chênaie sont boisés sur les flancs les plus abrupts des vallées, le reste des surfaces étant utilisé pour la culture, surtout sur le versant est, et les pâtures sur le versant ouest où les sols granitiques sont considérés comme plus propres à la culture que les sols volcaniques. En Limagne, les plateaux basaltiques miocènes ne sont pas non plus cultivés, sauf sur les flancs, pour la vigne.

- Etage du Hêtre : cet étage s'étend théoriquement de 8 à 900 m selon les expositions, jusqu'à la limite des arbres. Il correspondrait donc à peu près à la zone altitudinale des andosols. Il ne subsiste presque rien des peuplements naturels de Hêtraie, mise à part, peut-être, une partie du Parc d'Allagnat et quelques rares parcelles, telles que le versant est du Puy de Mercoeur, le Puy de Pourcharet ou le Puy Thiolet au Nord.

Actuellement, les paysages de pelouse et de landes secondaires sont progressivement colonisés par le Bouleau et surtout le Noisetier qui couvre de grandes surfaces sur les cônes lorsqu'ils n'ont pas subi un résinage systématique. Mais la plus grande partie des cônes et des cheires est actuellement encore occupée par des landes à Callune et à Genêt qui s'enrichissent en Vaccinium sur les sommets. Parfois, ces landes sont envahies par la Fougère aigle qui tend rapidement à devenir exclusive. La strate herbacée associée à ces landes est en général à la fois acidiphile et xérophile. On en trouvera la description détaillée dans la notice de la carte citée plus haut.

- Etage subalpin : Le problème de l'existence de la pelouse sub-alpine primitive ne concerne que le sommet du Puy de Dôme que son altitude place à la limite climatique de la Hêtraie. Alors que CARBIENER (1963) parle de la "calvitie naturelle" bien visible de ce sommet dont le sol est pour lui un ranker cryptopodzolique pseudo-alpin, DUPUIS et HOREMANS (1966) supposent que le profil qu'ils décrivent était à l'origine situé sous la Hêtraie. Un autre profil tel qu'il est décrit par les pédologues du Service d'Etude des sols de Montpellier (SERVAT, 1968, analyse inédite) semble plutôt correspondre à un sol pseudo-alpin.

Nos propres observations nous amènent à penser que si la majeure partie de la surface sommitale n'a jamais dû être colonisée par la Hêtraie à cause des vents violents qui balayent ce sommet isolé, il n'est pas impossible que quelques bouquets d'arbres aient pu se développer aux endroits les mieux abrités et former localement des horizons (B) spodiques.

1.2.- Age des matériaux et âge des sols

a) Age des sols et temps moyen de résidence

Dans la Chaîne des Puys, nous ne disposons pas de données palynologiques nouvelles. Nous baserons donc nos raisonnements sur les "Eléments de chronologie des éruptions de la Chaîne des Puys", étude dans laquelle BROUSSE et al. (1969) ont rassemblé toutes les connaissances acquises sur ce sujet, tant par les études palynologiques régionales et locales des tourbières et des sols (LEMEE, 1955 ; LEMEE et CARBIENER, 1956), que par les datations de charbons de bois et de sols fossiles par la méthode du ^{14}C .

La notion de temps moyen de résidence du carbone dans le sol est liée à celle du taux de renouvellement des composés organiques sous l'influence des cycles biologiques de dégradation des substrats carbonés par la microflore et des apports provenant des litières et des racines.

L'âge du sol est mesuré à partir de l'âge du matériau dont il dérive. Cet âge du matériau est, soit déduit, comme en géologie, par des considérations sur la chronologie des formations, soit par des mesures d'âge absolu effectuées à partir des constituants carbonés : charbon de bois ou sols fossiles. Lorsqu'un matériau recouvre une couche plus ancienne contenant des charbons de bois, le problème est simple. La carbonisation est attribuée à la chaleur des projections et la date de l'évènement correspond à l'âge mesuré sur ces charbons.

Lorsqu'il s'agit d'un sol, le problème est plus complexe. Les datations sont effectuées sur les résidus carbonés insolubles aux réactifs alcalins (BROUSSE et al., 1969). Ce résidu, que nous appelons "humine", a, nous le verrons, un temps moyen de résidence à peine inférieur à celui de l'ensemble du carbone de l'horizon. Or, nous avons noté que, dans les horizons de profondeur des andosols, ce temps de résidence approche 4000 ans. Ce chiffre est bien supérieur à celui sur lequel se basent les éléments de chronologie de BROUSSE et al. (3 à 400 ans) qui est valable pour des sols bruns, mais non pour des andosols.

L'âge apparent d'un paléosol représentant la somme du temps passé depuis son enfouissement, augmenté du temps moyen de résidence du carbone dans le sol enfoui (WADA et AOMINE, 1973), les âges proposés pour la formation qui l'a fossilisé risquent d'être trop élevés si on ne tient pas compte de la longueur inhabituelle des temps de résidence du carbone dans les andosols.

Dans ces conditions, nous pouvons tenir pour assurées, toutes les datations basées sur des mesures d'âges de charbons de bois, mais les formations datées par des sols risquent d'être beaucoup plus récentes qu'on ne le croyait jusqu'à maintenant.

b) Durée de l'andosolisation

En ce qui concerne l'étude de l'andosolisation, nous distinguerons trois groupes de matériaux :

- les matériaux antérieurs à la dômite
- la dômite
- les matériaux postérieurs

Nous savons que les matériaux antérieurs à la dômite peuvent avoir des âges variables entre 8200 et 20 000 ans environ. Mais les déterminations basées sur des mesures de paléomagnétisme sont assez imprécises d'une part, et d'autre part, compte tenu de l'érosion des formations superficielles, l'âge des sols actuels n'est guère en rapport avec celui des formations.

Les dépôts de dômite semblent tous être vieux de 8 200 ans. Ce serait donc l'âge maximum du sol du Puy de Dôme. Comme nous le voyons dans le tableau I₄, le temps moyen de résidence du carbone est bien inférieur. Il est donc bien différent de l'âge du sol en valeur absolue.

L'andosol type du Mercoeur est développé à partir de ces scories basaltiques noires reposant sur la dômite qui, elle-même, recouvre les scories violacées autochtones. L'âge de ces scories n'est pas rigoureusement connu par les études de datations, mais il est compris entre 6000 et 4500 ans (Paléosol du Puy de la Taupe et dernière coulée de La Vache et de Lassolas).

Dans ce profil, le temps moyen de résidence du carbone total de l'horizon le plus profond est de 3700 ans, ce qui implique, nous le verrons dans la deuxième partie, que certaines fractions carbonées soient vieilles de plus de 4000 ans.

A proximité du Mercoeur, au Puy Mey, le matériel superficiel est apparemment le même. Mais sur la partie du sommet qui n'est pas dénudée, les sols sont beaucoup moins évolués qu'au Mercoeur, et le, ou les profils récents reposent sur une couche à charbon de bois datée à deux reprises par B. GUILLET, comme âgée de 1500 ans B.P. Il n'est pas exclu que la cause de l'enfouissement de cette couche soit un épisode volcanique (qui serait alors le plus récent connu dans la Chaîne des Puys), mais il pourrait aussi s'agir d'incendies et de remblais d'origine anthropique (cf. n° 731).

Nous avons donc, dans cette partie sud de la Chaîne des Puys, deux points de repère importants qui permettent de situer le degré d'évolution atteint au bout de 1500 ans d'une part, et de 4 à 6000 ans d'autre part. Dans le cas du sol de Mercoeur, le temps moyen de résidence (T.M.R.) est donc proche de l'âge du sol en valeur absolue.

Tableau I₄. - Temps moyen de résidence du carbone total

	Prof.	C % du sol	T.M.R. ou Age apparent B.P.
<u>Puy Mey</u>			1500 ± 80 (âge absolu charbon de bois)
<u>Puy de Mercoeur</u>	20- 30	8,8	1680 ± 80
	40- 50	7,2	3000 ± 80
	60- 70	3,4	3700 ± 90
<u>Puy de Dôme</u>	15- 25	14,2	950 ± 70
	30- 40	13,4	2040 ± 80
	40- 50	10	2590 ± 80
<u>Sol fossile</u>	150-160	1	8210 ± 120

Nous retrouvons aussi dans ce cas, un résultat analogue à ceux de WADA et AOMINE (1973) pour qui le stade de maturité est atteint par les andosols au bout de 5000 ans environ.

1.3.- Caractères et répartition des sols étudiés

a) Caractères généraux

Les sols de la Chaîne des Puys ont encore été peu étudiés. Quelques profils ont été observés et partiellement analysés par DUPUIS et HOREMANS en 1966 en vue de l'établissement de la carte pédologique de France au 1/1 000 000^e et par BORNAND et al. (1968) à l'occasion de la cartographie du Val d'Allier. PEDRO et ROBERT, en 1968 avaient analysé un profil d'andosol près du Puy de la Vache, en vue de sa caractérisation géochimique. En raison du manque d'analyse quantitative des éléments amorphes, le diagnostic restait incertain. DUPUIS et HOREMANS, en se basant sur des critères morphologiques, ont déterminé certains andosols comme tels et en ont rattaché d'autres aux sols ocres podzoliques.

Sur plus d'une centaine de profils observés, nous avons retenu une vingtaine de stations qui, pensons-nous, représentent les principaux types de sols volcaniques qui existent dans l'ensemble du massif et qui sont décrits ou mentionnés en annexe, en regard des données analytiques intervenant dans le raisonnement.

Parmi les caractères observés, retenons: la richesse en sables et la pauvreté en argile, qui traduisent la jeunesse de beaucoup de profils; la rapidité de la décomposition des litières qui ne subsistent que très rarement plus de quelques mois, la richesse en matière organique humifiée, qui n'est remarquable que pour les sols déjà assez évolués comme celui du Mercoeur (par unité de surface, le sol jeune (moins de 1500 ans) du Puy Mey contient 20 fois moins d'humus que le sol du Mercoeur (4 à 6000 ans)); les phénomènes de lessivage, qui affectent fréquemment les profils de sol brun, aussi bien sur formation quaternaire récente (946 Olby) que sur les coulées anciennes pliocène (735 Chadrat) ou miocène (718 Nohanent).

