

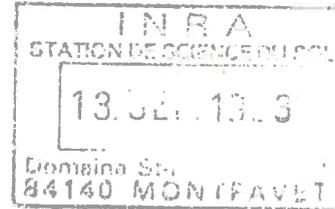
**THESE DE DOCTORAT de l'UNIVERSITE PARIS 6**

Spécialité

**PEDOLOGIE**

présentée par

**Christine LASSAUSSE**



pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PARIS 6**

**ORGANISATION ET COMPORTEMENT PHYSICO-HYDRIQUE  
COMPARES DE DEUX SOLS A STRUCTURE MICROAGREGEE  
DE L'AUBRAC (MASSIF CENTRAL, FRANCE) :  
SOLS ANDIQUES ET SOLS BRUNS ACIDES**

soutenu le 29 Novembre 1991 devant le jury composé de :

<b>M. MARIOTTI A.</b>	Président
<b>M. BRUAND A.</b>	Rapporteur
<b>M. QUANTIN P.</b>	Rapporteur
<b>M. CALVET R.</b>	Examineur
<b>M. CURMI P.</b>	Examineur
<b>M. PEDRO G.</b>	Examineur

## Avant-propos

Ce mémoire est le résultat d'un travail entrepris au laboratoire de Sciences du Sol de Rennes, laboratoire associé de l'Institut National de Recherche Agronomique et de l'École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. Il a bénéficié du soutien financier du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

Je tiens ici à remercier en premier lieu les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : A. MARIOTTI, Professeur à l'Université de Paris 6 - A. BRUAND, Chargé de Recherches à l'INRA d'Orléans - P. QUANTIN, Directeur de Recherches à l'ORSTOM de Bondy - R. CALVET, Professeur à l'INAPG - P. CURMI, Chargé de Recherches à l'INRA de Rennes - G. PEDRO, Directeur de Recherches à l'INRA et responsable du D.E.A. de Pédologie de l'Université de Paris 6.

C'est grâce à P. AUROUSSEAU que j'ai pu commencer cette recherche. C. CHEVERRY et P. CURMI ont finalement été les responsables directs de ce mémoire et m'ont permis de le mener jusqu'à son terme. Je leur en suis profondément reconnaissante.

C. CHEVERRY m'a aidée à organiser ce travail, à distinguer l'essentiel de l'accessoire. Il a dû souvent me rappeler que "le mieux est l'ennemi du bien". Sa contribution dans la rédaction finale a été décisive, et je lui dois beaucoup.

P. CURMI m'a appris la rigueur en matière d'observations morphologiques lors des premières études de terrain dans l'Aubrac; ce furent de bons moments de travail et de chaleur humaine. Puis, au long de ces quelques années passées au laboratoire de Rennes, il a toujours été prêt à écouter, à discuter longuement, à lire, relire et commenter ce travail.

A. BRUAND m'a accueillie au centre INRA-SESCPF, pour les mesures de porosimétrie à mercure. Les discussions que j'ai pu avoir avec lui sur la physique du sol, l'importance de raisonner l'échantillonnage ont été enrichissantes; son esprit critique m'a aussi beaucoup apporté quant à la manière d'appréhender la recherche.

P. QUANTIN m'a permis de réaliser à l'ORSTOM les analyses de dissolutions chimiques sélectives, menées sous l'oeil attentif de H. GUENIN et de A. BOULEAU. Lors de chacune de nos rencontres, il s'est intéressé à mon travail et m'a toujours prodigué ses encouragements.

C. WALTER, V. HALLAIRE ont bien voulu relire et commenter cette thèse. Leurs remarques, leurs regards plus externes mais de ce fait plus incisifs, ont été importants pour clarifier certaines idées.

G. BOURRIE, A.B. DELMAS ont dirigé successivement le laboratoire au cours de ces années; ils m'ont fait confiance et permis de mener ce travail jusqu'à son terme au sein du laboratoire.

F.X. HUMBEL et M.C. GIRARD m'ont tous deux donné à divers titres le goût de la pédologie, lors de l'enseignement de 3ème cycle et lors du stage de DEA à Grignon.