b) Répartition des différents types de sols (Planche I₃)

a) Caractéristiques de la carte proposée

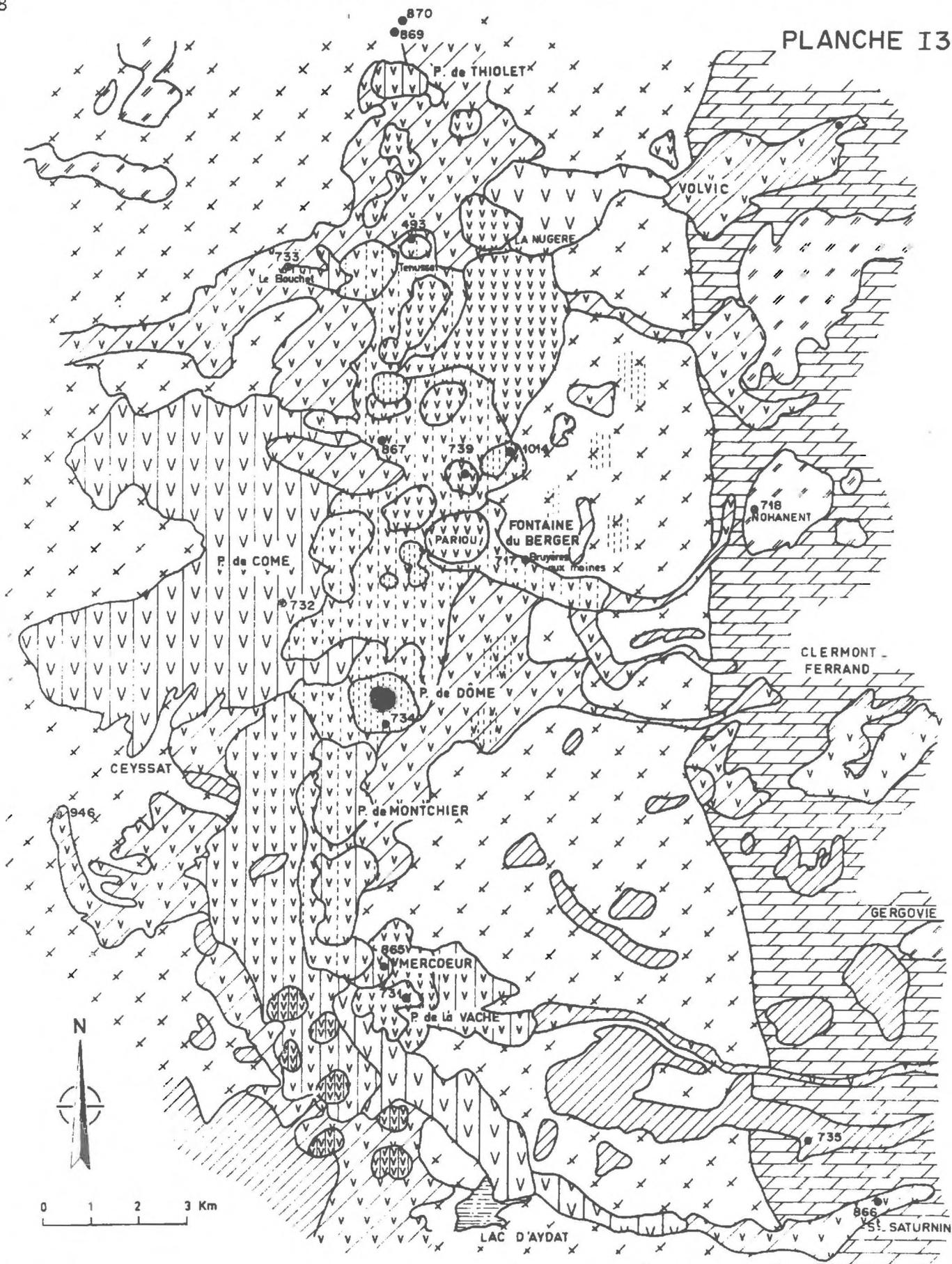
La carte très schématique que l'on peut dresser après une prospection sommaire, est surtout une carte des familles de sols très proche de la carte géologique. Or, nous avons vu qu'à cause de la diversité des produits émis et de leur échelonnement dans le temps, la répartition des formations superficielles était déjà passablement compliquée.

L'érosion liée au déboisement vient encore compliquer le problème de représentation, car dans une même zone altitudinale, se trouvent juxtaposées des zones où les sols sont à des degrés d'évolution différents.

Pour toutes ces raisons, l'influence des différents facteurs ne ressort pas nettement de l'examen de la carte, comme c'était le cas dans le Cantal.

b) Effet des différents facteurs de l'andosolisation

Nous étudierons surtout, en vue de faire des comparaisons avec le secteur étudié dans le Cantal, l'effet de ces différents facteurs sur l'andosolisation.



	Ranker andopodzolique		Andosol sur scories		Sol brun calcique sur coulée miocène
	Sols ocre-andique sur dômite		Association: Andosol et sols ocre-andiques sur scories à placage dômîtiques		Sol brun et brun ocreux sur socle
	Vitrisol sur scories meublées		Sol brun et vitrisol sur coulée IV ^e		Sol brun calcaire sur marne stampienne
	Vitrisol sur coulée à blocs (cheire) et Andosol		Sol brun sur coulée pliocène		

- Zonation altitudinale : facteur climatique

Au-dessous de 600 m, on ne trouve plus d'andosol, même sur les coulées récentes. Il semble que l'on doive envisager une évolution directe des formations volcaniques vers la brunification, même lorsqu'elles sont très divisées et vitreuses lorsque les conditions climatiques ne provoquent pas une altération trop rapide.

Entre 600 et 1100 m, l'andosolisation est possible, mais l'influence des conditions climatiques n'est plus prépondérante.

Au-dessus de 1100 m, l'andosolisation se manifeste à des degrés divers, sur toutes les formations volcaniques.

- Composition chimique

L'andosolisation se manifeste d'autant mieux que les roches sont plus basiques, donc plus sensibles à l'altération biochimique. On verra, à cet égard, en annexe, les exemples des sols sur dômite (Sarcoui, Puy de Dôme, Bruyère aux Moines, Tenusset), des sols sur andésite (Souis), sur basalte (Puy de Mercoeur, Puy Mey, Puy de la Taupe).

- Etat vitreux et divisé

Il n'est pas possible de séparer l'influence de ces deux facteurs, et il est très difficile de trouver des stations permettant d'en estimer l'influence indépendamment de l'âge des matériaux et de la durée de la pédogénèse. Nous ne retiendrons donc que l'exemple des éléments volcaniques massifs et vitreux des pépérites de Limagne, qui ne s'altèrent guère, ou celui des fines projections des nuées ardentes dômiques qui s'altèrent beaucoup moins que les projections basaltiques plus grossières.

Age des matériaux : Lorsqu'il se manifeste à l'échelle du million d'années, l'influence de ce facteur peut être importante dans la mesure où, comme dans le Cantal, le matériau soumis à la pédogénèse a déjà subi des cycles antérieurs d'altération. C'est certainement le cas à la Montagne de Serre. A l'échelle de la dizaine de milliers d'années, l'influence de ce facteur est plus difficilement décelable sur le terrain. Ceci peut être dû à ce que, pendant ce laps de temps, il n'intervient pas de transformations notables du matériau dans les conditions de surface. En tout cas, les andosols du Puy Beaunit, au nord de la Chaîne (N° 869-870), qui aurait donc un âge de l'ordre de 10 à 20 000 ans, ne sont pas différents de ceux du sud de la Chaîne, sur des matériaux vieux de 4 à 6000 ans.

Durée de la pédogénèse : Le dernier exemple aurait tout aussi bien pu être rattaché à l'influence de ce facteur. Il est évident que pour former les grandes quantités d'argiles des deux sols bruns d'Olby et de Pontgibaud, il a fallu beaucoup plus de temps que pour en former dix fois moins à St-Amant. En fait, la pédogénèse de ce dernier sol a duré un temps très court par rapport à l'âge de la coulée. Car, en fait, la durée de la pédogénèse est presque toujours fonction du dernier événement qui a provoqué l'érosion du sol précédent et un nouveau départ de la pédogénèse. Aussi, cette durée est très variable et difficile à estimer avec précision. Une des caractéristiques de l'andosolisation étant sa rapidité, ce facteur est particulièrement important et son influence très sensible.

1.4.- Discussion

Nous limiterons ici la discussion aux enseignements obtenus par l'étude écologique de la seule Chaîne des Puys. Nous reprendrons à un niveau plus général, l'interprétation des facteurs de l'andosolisation en tenant compte de toutes les données provenant des études de terrain et de la littérature.

Les facteurs de l'andosolisation sont en grande partie les mêmes que ceux qui déterminent la répartition cartographique.

Les conditions pédoclimatiques comportant à la fois l'humidité permanente et le bon drainage, restent déterminantes. Mais dans la Chaîne des Puys, ce type de pédoclimat correspond moins à une zone altitudinale homogène qu'à des facteurs purement stationnels tels que l'exposition des versants (Puy Beaunit 869-870) ou les aléas du déboisement. Nous ajoutons "bon drainage", car dans les fonds des cratères fermés (Puy des Goules n° 738), les sols sont plus argileux et moins andiques que sur les crêtes (Puy des Goules n° 739).

Les caractères physiques et chimiques des roches-mères sont également très importants. Les andosols les plus typiques se développent à partir des basaltes les plus basiques. Pour atteindre un degré équivalent d'andosolisation sur trachyte, il faut imposer à ce matériau les conditions climatiques beaucoup plus sévères de l'étage pseudo-alpin dont le pédoclimax est le ranker cryptopodzolique.

L'état microdivisé et éventuellement vitreux facilite le processus d'andosolisation, mais ne suffit pas à le provoquer. Ces deux facteurs sont inséparables car, dans la nature, les faciès à la fois massifs et vitreux n'existent qu'à l'état de filons qui sont d'ailleurs très durs et peu altérables. Les matériaux les plus vitreux, susceptibles de donner naissance à des sols, sont en même temps les plus divisés. Il n'est donc pas possible de trouver des conditions naturelles permettant de dire avec TRICHET (1968) que "toutes choses égales d'ailleurs", les matériaux vitreux sont plus altérables que les matériaux cristallisés.

Pour résumer en deux phrases l'influence combinée de ces deux premiers facteurs, nous pouvons dire que les conditions pédoclimatiques nécessaires à l'andosolisation doivent être d'autant plus rigoureuses que l'altérabilité de la roche-mère est faible. Lorsque cette altération s'effectue par l'action de solutions organiques en climat tempéré, elle dépend au premier chef de l'abondance des minéraux calciques et ferro-magnésiens, puis de l'état de division, et enfin, éventuellement, de l'état cristallin.

Le facteur temps : l'étude de ce facteur nous a montré qu'il fallait dissocier l'influence de l'âge du matériau de celui de la durée de la pédogénèse. L'âge du matériau n'a d'importance que dans la mesure où interviennent des transformations intrinsèques qui se répercutent ensuite sur l'évolution du sol. Les données chronologiques assez nombreuses connues dans la Chaîne des Puys, nous ont permis d'introduire la notion de degré d'andosolisation en fonction du temps. L'évolution est faible en moins de 1500 ans (Puy Mey). Elle atteint sa plénitude entre 4 et 6000 ans. Nous n'avons pas de données déterminantes dans la Chaîne des Puys, sur le temps que peut durer cet état d'équilibre au degré d'andosolisation maximum.

En conclusion, l'étude de l'écologie des andosols dans la Chaîne des Puys nous a fourni des éléments importants :

- la sélection de profils types : andosol du Mercoeur
sol andopodzolique du Puy de Dôme
sol brun de Pontgibaud

Ceci a été fait après avoir pris connaissance de l'ensemble des conditions régionales de la pédogénèse. De cette étude d'ensemble, nous avons également pu tirer des enseignements sur l'influence des trois principaux facteurs de l'andosolisation

- le pédoclimat des stations constamment humides
- les caractères d'altérabilité de la roche-mère basique et divisée
- le temps d'évolution.

La chronologie des formations volcaniques récentes de la Chaîne des Puys étant assez bien connue, nous avons pu, en y ajoutant nos propres résultats, avoir une première idée de la vitesse de l'andosolisation en climat tempéré (4 à 6000 ans).

2.- LES MONTS DORE

Ce massif est géologiquement très complexe car, aux parties anciennes qui sont organisées un peu comme dans le Cantal, en coulées rayonnantes autour d'une caldeira centrale (BROUSSE, 1960), s'ajoutent des appareils volcaniques récents. Ces appareils sont généralement de petite taille, étant donné des coulées de puissance réduite, mais leurs projections ont dû contaminer assez fréquemment les sols des formations anciennes.

Pensant que cette complexité risquait de nuire à l'étude de l'écologie des andosols, nous n'avons pas prospecté systématiquement ce massif. Mais en le traversant de nombreuses fois, nous avons pu faire quelques observations qui confirment celles du Cantal et de la Chaîne des Puys.

2.1.- Effet de l'érosion glaciaire

Au nord de la Banne d'Ordanche, s'étendent deux plaines parallèles, l'une constituée d'ordanchite, l'autre de basalte demi-deuil. Ces deux roches étant de faciès tellement différent qu'il est impossible de les confondre, il nous a été facile de constater que les cailloutis ou les blocs glaciaires qui recouvrent les deux coulées sont autochtones et que l'action de l'érosion glaciaire s'est exercée sur place, sans mélanger les formations. L'analyse de ces deux sols est donnée en annexe (N° 586 et 587).

2.2.- Séquence altitudinale sur roche acide

Les laves acides sont assez abondantes dans le massif. Nous avons pu observer partiellement la séquence altitudinale des sols de sancyite près du Col de la Croix Ste Robert. Au col même, à 1470 m, le sol est ocre podzolique (n° 492), mais plus bas, on passe rapidement à des sols bruns acides. Malheureusement, nous n'avons pas pu aller voir le "podzol" décrit par LEMEE en 1942 sur les trachytes du Col de Couhay.

2.3.- Le sol podzolique sur rhyolites de Lusclade

Les affleurements de rhyolites susceptibles de donner naissance à des sols sont très rares dans le Massif Central. Les émissions rhyolitiques appartenant aux phases initiales du volcanisme, elles apparaissent à la base des séries de lave. C'est également le cas des rhyolites de Lusclade qui affleurent entre les deux villes de La Bourboule et du Mont Dore. L'affleurement principal exploité en carrière, est recouvert de colluviums divers. Par contre, le petit ruisseau qui suit la route menant à Lusclade a dégagé une croupe dont l'extrémité n'est pas susceptible de recevoir de matériaux allochtones.

Cette croupe est actuellement recouverte par une hêtraie chétive à Vaccinium et mousses acidiphiles faisant place à la Callune dans les clairières. On y trouve des profils de sols ocres podzoliques à podzoliques (n° 1234 - sol type) selon l'importance de l'horizon A₂. La roche-mère très vitreuse à l'origine est plus ou moins dévitrifiée selon les endroits en cristoballite et sanidine. Elle est très pauvre en fer, ce qui explique aussi que l'évolution podzolique y soit aussi poussée. C'est pourquoi nous avons utilisé ce profil comme type d'évolution podzolique sur matériau volcanique pour en étudier l'évolution minéralogique et le bilan de l'altération.

3.- LE CANTAL

3.1.- Généralités

a) Situation géographique (Planche I₄)

La région étudiée aux alentours de Menet forme une bande de 4 à 5000 hectares, allongée vers le nord-ouest depuis les hauteurs du Suc du Rond (1580 m) au nord du Puy Mary, passant par les planèzes de Riom es Montagne et de Trizac, jusqu'au Bassin de Saignes, non loin de la Vallée de la Dordogne.

b) Données géologiques, lithologiques et géomorphologie (Planche I_{4bis}, figure 1).

Les données utiles à l'interprétation pédologique concernent surtout la nature et l'âge des formations, ainsi que les transformations subies après leur mise en place. Aussi, nous nous contenterons de rappeler que le Massif du Cantal constitue un ensemble volcanique très important, tant par sa surface que par le volume et la diversité des produits émis. Il comporte une grande caldeira centrale dont le diamètre dépasse 10 km, et à l'intérieur de laquelle affleurent des formations variées dont les plus importantes sont des brèches andésitiques volcano-sédimentaires (VATIN-PERRIGNON, 1966).

A l'extérieur de la caldeira, on trouve essentiellement d'anciennes coulées qui rayonnent dans toutes les directions et qui forment les actuelles planèzes séparées par de nombreuses vallées glaciaires. Les plus anciennes de ces coulées datent du miocène, mais la plupart de celles qui affleurent actuellement sont d'âge quaternaire ancien (après le Villafranchien) ou moyen (avant le Würm). Toutes ces coulées forment, pétrographiquement, une série de basaltes que l'on peut classer (LAMBERT, 1969) d'une part en fonction de leur teneur en minéraux ferro-magnésiens et en oxydes (indice de coloration), et d'autre part, de la présence de feldspathoïdes ou d'analcime (série saturée ou sous-saturée). Dans la topographie actuelle, ce sont les ankaramites, basaltes mélanocrates calcosodiques qui constituent les plus grandes surfaces.

Les intrusions acides qui affleurent surtout à la périphérie ou à la base des coulées basaltiques, sont de nature phonolitiques et trachytiques. Les phonolites sont des roches aphanitiques et dures qui s'altèrent très peu. Les dômes ou les dômes coulées (VARET, 1967) de phonolites forment actuellement des falaises ou des reliefs importants (Peyregrosse, Bois d'Aldis). Les trachytes, très leucocrates, riches en phénocristaux, s'altèrent plus facilement en donnant un peu d'arène à partir des dômes de forme bien caractéristique (Menoyre, Augoules par exemple).

On trouvera à la figure 1, une coupe schématique qui rassemble toutes les unités géologiques de la région étudiée.

L'action glaciaire détermine les grands traits géomorphologiques de la région. Il est regrettable qu'elle soit encore mal connue, car les remaniements glaciaires conditionnent étroitement l'évolution ultérieure des sols. Il est établi (VARET, 1967 ; VUITTENEZ, 1964) qu'au quaternaire ancien, tout le secteur des planèzes a été recouvert d'une énorme calotte

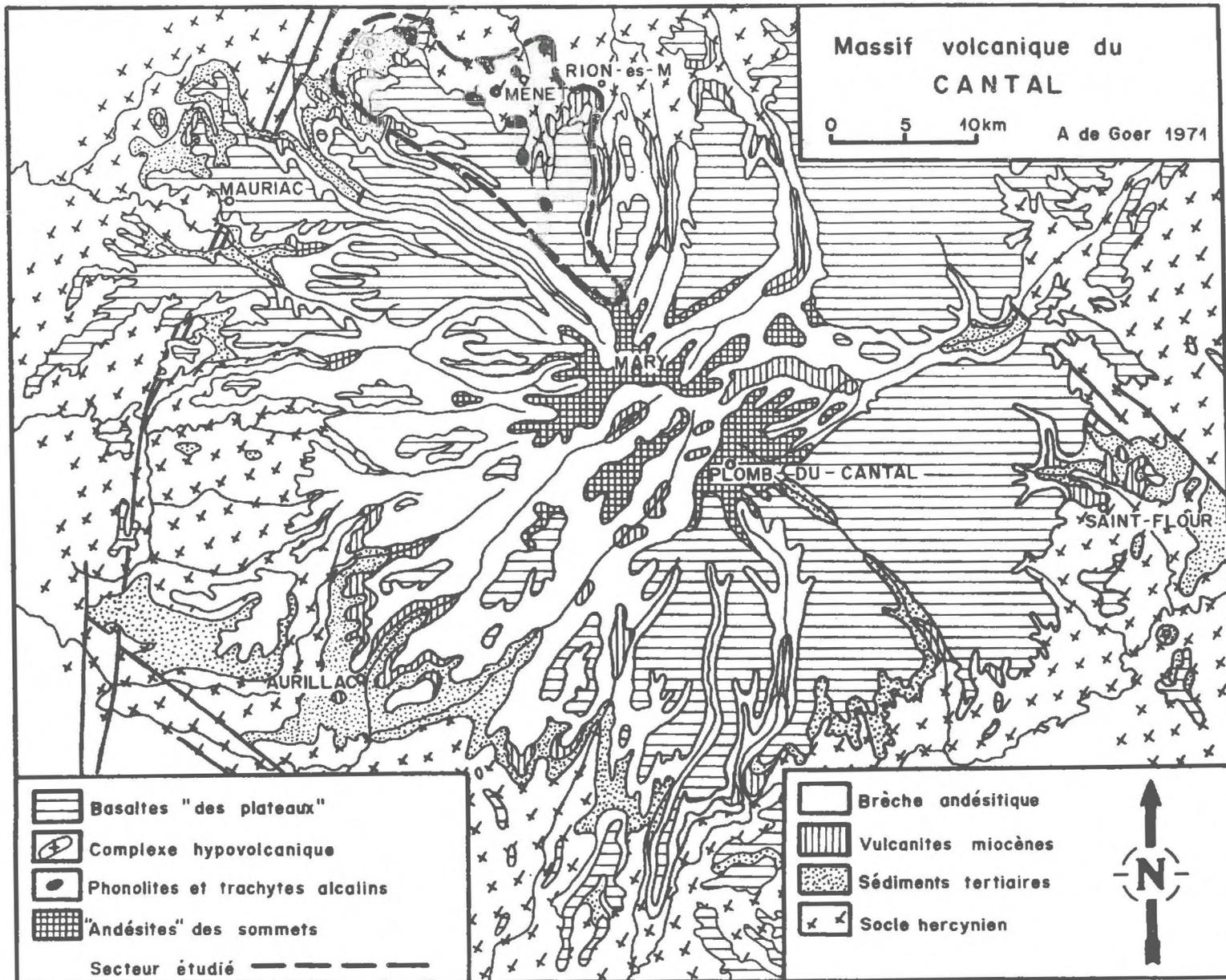


PLANCHE 14

glaciaire (600 m d'épaisseur). Les dernières émissions basaltiques ont sans doute eu lieu entre la disparition de cette calotte glaciaire et la glaciation wurmienne. Les dernières manifestations glaciaires n'ont donné que des glaciers de vallées entre lesquels les planètes devaient être soumises à un régime climatique périglaciaire. Ce régime a dû provoquer l'érosion et l'évacuation de la plus grande partie des couches scoriacées superficielles des coulées. En effet, on ne trouve, à la base des profils que des éléments de roche massive ou scoriacée, usés et arrondis dont la plupart correspondent à la coulée sous-jacente. Ce fait est très important pour l'interprétation de la pédogénèse. Il se reproduit de façon très générale, aussi bien dans le Cantal que dans les Monts Dorés, comme par exemple au nord de la Banne d'Ordanche, sur les deux coulées de basalte demi-deuil et d'ordanchite.

Ce phénomène d'érosion glaciaire sur place, ou avec des transferts très limités, explique que l'on ne trouve jamais d'éléments basaltiques sur les pointements phonolitiques contournés par les coulées. Par contre, les projections aériennes qui ont dû les recouvrir plus ou moins à certaines époques, n'existent plus. Ceci semble indiquer que la surface actuelle résulte de cycles d'érosion au cours desquels ces produits fins ont été complètement évacués des planètes avant que ne commence la pédogénèse qui a abouti aux sols actuels. Ce fait explique aussi que le modèle des coulées apparaît bien sur les photographies aériennes.

c) Données climatiques (Planche I_{4bis}, figure 2)

Dans l'ensemble, le climat des parties ouest du Cantal est assez doux et humide. L'isotherme + 5° des températures moyennes annuelles se situe à une altitude d'environ 1200 m et les précipitations annuelles varient entre 1 et 2 m.

Un autre caractère du climat de cette région est sa très grande variabilité. C'est ainsi que les vallées ouvertes vers l'ouest et les planètes qui les séparent, peuvent recevoir des précipitations deux fois plus abondantes que les vallées d'orientation est ou même nord-est (Aurillac, 1700 mm, Murat, 950 m, Trizac, 1700 mm, Cheylade, 1000 mm). Cette variabilité concerne aussi les chutes de neige qui représentent 20 % des précipitations à 900 m et 40 % à 1500 m. A partir de 1200 m, la durée de l'enneigement dépasse généralement trois mois consécutifs.

Dans le secteur étudié, nous avons cherché à définir le plus précisément possible des zones climatiques, en fonction de l'altitude et de l'exposition. Pour cela, à partir des données des stations les plus proches (ESTIENNE, 1956 ; BALSEINTE, 1966, Service de Production Hydraulique de l'E.D.F.), nous avons procédé à des extrapolations valables localement, en utilisant, comme l'avait fait OSWALD (1969), la courbe des gradients de température en fonction de l'altitude établie par DAGET en 1967 pour le Massif Central. Pour les précipitations, nous avons utilisé le gradient conventionnel de 100 mm par 100 m d'altitude, qui donne une estimation par défaut pour les versants ouest, et par excès pour les versants est.