M. DERRUAU, J. DEJOU, A. de GOER, A. DALMIERES m'ont fait profiter de leur expérience en tant que géomorphologue, pédologue, géologue, et conseiller agricole lors de l'excursion AFES du Massif Central dans l'Aubrac, et je les en remercie ici.

Il y a aussi tous ceux qui, à un moment ou un autre, m'ont aidée et auxquels je voudrais ici exprimer ma reconnaissance, notamment : J. BEDIER, pour l'aide sur le terrain dans l'Aubrac - J.C. FERREN pour le développement des photographies - O. QUIDU pour la finition des dessins - F. GARNIER pour la confection des lames minces, les vérifications diverses du manuscrit, son concours dans la réalisation des planches, mais aussi sa complicité et son sourire - V. MAITRE, A. SOULIER qui étaient présentes dans les bons comme dans les mauvais moments - P. BRUNEAU, V. HOUBEN qui, très gentiment, m'ont consacré une partie de leur temps pour les derniers collages et mises en pages - M. LAMOTTE qui a suivi le cheminement de ce travail et était toujours près à discuter quand j'en avais besoin - S. FURIAN et WIDIATMAKA qui ont aussi proposé leur aide - Et puis l'ensemble des autres chercheurs, techniciens, thésards, étudiants du laboratoire qui, de près ou de loin, ont participé à ce travail : M. ANDERS, L. BARBIERO, J. BERRIER, B. EZZAHAR, C. GASCUEL, H. HAMDÍ, R. LAHMAR, J. LE GUEVEL, P. MEROT, A. REGEARD, J.M. RIVIERE, P. ROBIN, A. SIMON, F. TROLARD...

J'adresse finalement un clin d'oeil aux plus proches : copains, parents, qui ont toujours été présents : Véro, François, Cheche, Marta, Mathieu, Annie, Christian, Lucien, André, Gisèle, Sylvie, Flo, puis d'autres encore...

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I</b>	
<b>Caractérisation générale du milieu</b> .....	3
1. Choix de la région d'étude.....	3
2. Le cadre géographique et géomorphologique .....	3
3. Le substrat géologique.....	4
4. Le climat.....	7
5. Végétation, occupation du sol - Economie.....	9
6. Les sols de la région : données cartographiques et agronomiques disponibles .....	11
<b>Chapitre II</b>	
<b>Analyse bibliographique : les caractères généraux des séquences associant les andosols à d'autres types de sols, dans le Massif Central Français</b> .....	13
1. Les facteurs principaux de l'andosolisation en régions tempérées.....	13
2. Lithoséquences.....	14
3. Séquences altitudinales.....	15
4. Chronoséquences.....	15
5. Conclusion .....	16
<b>Chapitre III</b>	
<b>Approche macromorphologique</b>	
<b>Séquences et volumes de référence</b> .....	17
Introduction .....	17
1. Séquence Puech Roux .....	17
2. Séquence Puech Montarquié .....	31
3. Conclusion du chapitre III.....	41
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Données physico-chimiques et minéralogiques</b> .....	47
Introduction .....	47
1. Matière organique et granulométrie.....	47
2. Analyse des constituants.....	53
3. Données physico-chimiques .....	80
4. Synthèse et conclusion.....	93
<b>Chapitre V</b>	
<b>Analyse microscopique</b> .....	95
Introduction .....	95
1. Méthodes et techniques utilisées - Echantillonnage.....	95
2. L'organisation pour les horizons de l'andosol.....	96
3. L'organisation dans les volumes du sol brun acide .....	111
4. Synthèse et Comparaison des grands traits différenciant ou rapprochant les organisations des deux types de sol .....	118
<b>Chapitre VI</b>	
<b>Analyse du spectre poral par la porosimétrie à mercure</b> .....	121
1. Méthode et mode de présentation des résultats.....	121
2. Analyse du spectre poral dans les deux types de sols.....	123
3. Conclusion .....	135