Quatre zones climatiques ont ainsi été caractérisées, pour lesquelles nous avons calculé les valeurs d'ETP selon la méthode de TURC et al. (1963) : I. Suc du Rond, II. Trizac, III. Espinasse ; IV. Saignes. Sur les courbes climatiques ainsi établies (figure 2) nous voyons que dans les stations I (Suc du Rond) et II (Plateau de Trizac), les sols ne se

PLANCHE I₄bis

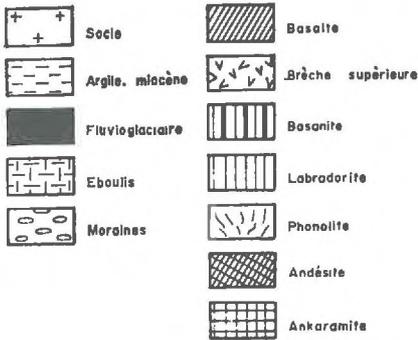
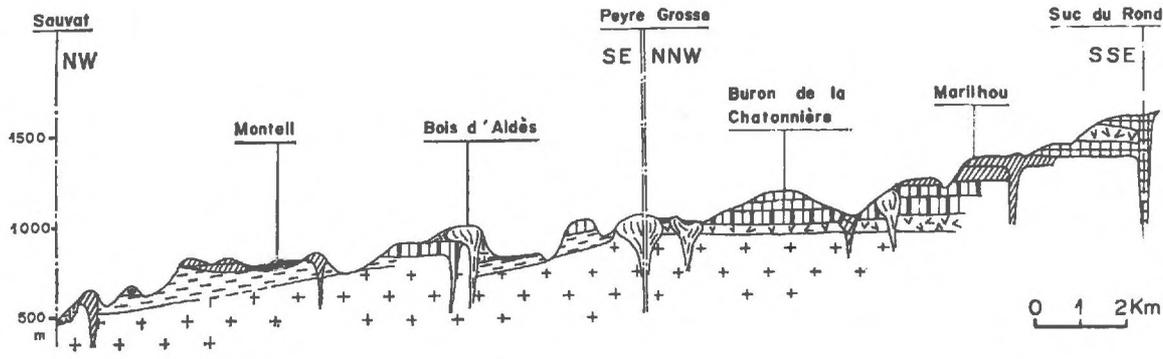


Figure 1.- Coupe schématique de la région étudiée

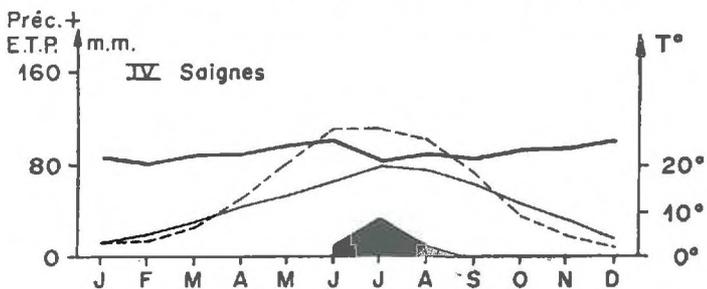
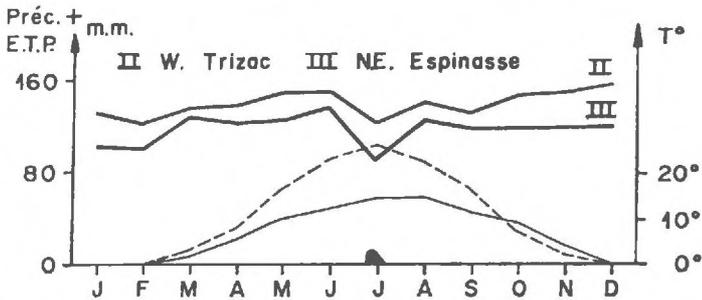
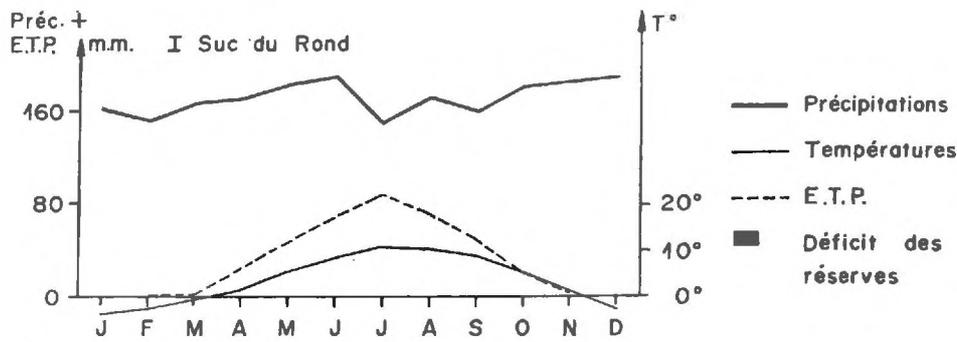


Figure 2.- Données climatiques

dessèchent théoriquement jamais, alors que sur la planèze de Riom, des dessiccations peuvent intervenir en été, même au-delà de 1200 m. Ces observations de terrain faites en juillet et en août, concordent remarquablement bien avec ces données climatiques.

d) Végétation actuelle

On trouvera dans l'ouvrage bibliographique de SALANON (1970), une revue des travaux botaniques, paléobotaniques et phytogéographiques effectués en Auvergne, parmi lesquels les nombreuses études de LEMEE sont particulièrement importantes pour l'histoire des sols et de la végétation. En dehors d'une étude limitée au versant sud du Plomb du Cantal (LALANDE, 1960), il semble qu'on en soit réduit à transposer les travaux phytosociologiques effectués dans les Monts Dore.

Par ailleurs, nous avons aussi consulté la carte de la végétation (DUPIAS et LAVERGNE, 1966) qui nous donne les définitions des étages de végétation rencontrés :

- Etage atlantique

Au-dessous de 700 m d'altitude (zone IV), la région appartient à la série du Chêne sessile. On y trouve des chênaies à sous-étage de Hêtre, ainsi que des landes à sarothamnes, bruyères, callunes et fougères aigles, sur les sols les plus acides. Sur basalte, la végétation est adaptée à des sols plus secs et plus riches en bases.

- Etage montagnard

Représenté par la série du Hêtre dans la région étudiée, dont la plus grande partie est en fait occupée par des prairies pâturées dans lesquelles apparaissent le Nard et la Gentiane jaune à partir de 1100 m. La Hêtraie, de plus en plus chétive lorsqu'on s'approche de la limite altitudinale de la forêt climacique, ne subsiste plus que sur les flancs des ravins ou les chaos de blocs phonolitiques, comme le bois de Cournil, qui n'ont sans doute jamais été défrichés.

- Etage subalpin

La pelouse subalpine où les Ericacées deviennent très abondantes, parfois même dominantes au-delà de 1400 m, est un peu plus étendue que ne l'indique la carte de la végétation qui en fixe la limite à 1500 m, ce qui est probablement le cas au sud et à l'est du massif, mais pas sur le versant ouest, exposé aux vents dominants. Mais nous touchons là au problème de la limite des arbres et de l'histoire de la végétation, qui fait l'objet du paragraphe suivant.

e) Histoire de la végétation et âge des sols du Cantal

La nature de la végétation et la durée de la pédogénèse sont des facteurs dont il faudra tenir compte au niveau de l'interprétation de l'andosolisation. Les données palynologiques et radiochronologiques établies par GUILLET apportent sur ces points, des renseignements indispensables.

α) La limite des arbres (palynologie) (Planche I5)

La limite climacique des arbres est variable selon les régions mais elle ne correspond pas toujours exactement avec celle des rankers cryptopodzoliques (NYS, 1973) qui est en principe le pédoclimax de la pelouse pseudo-alpine. Les sols pseudo-alpins sont composés d'un horizon humifère en général très foncé ou noir, reposant directement sur la roche-mère altérée (profil AC). Les autres profils présentent un horizon intermédiaire de couleur généralement brune ou ocre (profil A(B)C). Dans la mesure où il y a coïncidence entre la limite des arbres et la limite des sols à horizon (B), il est tentant d'attribuer la formation de cet horizon intermédiaire à la présence des racines d'arbres dont l'action est bien différente de celle des racines de graminées et des plantes herbacées de la pelouse subalpine. Pour vérifier cette hypothèse, deux diagrammes polliniques ont été établis et interprétés par GUILLET, l'un sur le profil du sommet du Suc du Rond (fig. 1) (1580 m - N° 723) et l'autre à la Montagne de Marlieux (profil type n° 589, 1180 m) (Fig. 2).

Au Suc du Rond, le diagramme pollinique révèle la permanence de la pelouse pseudo-alpine à graminées depuis plus de 5000 ans (présence dans le fond du profil de pollens attestant la présence régionale, mais non locale, de tilleuls et d'ormes).

A la Montagne de Marlieux, le diagramme met en évidence deux phases distinctes. La plus ancienne est d'âge subboréale (5000 à 3000 ans environ) et correspond à l'existence d'une forêt clairsemée de tilleuls et de coudriers avec de nombreuses fougères (*Dryopteris*) montagnardes. Cette forêt est remplacée, à la fin du subboréal, par une pelouse à graminées et à éricacées qui subsiste encore actuellement.

Donc, s'il est établi que, dans ce laps de temps, ni la hêtraie actuelle, ni la forêt qui l'a précédé n'ont occupé le Suc du Rond, par contre, la disparition des espèces forestières de la planèze au niveau de la Montagne de Marlieux est certainement due aux déboisements effectués par l'homme au cours des trois derniers millénaires.

Ces derniers résultats confirment tout à fait les études antérieures faites sur les tourbières du Cantal (DUBOIS et al., 1944, LEMEE, 1956) ou les Monts Dorés (LEMEE, 1946), ainsi que sur les sols pseudo-alpins (CARBIENER, 1963).

β) Les mesures radiochronologiques

La matière organique totale de trois horizons du sol type de la Montagne de Marlieux a fait l'objet d'une mesure d'âge apparent. Les résultats sont mentionnés dans le tableau ci-contre. Du point de vue de l'évolution des composés organiques, ils seront rediscutés plus loin. Pour l'instant, nous nous contenterons de faire un rapprochement entre l'âge apparent de l'horizon de profondeur et les données palynologiques. Les pollens les plus anciens (Orme, Tilleul) sont à peu près contemporains de l'ensemble de la matière organique de l'horizon. Il est possible qu'ils soient un peu plus vieux parce que plus résistants que les composés humifiés. Mais, compte tenu de la structure du complexe organo-minéral, il n'est pas absurde de penser qu'ils y sont inclus, et de ce fait protégés des éventuelles dégradations microbiennes par les dépôts qui les recouvrent.

Temps Moyen de Résidence du carbone total : Montagne de Marlieux n° 1236

Hor.	Prof.	C%	T.M.R. ou âge apparent B.P.
A ₁	15-25	12,4	650 ± 70
(B) ₁	40-50	7,3	3190 ± 90
(B) ₂	60-75	6	3910 ± 90

3.2.- Répartition des différents types de sols

Cette répartition est illustrée par une carte schématique (Planche I₆) dans laquelle on pourrait restreindre la surface de l'unité Andosol en fonction de la valeur limite du rapport amorphe/argile défini plus haut.

A part cette correction de détail, l'ensemble de la carte fait ressortir valablement les traits essentiels de la répartition des sols de ce secteur.

Au-dessous du domaine pseudo-alpin des andosols humiques du Suc du Rond, dans le domaine des planèzes basaltiques, au sud d'une ligne Riom-Trizac, on trouve toujours la même chaîne de sols comportant, de haut en bas, des andosols, des sols bruns andiques et des sols hydromorphes ou des tourbières. En position sommitale, les sols sont plus humifères, surtout au-delà de 1300 m. Dans ce même domaine, les affleurements de phonolites (Bois de Cournil) portent des sols squelettiques, sans doute à cause de la faible altérabilité du matériau, mais aussi de l'occupation humaine ancienne et de l'exploitation de l'affleurement pour la construction locale (lauzes).