<b>Chapitre VII</b>	
<b>Etude du comportement physico-hydrique.....</b>	<b>137</b>
Introduction .....	137
1. Méthode .....	137
2. Profils porosimétriques .....	140
3. Caractérisation et évolution verticale des courbes de retrait et des courbes de rétention en eau au sein de chaque profil.....	144
4. Synthèse et conclusion.....	160
<b>Chapitre VIII</b>	
<b>Comparaison des résultats de porosimétrie à mercure et du comportement physicohydrique</b>	
<b>Relation avec l'organisation.....</b>	<b>165</b>
1. Mode de représentation et exemples d'interprétation.....	165
2. Résultats et interprétation.....	168
3.Synthèse et conclusion .....	181
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>185</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>187</b>

# Introduction générale

Ce travail s'insère dans le cadre des recherches concernant l'organisation et le comportement physico-hydrique de deux grands types de sol, les sols bruns acides et les andosols.

Les sols bruns acides et les andosols présentent une convergence de structure: ils sont généralement tous deux décrits comme comportant des horizons à structure microagrégée. Ces deux types de sols présentent néanmoins des constituants bien différents: les andosols sont connus comme des sols riches en composés amorphes, alors que les sols bruns acides sont plus riches en minéraux argileux cristallisés.

Il semble intéressant de tester si ce jeu de structures plus ou moins convergentes (microagrégée) et de constituants a priori bien différents pouvait influencer sur les comportements physico-hydriques de ces sols.

Partant de ce contexte, les objectifs de notre travail sont au nombre de deux:

- 1. La description de la structure et des constituants des horizons de ces deux types de sol à différents niveaux d'investigation, depuis l'échelle du paysage à celle des constituants élémentaires.*
- 2. Une étude du comportement physico-hydrique de ces horizons reliée aux différences de structure et de constituants mises en évidence précédemment.*

Pour mener à bien cette étude, on dispose d'un arsenal de méthodes et techniques, développées ces dix dernières années (Tessier, 1984; Bruand, 1985; Curmi, 1987), permettant de caractériser l'organisation et le comportement hydrique d'un horizon: microscopie optique et électronique, porosimétrie à mercure, techniques des mesures physico-hydriques sur échantillon à structure préservée. Peu d'études ont été consacrées à la morphologie et au comportement physico-hydrique des andosols, notamment sur des échantillons à structure préservée.

L'analyse des constituants suppose, pour des sols andiques, la mise en oeuvre de techniques particulières (Quantin, 1991) comme les méthodes de dissolution sélective. En effet, ces sols sont caractérisés par leurs "propriétés andiques", définies essentiellement à partir de tests physico-chimiques (RPF, 1990). Il nous faudra donc nous caler par rapport aux différents auteurs et classifications. De plus, les andosols ont été peu étudiés en milieux froids et humides, mais plutôt en milieu tropical (Flach et al, 1980)

Après une présentation du cadre régional d'étude, l'Aubrac (Auvergne), nous replaçons les deux types de sols étudiés dans le paysage par l'intermédiaire de séquences. Des volumes pédologiques, considérés comme représentatifs des deux types de sols, sont alors sélectionnés.

Nous abordons ensuite les propriétés physico-chimiques et la caractérisation générale des constituants de ces sols. Les résultats permettent notamment de se caler par rapport aux auteurs qui ont travaillé sur les sols andiques et de connaître le milieu physico-chimique ambiant.

Puis, l'étude de l'organisation et la comparaison de ses caractéristiques selon les deux types de sol est menée à l'échelle microscopique (essentiellement au microscope optique).

La caractérisation des organisations, notamment de l'espace poral, est complétée par une analyse par porosimétrie à mercure de la distribution du volume poral en fonction de la taille des pores.

Nous étudions le comportement physico-hydrique des horizons des deux types de sol en suivant l'évolution simultanée des teneurs en eau et des volumes poraux sous l'effet des contraintes hydriques à l'échelle de motte à structure préservée.

Enfin un dernier chapitre est consacré à la confrontation entre les résultats des mesures physico-hydriques et les résultats de porosimétrie à mercure. On espère ainsi pouvoir mieux analyser l'évolution dynamique des différents niveaux d'organisation.



Fig. I.1 : Localisation de l'Aubrac dans le Massif Central Français

En traits : le socle hercynien - En blanc ; couverture secondaire et tertiaire - En pointillé : Bassins de subsidence oligogènes - En noir : Massifs volcaniques tertiaires et quaternaires.

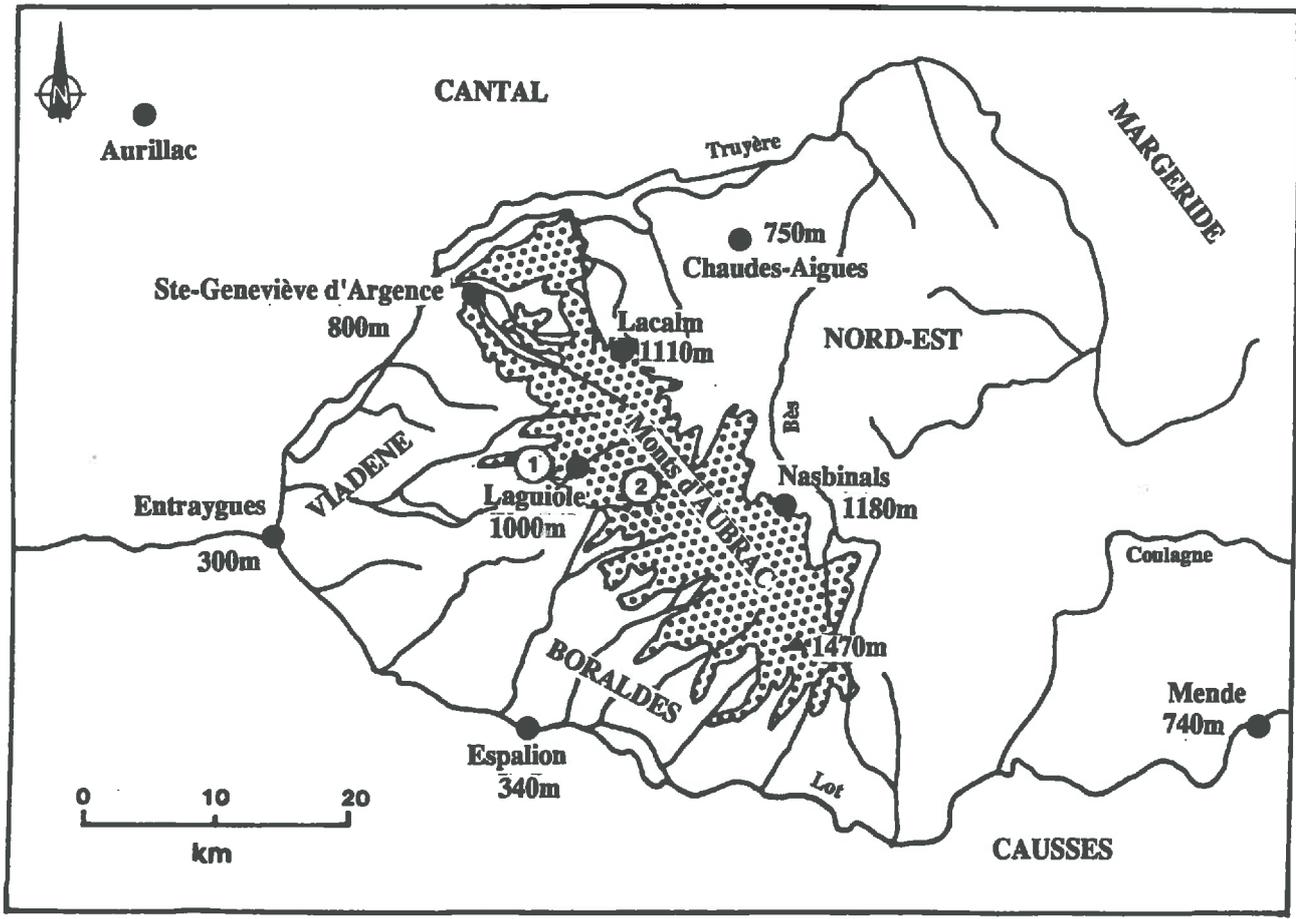


Fig. I.2 : Les grandes régions naturelles de l'Aubrac

① site 1 Puech-Roux    ② site 2 Montarquié

# Chapitre I

## Caractérisation générale du milieu

### 1. Choix de la région d'étude

Vouloir comparer, dans leur contexte naturel, des sols bruns acides et des andosols supposait choisir une région où ces deux types de sols coexistent. Or, les premiers se développent plutôt sur des roches pauvres en bases, acides, plutoniques ou métamorphiques (granites, gneiss, micaschistes) ou sédimentaires (grès) (Duchaufour, 1970, 1988); alors que les seconds se forment plutôt sur des matériaux volcaniques (scories, cendres, basaltes).

D'autre part, pour étudier une séquence continue Sols Andiques - Sols Bruns Acides, il était préférable de choisir un site à topographie peu accentuée afin d'éviter une trop forte contamination entre les deux types de sol.

Ces deux conditions nous ont conduits à choisir comme région d'étude le Massif Central qui présente les formations géologiques recherchées, et plus particulièrement l'Aubrac qui présente des zones à relief peu accentué.

### 2. Le cadre géographique et géomorphologique

L'Aubrac, situé aux confins des départements du Cantal, de l'Aveyron et de la Lozère, constitue la région volcanique importante la plus méridionale du Massif Central français (Fig. I.1). Elle s'étend entre trois rivières : la Truyère (à l'Ouest, au Nord et au Nord-Est), le Lot (au Sud), et la Coulagne (au Sud-Est). Trois régions naturelles principales peuvent être distinguées : les régions Nord-Orientale et Sud-Occidentale séparées par la région des Monts d'Aubrac (Fig.I.2).