A une altitude plus basse, l'évolution andosolique des sols basaltiques est moindre mais bien nette en haut de pente jusqu'à 900 m. Dans cette zone, sur les roches acides phonolites (N° 592 Peyregrosse) et surtout trachytes (n° 588 Augoules), l'évolution podzolique est bien nette.

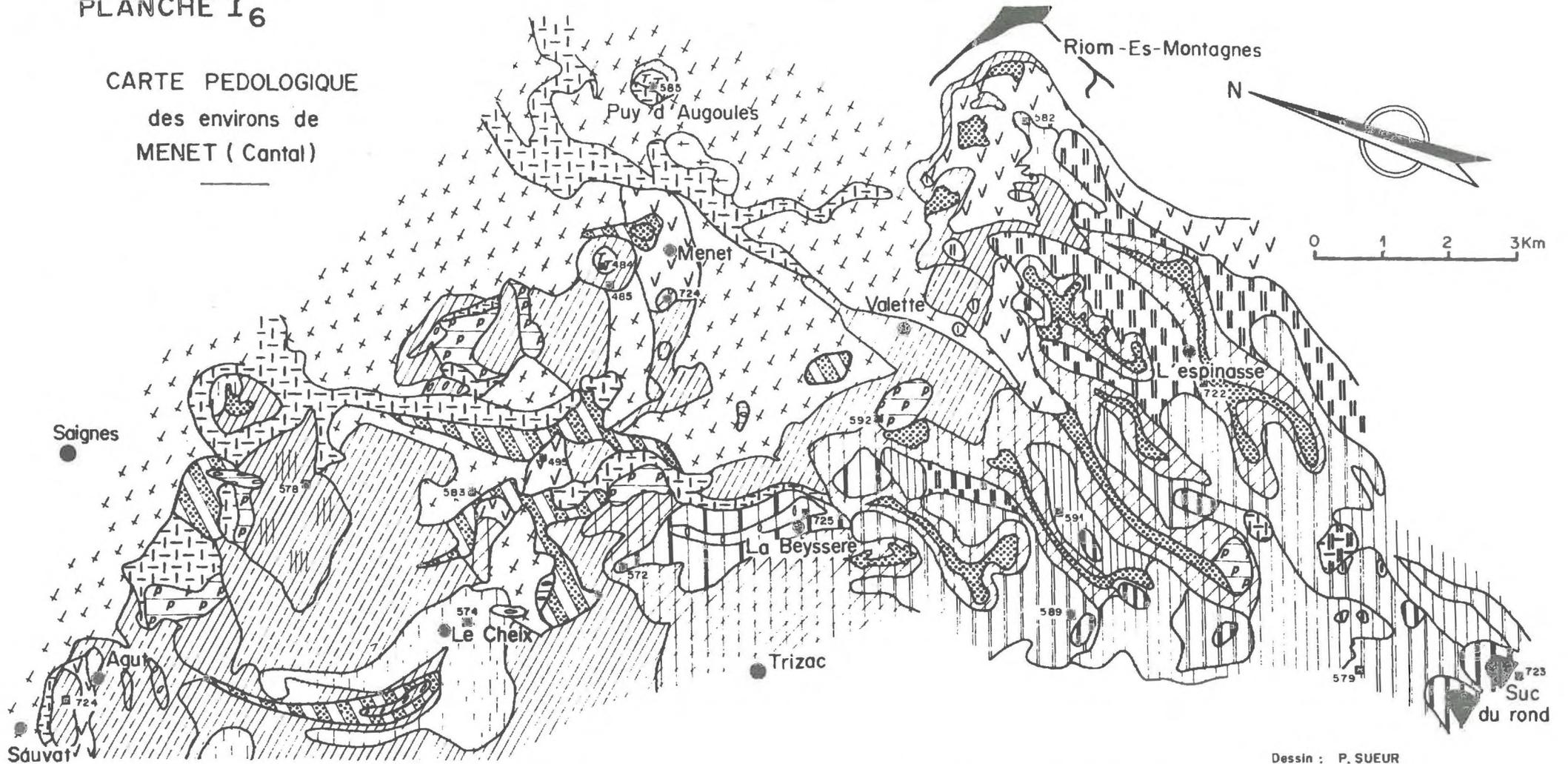
Plus bas encore, à peu près tous les sols sont des sols bruns acides quelle que soit la roche-mère. Enfin, sur les basaltes les plus anciens et sous le régime des climats assez secs et contrastés des vallées, on peut même trouver des sols bruns calciques sur basalte (n° 724 Agut).

3.3.- Discussion sur les facteurs de l'andosolisation dans le Cantal

Avant de passer en revue les facteurs écologiques de l'andosolisation dans cette région du Cantal, nous devons revenir sur un point abordé à propos de l'histoire géomorphologique de la région. Par des observations diverses, nous en sommes arrivés à considérer que les sols étaient en majeure partie formés à partir de matériaux autochtones. Si les matériaux fins au sein desquels on trouve quelques blocs erratiques provenaient du colluvionnement, il y aurait une grande homogénéité des sols au niveau de la famille sur toutes les planèzes, ce qui n'est pas le cas, l'aspect du sol changeant dès qu'on change de coulée. Par ailleurs, la composition minéralogique des sables ne serait pas la même que celle de la roche-mère et nous avons vérifié qu'ils étaient en majorité formés à partir d'élé-

PLANCHE I₆

CARTE PEDOLOGIQUE des environs de MENET (Cantal)



Dessin : P. SUEUR

	Lithosols et sols bruns à blocs		Série des sols podzolisés		Série des sols bruns		Sols bruns / fluvioglacière et argile miocène		Série des sols andiques et andosols		Andisol / basaltite		Andisol - ankaramite
	Tourbe		Sols bruns acrés / socle		Sols bruns / socle		Sols bruns / moraines		Andosol / moraines		Andisol / basaltite		Sol andique ankaramite
	Sols hydromorphes		Sols bruns acrés / trachyte		Sols bruns / brèche V.S.		Sols bruns / lave		Sol andique / moraine / ankaramite ou basaltite ou labradorite		Sol andique / basaltite		
			Sols acrés andiques / phanolite		Sols bruns / lave		Sols bruns andiques / lave		Andisol / labradorite				Prélèvement

ments autochtones remaniés sur place par l'action glaciaire.

Facteurs de l'andosolisation dans le Cantal

Le degré d'andosolisation et la répartition des sols de cette région dépendent en définitive de l'abondance respective du complexe organo-minéral amorphe et des argiles cristallisées.

- C'est pourquoi, le facteur principal est le pédoclimat froid et humide des stations, caractérisées par l'absence de dessiccation.

- En second lieu, nous citerons l'acidité de la roche-mère qui, dans le cas des roches massives, limite l'intensité de l'altération. Dans le secteur étudié, il n'existe pas d'affleurement de roches acides dans les conditions pédoclimatiques très sévères des plus hauts sommets. Mais nous savons par ailleurs, qu'au Mont Mezenc, la phonolite parvient à un degré d'andosolisation comparable à celui d'un matériau basaltique.

- Puis, nous citerons le facteur "position topographique", car les andosols sont, semble-t-il, des sols de haut de pente ; le colluvionnement et l'enrichissement latéral en bases semblent favoriser la brunification.

- Enfin, le facteur temps n'est pas limitant dans cette région. En effet, si l'on situe le début de la pédogénèse des sols actuels à 10 ou 12 000 ans, les composés organiques les plus anciens n'ayant guère plus de 4000 ans, il semble bien que ces sols soient dans une phase de leur évolution correspondant à un équilibre établi depuis longtemps. Si on en juge par le temps moyen de résidence relativement court (650 ans) du carbone dans l'horizon de surface, ces sols doivent être en fin d'évolution andosolique et aborder une deuxième phase pédogénétique qui sera ici la brunification. Ces deux phases d'évolution ne sont peut-être pas, d'ailleurs, spécifiques aux andosols du Cantal, car il est bien possible que l'andosolisation ait correspondu aux conditions climatiques plus sévères du Tardiglaciaire comme cela semble être le cas pour certains sols granitiques (WAREMBOURG et al., 1973).

3.4.- Conclusions

Nous pouvons résumer l'essentiel des enseignements tirés de l'étude de ce secteur du Cantal de la façon suivante :

Lorsque les conditions pédoclimatiques (humidité permanente) favorisent l'altération intense de minéraux fragiles (laves basiques) sous l'influence de solutions de composés organiques en voie d'humification, il se forme un complexe organo-minéral abondant et stable qui confère à ces sols la plupart des propriétés des andosols.

Toutefois, deux facteurs contribuent à rapprocher les sols du Cantal des sols bruns : tout d'abord, les cycles d'altération antérieurs à la glaciation würmienne ont provoqué la synthèse de minéraux secondaires au sein même des roches-mères et les sols actuels ont hérité d'un stock d'argile (6 % dans la roche-mère de Marlieux) qu'il serait faux d'attribuer à la pédogénèse actuelle. D'autre part, sur ces sols très anciens, il existe une incontestable tendance à la brunification des horizons de surface qui se traduit minéralogiquement par une accélération de l'argilisation. Cette brunification, qui est le terme normal de l'évolution pédoclimacique sur ce type de roche, a sans doute été accélérée dans le Cantal par les déboisements qui favorisent la dessiccation estivale des horizons de surface.

III.- DONNEES DE TERRAIN DIVERSES

L'interprétation des résultats des deux études écologiques principales nécessite des comparaisons, d'une part avec les autres groupes de sols des régions tempérées voisines, d'autre part avec les andosols des autres régions du monde.

C'est pourquoi, avant d'aborder l'interprétation générale, nous devons encore faire état des données personnels ou bibliographiques qui nous ont servi dans ce travail.

1.- REGION TEMPEREE

1.1.- Sols non volcaniques

Les sols analogues des andosols en climat tempéré sont les sols humifères des étages montagnards et subalpins sur roches plutoniques et métamorphiques. Ces sols sont assez bien connus dans les Vosges (SOUCHIER, 1971) et dans les régions périphériques du Massif Central (BRETHES, 1973 ; DEJOU, 1968-1972) à des altitudes inférieures à 1000 m. Les sols situés à des altitudes supérieures n'avaient pas été très étudiés (DAGET, 1967 ; LE TACON et OSWALD, 1969) jusqu'à ces dernières années (NYS, 1973 ; WAREMBOURG et al., 1973 ; LEGROS, 1974). En particulier, il apparaît assez clairement que la podzolisation est beaucoup moins accentuée que dans les Vosges. Aussi, nous nous sommes rendus sur la crête des Monts du Forez où nous avons prélevé deux sols.

Le premier est un ranker cryptopodzolique humifère sur granite porphyroïde leucocrate (n° 727), très désaturé et assez pauvre en éléments amorphes, mais très humifère.

Le second est un sol brun mélanisé sur diorite (n° 726), tout aussi désaturé, mais plus riche en argiles et en amorphes, et à peu près aussi humifère que le précédent. Ce second sol est le plus intéressant en ce qui concerne l'andosolisation. Cette diorite, dont la composition doit être voisine de celle d'une andésite, est beaucoup plus altérée que le granite voisin. Mais le complexe d'altération comporte beaucoup d'argile (16 % à 30 cm) et relativement peu de fer, d'aluminium et de silicium solubles dans le réactif O.D. Ce sol peut être rapproché de l'andosol humique (ranker andique) du Suc du Rond (n° 723) dans le Cantal. Le basalte du Suc du Rond étant très massif et peu vitreux, la différence doit surtout être attribuée à la richesse de l'arène dioritique en argiles de transformation.

1.2.- Les sols volcaniques des Vosges

L'étude des sols volcaniques des Vosges (DUCHAUFOR et SOUCHIER, 1966b; HETIER, 1968) avait permis de constater une certaine parenté entre les sols développés sur les diabases dévoniennes et surtout sur un basalte permien, avec un andosol du Massif Central.

Cette parenté était assez nette dans le cas du basalte pour que l'on puisse parler de sol brun andique dans une station de haut de pente très humide (700 m environ). Bien qu'assez riche en argile (15 à 20 %) ce sol a un complexe organo-minéral amorphe assez abondant ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 4 \text{ à } 8 \%$; rapport $\text{Am Si-Al/Argile} = 0,2 \text{ à } 0,5 \%$). Sur les versants et les bas de pente, on a des sols bruns normaux.

Dans le cas des diabases et des k eratophyres, les horizons d'alt eration s'apparentent plus aux horizons spodiques qu'à des horizons andiques, mise à part la texture limoneuse qui est ici due à des limons vrais, particules dont la petite taille est due à la structure microlitique de la roche-mère. Mais ces roches très indurées et silicifiées, sont très peu altérables.

Connaissant maintenant les conditions écologiques de l'andosolisation, nous savons qu'il aurait fallu que les affleurements basaltiques soient situés à plus de 1000 m d'altitude pour que s'y développent des andosols.

2.- REGION SUBTROPICALE : CANARIES

A l'occasion d'une courte mission aux Canaries effectuée à la demande du Professeur FERNANDEZ CALDAS, nous avons eu l'occasion de voir une chaîne de sols très complète sur les divers matériaux volcaniques de l' le de La Palma.

Dans cette  le, ces matériaux sont tous récents. Les conditions pédoclimatiques sont surtout régies par la permanence d'une couronne de nuages entre 1200 et 1700 m d'altitude et qui entretient l'humidité permanente du sol surtout dans la mesure où la couverture forestière n'a pas été supprimée.

Au-dessus de cette zone nuageuse, nous avons vu des sols assez peu évolués, à profil A-C. Puis vers le bas, on a des andosols bien caractérisés, avec un horizon (B) ocre, riche en amorphes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$ de la terre fine).

Au-dessous, apparaissent parfois des sols à croûte siliceuse* qui cimentent les cailloux de la roche-mère. Plus bas encore, sur les replats on a des sols vertiques auxquels font suite des sols à croûte calcaire. Enfin, au niveau de la mer, où le climat est presque désertique, on trouve des lithosols.

Cette zonation correspond à une véritable chromatographie des bases et de la silice libérées par l'altération.

3.- REGION TROPICALE : COLOMBIE

On pourrait rapprocher cette séquence canarienne d'une autre séquence sur matériel volcanique basique en Colombie (DUCHAUFOR, FAIVRE, 1973, communication personnelle) en climat très humide, qui comprend :

- Ranker   hydromor au-dessus de 3500 m
- Sol podzolique andique hydromorphe, 3100 m
- Stagnogley podzolique, 2700 m
- Andosol, 2500 m
- Sol andique (vitrique, ferrallitique, podzolique), 1500-2000 m
- Sol isohumique tropical, 1000 m
- Sol vertique lessivé, 700 m

Gr ce à des comparaisons multiples entre tous les types de séquences climatiques et altitudinales, nous pouvons arriver à mieux définir les conditions écologiques de l'andosolisation. C'est ce que nous allons faire maintenant, en replaçant nos propres résultats concernant les andosols du Massif Central français dans l'ensemble des travaux effectués sur les conditions de formation des andosols.

* Ces croûtes siliceuses blanches ne font pas effervescence à HCl et ont été déterminées comme telles au Laboratoire de Pédologie de Ténérife.

IV.- INTERPRETATION ET DISCUSSION DES DONNEES ECOLOGIQUES

Nous pouvons maintenant tenter de faire ressortir les caractères spécifiques de l'andosolisation en climat tempéré.

1.- Permanence de l'humidité

En l'absence des très fortes précipitations des climats tropicaux, et à cause d'une certaine sécheresse estivale, la permanence de l'humidité est assurée en climat tempéré dans les stations où l'évapotranspiration reste toujours faible. C'est le cas du régime climatique de l'étage pseudo-alpin et de l'étage montagnard, surtout sous couvert forestier, et aux expositions fraîches.

L'altitude minimale à partir de laquelle on pourra trouver des andosols, variera secondairement en fonction de l'altérabilité des roches-mères.

2.- Altérabilité des roches-mères

Les conditions climatiques étant modérées, l'influence des différents facteurs d'altérabilité des roches mères se fera sentir de façon plus nuancée que dans des conditions climatiques extrêmes.

C'est ainsi que la composition chimique des laves et projections volcaniques, qui est sous d'autres climats un facteur secondaire ou même négligeable, est ici une condition importante du degré et du style d'andosolisation. L'état de division extrême des projections aériennes et des scories accélère l'altération et favorise par là l'andosolisation. L'effet de l'état vitreux reste difficile à estimer, car il n'est pas indépendant de l'état de division.

3.- Age des matériaux

L'âge des matériaux ne nous paraît conditionner l'andosolisation que dans la mesure où, durant un laps de temps assez long, peuvent survenir des transformations minéralogiques des roches-mères susceptibles de changer le cours ultérieur de la pédogénèse. C'est par exemple le cas des altérations préglaciaires, qui ont donné aux matériaux du Cantal, le temps de se transformer partiellement en minéraux argileux.

4.- Durée de la pédogénèse

A partir des données chronologiques de la Chaîne des Puys, nous avons pu voir qu'une période de 4 à 5000 ans était nécessaire pour arriver au degré d'andosolisation maximum. Ce résultat est analogue à ce qu'ont observé les auteurs japonais qui disposent d'un très grand nombre de données. Mais cette durée est supérieure à ce que l'on observe dans les climats tropicaux (QUANTIN, 1974).

La période de stabilité au degré d'andosolisation maximum ne semble pas dépasser 2 à 3000 ans, car on voit apparaître une évolution, soit vers la brunification, soit vers la podzolisation sur les sols vieux de 8 à 12000 ans (Montagne de Marlieux et sol du Puy de Dôme). Ce phénomène a été récemment évoqué par MOINEREAU sous le terme de "désandosolisation".

5.- Evolution des composés organiques

Cette évolution est caractérisée par deux phases successives et relativement bien connues, et une troisième phase assez mal connue.

Dans les sols tempérés, la quantité de carbone accumulée est bien plus faible que dans les andosols japonais, d'après la courbe de WADA et AOMINE, qui ne prévoient pas de baisse du taux de carbone après que l'évolution ait dépassé le stade andosol. Comme il est possible qu'après le stade andosol, la quantité globale de carbone ne baisse pas sensiblement, nous pensons qu'il serait plus significatif d'exprimer l'évolution des temps moyens de résidence en fonction de l'âge du sol. On pourrait alors mieux distinguer une première phase au cours de laquelle le temps de résidence des composés humiques et l'âge des sols sont équivalents par rapport à une seconde phase où les temps moyens de résidence diminuent lentement, alors que l'âge du sol augmente. Au cours de la troisième phase, où s'amorce une nouvelle évolution (en général par brunification), les temps moyens de résidence deviennent beaucoup plus courts.

6.- Evolution des composés minéraux secondaires

Durant la première phase, les composés amorphes sont de plus en plus abondants et relativement très siliceux par rapport au fer et à l'alumine. Les argiles cristallisées apparaissent parallèlement mais en très petite quantité.

Durant la deuxième phase, se poursuit l'évacuation différentielle de la silice, dont aucun indice de terrain n'indique précisément le mécanisme. L'argilisation qui continue durant cette période, ne fournit toujours qu'une composante minoritaire du complexe d'altération.

Durant la troisième phase, les argiles tendent à devenir plus importantes que les hydroxydes de fer et d'aluminium auxquels restent liées de faibles quantités de silice.

CONCLUSIONS

L'andosolisation dans les régions tempérées est régie par les mêmes lois générales que sous les autres climats. C'est une évolution relativement rapide, qui se produit en conditions d'humidité permanente, sur des roches-mères que leurs caractères particuliers rendent très altérables.

Le caractère très général de ces facteurs de l'andosolisation permet de ne pas fonder leur classification sur une base climatique. Mais les particularités du climat donnent à l'application de ces règles générales, une coloration particulière. En climat tempéré, l'amplitude des phénomènes est modeste, qu'il s'agisse de

- l'accumulation du carbone
- la "durée de vie" des andosols
- l'intensité des phénomènes géochimiques et cristallographiques

Pour aller au-delà de ces simples constats qui, après les résultats apportés par l'étude analytique des constituants du sol, viennent à l'issue des observations écologiques des facteurs de l'andosolisation, il nous faut maintenant faire le bilan des points acquis et des hypothèses en suspens. C'est ce que nous ferons après avoir donné à toutes ces observations, une expression plus précise grâce à l'analyse factorielle par le calcul automatique qui fait mieux ressortir l'importance respective de tous les facteurs analysés à partir des études de terrain. Au terme de cette étude, nous ferons ce bilan et préciserons les points sur lesquels nous avons décidé de faire porter l'effort analytique et expérimental.

V.- RELATION ENTRE LES DONNEES DE TERRAIN ET LES ANALYSES DE CARACTERISATION

Après avoir analysé de façon classique nos observations de terrain, les analyses de caractérisation et les déterminations minéralogiques de la fraction inférieure à 2μ , nous avons voulu soumettre toutes ces données à un calcul statistique afin d'éprouver la validité de nos interprétations.

Le but de cette analyse est tout d'abord d'étudier les regroupements des paramètres écologiques, analytiques et minéralogiques utilisés, afin de voir d'une façon plus rationnelle si l'analyse permet de retrouver les facteurs de l'andosolisation dégagés par l'étude écologique.

De plus, l'analyse de la dispersion de l'ensemble des échantillons permet de hiérarchiser les facteurs obtenus.

D'une façon imagée, le principe de l'analyse factorielle effectuée consiste à étudier la représentation de la répartition des 45 échantillons choisis dans un espace à 16 dimensions (variables) que l'on simplifie en les regroupant en un nombre plus réduit de facteurs. Ceux-ci, pris deux à deux, définissent des plans qui permettent la représentation graphique par projection.

Ce type de calcul est couramment utilisé en informatique géologique (ISNARD et al., 1972), et a déjà été utilisé également, sous une forme un peu différente, pour la caractérisation des humus (BAUZON et al., 1974).

Pour des raisons pratiques, le nombre d'échantillons a été limité à 45 horizons représentant les 60 profils, soit 300 échantillons prélevés dans le Massif Central et les Vosges.

Les variables utilisables correspondent aux données chiffrables sur le plan :

- écologique : altitude, roche-mère
- analytique : matière organique, Complexe absorbant, complexe d'altération
- minéralogique : minéraux principaux de la fraction inférieure à 2μ

Les résultats seront analysés tout d'abord au niveau des facteurs obtenus, puis de la répartition des variables utilisées dans les plans définis par les principaux facteurs, et enfin, en examinant la répartition des échantillons dans ces mêmes plans.

1.- REMARQUES METHODOLOGIQUES

Le choix des variables a été limité à la liste reportée sur la planche I après quelques essais préliminaires.

En ce qui concerne la roche-mère, l'indice finalement retenu est la valeur du rapport

$$\frac{\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca}}{\text{K} + \text{Na}}$$

Chaque élément est exprimé en % cationique. Ces valeurs et cet indice reportés sur un diagramme en fonction de la teneur en silice, donnent une série continue dans laquelle on différencie assez bien la gamme de roches volcaniques étudiées. Il nous a semblé possible d'utiliser pour ce calcul, cet indice simple, établi en s'inspirant de travaux volcanologiques récents (De la ROCHE et al., 1973).

Les variables correspondant aux analyses courantes en pédologie, taux de carbone, azote total, capacité d'échange, taux de saturation, éléments amorphes, n'ont pas posé de problème particulier.