#### La région des Monts d'Aubrac

De nature volcanique, elle constitue un relief empâté de forme elliptique, allongé selon une direction Nord-Ouest Sud-Est, sur 45 km de long et 4 à 15 km de large. L'altitude moyenne est supérieure à 1000 mètres; elle augmente vers le Sud et culmine à 1470 mètres à son extrémité sud-orientale. La morphologie actuelle découle de l'action des glaciers sur les laves : les sommets ont été émoussés et correspondent à des croupes trapues; beaucoup ne représentent pas d'anciens volcans mais des accumulations de coulées (Kieffer, 1971). L'un de ces principaux sommets, le Puech de Montarquié (1301 m) constitue un des sites d'étude (Site 2).

C'est une région couverte d'immenses pâturages avec, pour tout habitat des "burons" disséminés, occupés l'été par les gardiens de troupeaux; les quelques agglomérations, exceptée celle d'Aubrac, sont cantonnées au Nord (Lacalm, Cantoin...).

Le versant Nord-Est est faiblement incliné tandis que le versant Sud-Ouest est raide et fortement découpé par les affluents du Lot.

#### La région Nord-Est

Elle est essentiellement formée de plateaux granitiques d'altitude élevée (1000 m de moyenne) s'abaissant progressivement vers la haute vallée de la Truyère. Les bourgs (Nasbinals, St-Urcize) s'abritent des vents d'Ouest au pied des Monts d'Aubrac. Au Nord, les ruisseaux forment des gorges profondes dans le socle qui est alors métamorphique (vallée du Bès, du Remontalou...). Dans sa partie Sud (Bassin du Bès), ce plateau oriental garde de profondes empreintes de la période glaciaire : sables, argiles, grosses boules de granite qui forment de mauvais pâturages.

## La région Sud-Occidentale

Variée, elle comporte le pays de Viadène (à l'Ouest), le pays des Boraldes (au Sud), le pays d'Olt (vallée du Lot).