Nous verrons dans la discussion ce qu'il y a lieu de penser des regroupements qui se sont avérés nécessaires pour obtenir des résultats significatifs à partir des données semi-quantitatives obtenues grâce aux diagrammes Rayons X de la fraction inférieure à 2μ :

Regroupement des minéraux primaires : quartz, feldspath, illite, chlorite ;

Regroupement des "interstratifiés" avec le minéral de base à comportement de vermiculite ou de smectite.

2.- RESULTATS

2.1.- Facteurs obtenus

Cinq facteurs suffisent à expliquer 88 % de la variance totale.

Ces cinq facteurs seront envisagés par ordre d'importance décroissante (contribution à la variance).

Ces facteurs prennent, pour chaque échantillon, des valeurs positives ou négatives selon la nature des variables avec lesquelles ils sont les plus étroitement corrélés, positivement ou négativement. Dans le tableau ci-dessous, les numéros des variables corrélées avec chaque facteur sont rangés dans l'ordre des valeurs des coefficients de la matrice de corrélation (après rotation). Nous n'avons retenu que les éléments significatifs au seuil de 0,95, et souligné les éléments significatifs au seuil de 0,99.

Facteur	Contribution à la variance %	Variables corrélées	
		+	-
1	37	<u>8, 9, 10, 1, 4</u>	(11)*
2	20	<u>16, 7</u>	<u>5, 3, 4, 2, 1</u>
3	13	<u>12, 16</u>	<u>13</u>
4	11	<u>14, 1</u>	<u>15</u>
5	7	(1)*	<u>6, 11, 7</u>
	<hr/> 88		

* Significatif au seuil de 0,90

Le facteur 1 est positivement corrélé avec les variables représentant la matière organique : carbone (8), Azote (9), la capacité d'échange (10), l'altitude (1), et le taux d'alumine amorphe (4). Il est corrélé négativement (et un peu moins étroitement) avec le taux de saturation.

Le facteur 2 est positivement corrélé avec le taux d'argiles gonflantes (16), le taux d'argiles total (7), et négativement avec l'ensemble des éléments amorphes (Si = 5, Fe = 3, Al = 4), l'indice de "coloration-basacité" de la roche-mère (2) et l'altitude (1).

Le facteur 3 est corrélé positivement avec les argiles de néoformation (halloysite-metahalloysite (12), smectite (16)). La corrélacion est négative avec la teneur en kaolinite (13). L'opposition halloysite-kaolinite est sans doute exagérée par un artefact d'interprétation des diffractogrammes (tendance à attribuer la raie à 7,10 Å à l'halloysite ou à la kaolinite, plutôt que de mentionner les deux minéraux).

Le facteur 4 varie comme la teneur en minéraux primaires (illite, chlorite, feldspaths, quartz) et en sens inverse des valeurs attribuées aux argiles de type vermiculite (V + Inters. V, 15).

Le Facteur 5, qui est le moins significatif sur le plan de l'analyse statistique, correspond surtout au taux de saturation (11) et à la teneur globale en argile (7)

2.2.- Corrélacion des variables dans les différents plans (planche I₇)

A titre d'exemple, nous n'avons représenté la projection des variables que dans le plan des facteurs 1 et 2 (figure 1) qui sont les plus significatifs (57 % de la variance).

Seuls les points qui sont proches du cercle sont significatifs. Les points rapprochés sont corrélés positivement; diamétralement opposés, corrélés négativement ; en quadrature, non corrélés.

On voit donc que la teneur globale en éléments amorphes est bien corrélée avec l'indice de "coloration-basacité" de la roche-mère : Si (4), et Fe (3) sont dans ce plan plus proches de cet indice (2) que de Al (4). Ce dernier paramètre leur est bien sûr très lié, mais est tout de même plus "proche" des valeurs de matière organique (8, 9, 10) que les deux premiers.

2.3.- Répartition des échantillons dans les différents plans

Cette répartition ne fait apparaître des regroupements écologiquement significatifs que dans les plans de facteurs 1-2 et 2-5.

Dans le premier plan on voit un regroupement des sols bruns par rapport à tous les autres sols. Ce regroupement correspond à des valeurs positives du facteur 2 et négatives du facteur 1, c'est-à-dire que cet ensemble correspond aux sols :

Liste des variables

Ecologiques	{	ALT	1
	}	R.M.	2
Pédologiques	{	FE-AM	3
		AL-AM	4
		SI-AM	5
		SIT/SIS	6
		ARG.	7
		C	8
		C/N	9
Minéralogiques	{	T	10
		S/T	11
		HAL + METH	12
		KAOL	13
		HIV I	14
		V + INTV	15
		M + INTM	16
		AM/ARG	17

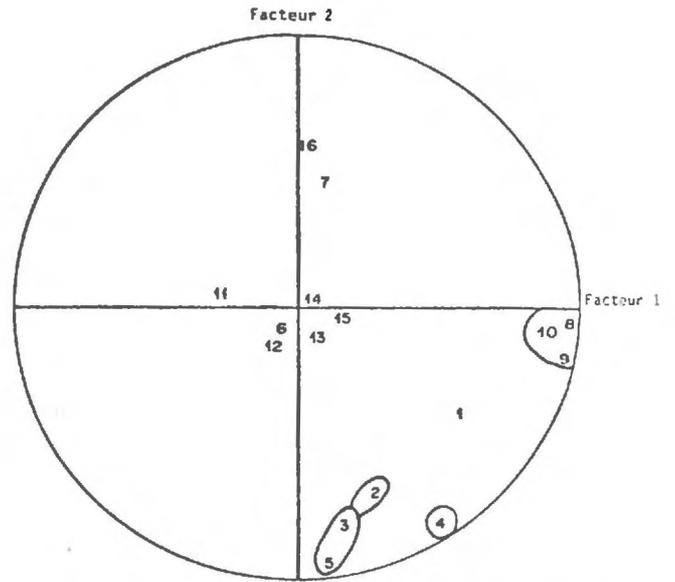


Figure 1.- Projection des variables dans le plan des facteurs 1 et 2

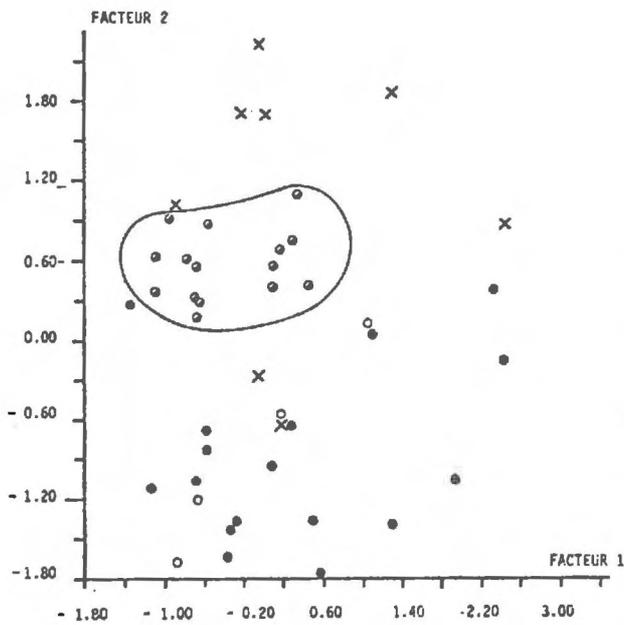


Figure 2.- Projection des échantillons dans le plan des facteurs 1 et 2

- SOLS BRUNS
- × SOLS PODZOLISÉS
- SOLS ANDIQUES
- ANDOSOLS

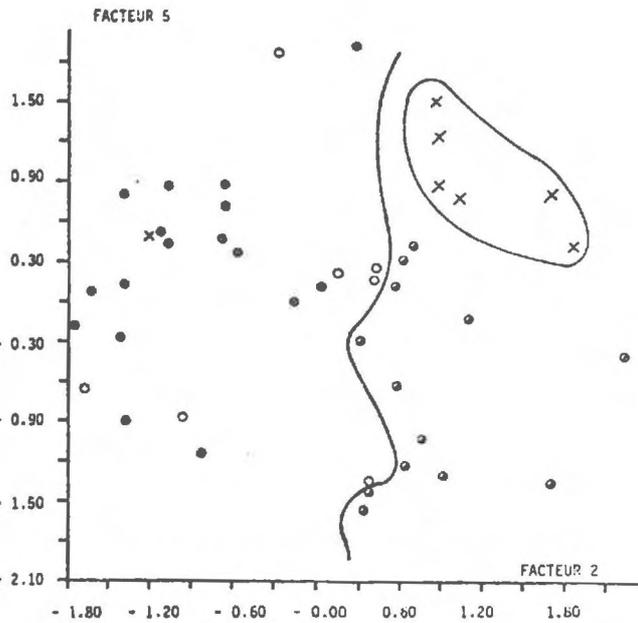


Figure 3.- Projection des échantillons dans le plan des facteurs 2 et 5

- | | | |
|-----------|---|--|
| Facteur 1 | } | <ul style="list-style-type: none"> - de faible altitude - pauvres en matière organique - pauvres en alumine amorphe - relativement saturés |
| Facteur 2 | } | <ul style="list-style-type: none"> - riches en argile - en particulier en argiles gonflantes - relativement pauvres en amorphes - sur roches relativement peu basiques et peu colorées |

Dans le second plan, un regroupement supplémentaire apparaît, celui des sols podzolisés qui correspond à des valeurs positives du facteur 2 et du facteur 5, ce qui signifie qu'il s'agit de sols

- | | | |
|-----------|---|---|
| Facteur 2 | } | <ul style="list-style-type: none"> - sur roche acide - pauvres en amorphes |
| Facteur 5 | } | <ul style="list-style-type: none"> - désaturés - relativement plus riches en argiles que les andosols |

3.- DISCUSSION - CONCLUSION

3.1.- Regroupement des variables

De ces résultats nous retiendrons tout d'abord, sur le plan du regroupement des variables, les constatations suivantes :

Matière organique (89), Capacité d'échange (10), Al amorphe (4)

Dans les sols étudiés, la capacité totale d'échange dépend plus des teneurs en matière organique que de la teneur en amorphes. Par contre, les hautes valeurs du taux de saturation de cette capacité sont corrélées avec les fortes teneurs en argile totale.

Le taux d'alumine amorphe est relativement bien corrélé avec la teneur en carbone total. Ce résultat est important, car il souligne à la fois le rôle de l'aluminium comme principal agent d'insolubilisation des composés humiques et le rôle du carbone comme agent du maintien de l'alumine à l'état amorphe. Cette liaison avait été déjà mise en évidence par MARTINI (1969) à partir de nombreux andosols d'Amérique du Sud.

Argiles et amorphes

La teneur globale en minéraux argileux (7) et la teneur relative en éléments gonflants (16) s'opposent à l'ensemble des amorphes (3, 4, 5) dont l'abondance est liée à la basicité de la roche-mère (2) et à l'altitude (1).

Minéraux "néoformés"

Le regroupement de l'halloysite et de la metahalloysite avec les smectites souligne une certaine parenté des conditions de formation de ces groupes de minéraux qui semblent s'opposer à celles de la kaolinite, même si l'on tient compte de l'artefact signalé plus haut.

Minéraux de transformation

Les minéraux du groupe de la vermiculite (15) s'opposent de leur côté au groupe des minéraux primaires (14) et constituent donc un bon indice du degré d'altération des matériaux.

Toutes ces constatations ne sont pas, à proprement parler, des nouveautés, mais elles ont, sous cette forme, l'avantage d'être aisément diffrables et bien assurées. En outre, nous avons pu les établir après avoir, dans une première phase d'essai, constaté le peu de signification des déterminations "interstratifiés". Dans les sols, à la différence des sédiments (LUCAS, 1962) les pics intermédiaires entre 10 et 14 sont sans doute le plus souvent dûs à des intergrades, minéraux plus ou moins ouverts qui n'ont pas une "signification écologique" différente de celle des vermiculites ou smectites auxquelles on les rattache. La distinction peut-être plus significative des intergrades alumineux (HETIER et TARDY, 1969) est malheureusement difficile à réaliser en routine.

3.2.- Hiérarchie des facteurs

Le facteur 1 correspond bien au pédoclimat qui, dans nos régions, est lié à l'altitude qui régit le bilan hydrique. La matière organique est le caractère qui suit le mieux les variations d'altitude et différencie le mieux nos groupes de sols (37 % de la variance totale).

En second lieu, (20 % de la variance) apparaît la composition chimique de la roche-mère dont dépend la teneur totale en amorphes.

Nous retrouvons donc bien, par le calcul, la nature et l'importance des deux premiers facteurs de l'andosolisation mis en avant par l'étude écologique. Par la suite, l'analyse statistique est plus nuancée que le diagnostic de terrain, mais les deux approches restent cohérentes.

L'âge du matériau est un élément qui apparaît à la fois dans les facteurs 2, 3 et 4 en fonction des diverses variables "argile" : teneur globale en minéraux gonflants ou halloysitiques.

La durée de la pédogénèse ne pouvait pas figurer directement puisque nous n'avons pas pu introduire de variable correspondant à ce paramètre pourtant très important.

Par ailleurs, nous ne voyons aucun regroupement "régional" des sols du Cantal, de la Chaîne des Puys ou des Vosges. Seuls apparaissent les regroupements par type de sol : sols bruns isolés par rapport aux andosols, sols andiques et sols podzolisés (facteur 1, facteur 2).

Dans le plan des facteurs 2 et 5, les sols podzolisés sont "isolés" à cause de leur taux de saturation particulièrement bas. Dans les autres plans, on ne remarque aucun regroupement écologiquement significatif.

En conclusion, en dehors du caractère plus objectif des constatations effectuées par l'analyse factorielle, nous retiendrons que ce calcul a permis de mettre une première fois en évidence :

- la liaison C-Al
- la liaison halloysite-smectites
- l'opposition du groupe précédent à la kaolinite

faits importants pour la compréhension de certains mécanismes de l'andosolisation et qui seront ultérieurement confirmés par les observations et analyses dont nous rendons compte dans la deuxième partie de l'ouvrage.

CONCLUSIONS

Après avoir précisé la nature et l'importance respective des différents facteurs de l'andosolisation, nous pouvons émettre sous forme de questions, les hypothèses auxquelles la deuxième partie apporte des éléments de réponse.

Par quel mécanisme la permanence de l'humidité peut-elle contribuer à inhiber l'argilogénèse ?

Dans quelle mesure et de quelle manière les parties vitreuses des roches-mères contribuent-elles à la formation des amorphes secondaires ?

Quelle est la part des processus de précipitation dans la formation de cette phase amorphe ?

Quelle est l'intervention de l'humidité dans l'évolution de la matière organique ?

Combien de temps les différents composés humiques peuvent-ils rester stables ?

Quel est le mécanisme exact qui provoque leur accumulation relative ?

Telles sont les principales questions que nous avons été amené à poser au terme de l'étude écologique, en fonction des observations de terrain et des difficultés analytiques rencontrées.

En plus des réponses apportées par la simple analyse des données élémentaires du terrain ou de la caractérisation classique, ou par les travaux d'autres auteurs, nous avons essayé d'apporter quelques éléments de réponse supplémentaires par des analyses plus fines ou des expériences spécialement adaptées.

DEUXIEME PARTIE

RECHERCHES SUR LA NATURE ET LES PROPRIETES
DE LA PHASE ORGANOMINERALE AMORPHE DES ANDOSOLS

INTRODUCTION

L'exposé des résultats et interprétation de ces recherches est ici encore, divisé en deux chapitres :

Dans le premier chapitre, nous rendons compte de toutes les recherches effectuées d'un point de vue statique et qui visent à décrire la nature et les propriétés, en un mot, l'état à un instant donné, des principaux constituants du complexe d'altération :

- constituants minéraux
minéraux et verres, argiles, mais surtout l'ensemble amorphes-allophane
- constituants organiques décrits en tant que complexes organo-minéraux

Les analyses physico-chimiques sont, dans les deux cas, suivies ou contrôlées à l'aide du microscope électronique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rassemblé les analyses et expériences effectuées d'un point de vue dynamique. Tout d'abord, nous étudions géochimiquement et minéralogiquement, l'évolution de la terre fine. Puis, à l'aide de tissus végétaux uniformément marqués, nous reproduisons deux aspects essentiels de l'évolution de la matière organique des andosols : minéralisation des litières et accumulation des composés humifiés.

CHAPITRE I

ETUDE DES CONSTITUANTS DU COMPLEXE D'ALTERATION

INTRODUCTION

Dans ce premier chapitre, qui correspond à la démarche analytique effectuée pour mieux comprendre le processus d'andosolisation, nous mettrons l'accent sur les deux constituants amorphes organiques et minéraux qui donnent au sol ses propriétés particulières. C'est pourquoi nous développerons toutes les considérations méthodologiques nécessaires à l'interprétation.

Par contre, il ne nous a pas paru nécessaire de développer ici, de façon aussi détaillée, les méthodes d'étude des autres constituants minéraux du complexe d'altération. Seul, le rappel de la nature des argiles, des verres et des minéraux primaires nous a semblé nécessaire à l'exposé de l'interprétation de l'étude analytique (point de vue statique) et de l'étude expérimentale (point de vue dynamique).

L'examen critique du choix des techniques d'étude quantitative et qualitative des argiles, d'estimation du contenu en verres primaires et de la minéralogie des roches volcaniques a été vu dans la première partie de l'ouvrage consacré aux propriétés et techniques d'étude générale des andosols.

Nous traiterons donc ici de l'extraction de l'ensemble amorphes-allophane et de l'interprétation que l'on peut donner sur la nature et l'origine de ses constituants majeurs, Al, Si, Fe et C, puis de l'extraction des composés organiques considérés comme faisant partie des complexes organo-minéraux.

Enfin, nous reprendrons l'ensemble de ces résultats pour les confronter avec ceux de l'examen par microscopie électronique, ce qui nous permettra de proposer un schéma du modèle structural qui explique, selon nous, la plupart des propriétés connues des andosols.

I.- LES CONSTITUANTS MINÉRAUX DU COMPLEXE D'ALTERATION

Avant d'aborder l'objet d'étude principal de ce chapitre : l'ensemble amorphes-allophane, il nous a semblé indispensable de rappeler quelques données concernant les minéraux primaires et verres d'une part, les minéraux argileux d'autre part. Nous ne parlerons ici que des résultats et des interprétations les plus importantes.

Dans quelle mesure les verres et l'héritage de billes hydratées participent-ils à la constitution de la phase amorphe secondaire ?

Dans quelles conditions et dans quels sites se produit la cristallogénèse des argiles, avant et après la constitution de la phase amorphe ?

Telles sont les questions auxquelles nous essayons d'apporter des éléments de réponse avant d'aborder plus précisément le problème de l'ensemble amorphes-allophane.

1.- MINÉRAUX PRIMAIRES ET VERRES

Au sein du complexe d'altération des andosols, on trouve, à l'état d'inclusions, outre les minéraux secondaires, des résidus de verre, de roche et de minéraux primaires.

On voit parfois des microlites feldspathiques isolés, mais le plus souvent, ce sont les augites automorphes qui forment une partie non négligeable des sables.

Nous avons vu, dans la première partie, comment a été effectuée la détermination minéralogique aux rayons X des espèces contenues dans les sables et les limons, après broyage et enrichissement densimétrique. Nous avons vu également, à cette occasion, que si l'on définit les verres non pas optiquement, d'après la surface des plages isotropes, mais cristallographiquement d'après l'allure des diagrammes de rayons X des fractions les plus légères, on constate que même dans les scories, les fractions réellement vitreuses sont très minoritaires.

Il était indispensable de rappeler ces quelques faits afin de situer l'importance respective des verres et des minéraux primaires dans la formation de la phase amorphe secondaire.

1.1.- Evolution des verres au cours de l'altération

Cette question a été étudiée en détail par GEBHARDT et al. (1969) à propos des tufs trachytiques de l'Eifel. Dans le cas des verres vésiculaires où la matière vitreuse ne forme plus que la paroi des bulles de dégazage, ces auteurs observent une altération rapide avec formation d'une phase amorphe brune et homogène (que les auteurs appellent "allophane"), qui passe ensuite à l'hallowysite ou à la kaolinite. Les microlites inclus dans ce verre s'altèrent aussi avec un peu de retard.

2

Nous pouvons faire des observations du même ordre dans les lames minces de l'andosol du Mercoeur. Cependant, nous avons remarqué que dans les débris de roche de la taille des sables, on trouvait à peu près autant de grains de verre vésiculaire que de verre dit granulaire (sans bulles), ainsi qu'un grand nombre de cristaux d'augite.

Les grains de verre vésiculaire (totalement isotropes et pauvres en microlites) sont entourés d'une couche d'altération brune identique à celle qui accompagne les autres grains. Lorsque les particules sont assez grosses, l'intérieur des bulles est exempt de tout produit d'altération.

Les grains de verre granulaire sont moins isotropes (le fond est partiellement éclairé en lumière polarisée) et plus riches en microlites. Ils sont progressivement "pseudomorphosés" par un fond matriciel identique aux pseudolimons du sol. Les débris de microlites feldspathiques semblent disparaître avant ceux d'augite.

Comme nous l'avons dit dans la première partie, ces observations sont aussi valables pour les sols du Cantal que pour ceux de la Chaîne des Puys, mis à part le fait que le faciès "verre vésiculaire", plus abondant dans les scories meubles provenant des projections aériennes, est plus rare dans le Cantal.

Dans les fractions fines examinées au microscope électronique, les verres sont assez abondants dans les sols de la Chaîne des Puys, (alors que l'on en trouve pratiquement jamais dans ceux du Cantal) : On retrouve les deux faciès de verre granulaire et vésiculaire, comme nous le verrons plus loin. En ce qui concerne leur comportement dans l'altération, il est sans doute significatif que l'on trouve apparemment beaucoup plus de débris de verre que de microlites feldspathiques individualisés. Cet aspect contraste avec l'allure des diagrammes de rayons X de ces mêmes fractions, où l'on voit apparaître les raies de feldspaths dans les sols les plus jeunes, riches en esquilles de verre.

1.2.- Cristallogénèse et état vitreux

Nous avons évoqué plus haut le problème de l'ordre de cristallisation au sein des laves ou des projections. BROUSSE (1960) a étudié la cristallisation ou le maintien à l'état amorphe des résidus feldspathiques de la différenciation magmatique. En établissant deux indices (facteur de liaison $\frac{0}{10}$ et facteur de substitution $\frac{\text{Si}}{100}$) cet auteur rappelle

Si + Al

Si + Al

que lorsque la composition de la pâte amorphe est trop différente de celle d'une formule feldspathique stable, l'état vitreux est dans un premier temps le plus probable. A la longue, des faciès de dévitrification apparaissent avec cristallisation d'une espèce feldspathique et exsolution de l'élément excédentaire, en l'occurrence la silice, qui cristallise en cristoballite.

Il nous a paru intéressant de faire un rapprochement entre ce fait bien connu en pétrogénèse et ce qui pourrait advenir au sein des produits de l'altération des roches volcaniques.

En effet, lors des premiers stades de l'altération, même si ce sont les plagioclases les plus basiques qui s'altèrent en premier, l'altération libre des substances hypersiliceuses par rapport aux minéraux 2/1 ou, a fortiori 1/1, qui se forment dès ce stade. Il est donc logique d'admettre que la silice en excès précipite à part, sous forme amorphe.