### La Viadène

En bordure aval de la Truyère, au Sud de Ste-Geneviève d'Argence, s'étend un plateau granitique à relief assez peu marqué, le pays de Viadène, dont l'altitude oscille autour de 800 mètres (de 700 m au sud à plus de 1000 m au nord). C'est dans la partie orientale de cette zone, en limite avec les Monts d'Aubrac qu'est situé l'un des lieux d'étude (Site 1 "Puech Roux"). Les affluents de la Truyère, la Selves notamment, peu encaissés à l'amont, inscrivent des gorges importantes vers l'aval métamorphique. Restent par place, des témoins isolés d'une mince couverture basaltique en particulier au nord et au sud-ouest.

L'altitude relativement basse, le relief assez peu marqué, la protection des vents du nord-est par les crêtes des Monts d'Aubrac ont favorisé l'implantation humaine (Ste-Geneviève, Laguiole, Soulagés...).

### Le pays des Boraldes

Au sud, se trouve la zone des "Boraldes"; ces rivières torrentielles issues des crêtes volcaniques ont profondément entaillé le socle. Des ravins alternent avec des hauteurs aux sommets arrondis où se sont concentrés les habitats (Le Cayrol...). Le substrat métamorphique en amont d'Estaing devient granitique en aval. Des lambeaux de coulées volcaniques et de sédiments secondaires le recouvrent par place aux interfluves.

### Le pays d'Olt

C'est le nom régional de la vallée étroite du Lot en amont de son confluent avec la Truyère; cette rivière coule sur le socle. Deux bassins la jalonnent : à l'est, celui de St-Geniez d'Olt; à l'ouest, celui d'Espalion, tous deux établis sur le Permien.

Les effets des périodes froides quaternaires ont laissé de profondes empreintes sur le paysage, notamment sur le versant Est du Massif (Monts d'Aubrac et région Nord-Est). Le domaine glaciaire de l'Aubrac a une surface de 660 km<sup>2</sup> et présente une forme elliptique de 30 km de grand diamètre Sud-Nord. Les formes glaciaires abondent : anciennes cuvettes comblées par de la tourbe, lacs de surcreusement (St-Andéol, Salhiens), anciens pingos développés dans les formations volcaniques et où demeurent actuellement des mares; dépôts morainiques (présents sur le Site 2 Montarquié) et fluvioglaciaires, roches moutonnées, striées, blocs erratiques couvrent de grandes surfaces. Certains phénomènes comme la formation des mottes gazonnées (surfaces soulevées par le gel) seraient encore actuels (Rouire et Rousset, 1980). Des figures de cryoturbation et des traces de solifluxion sont visibles sur les sites d'étude.

## 3. Le substrat géologique

Quatre grands ensembles géologiques sont présents dans la région : les roches métamorphiques et les roches plutoniques qui constituent le socle primaire, les roches volcaniques, les roches sédimentaires (Fig.I.3).

### Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques, d'âge primaire (anté-carbonifère) forment la partie la plus importante du socle de l'Aubrac. Elles affleurent au nord et à l'ouest, le long du cours de la Truyère. Elles sont beaucoup plus répandues dans le sud, au nord du Lot.

Le long de la Truyère ce sont essentiellement des micaschistes, des gneiss à deux micas, et des leptynites; ces terrains sont migmatisés dans le secteur du lac de Sarrans (embréchites et anatexites) (Colin, 1971; Rouire et Rousset, 1980).

Au Sud de l'Aubrac, dans le pays des Boraldes, la série métamorphique est à la fois plus variée, plus étendue et plus puissante. Elle est affectée de grands plis d'axe ENE-OSO. Les micaschistes à deux micas constituent le faciès le plus répandu. Gneiss et quartzites sont abondants. Des schistes à séricite affleurent au sud-ouest, des gneiss ocellés au sud-est.

### Les roches plutoniques

Les roches plutoniques constituent les principaux affleurements en Viadène et dans la région nord-est. Ce sont essentiellement des granites, à tendance granodioritique (Didier et Lameyre, 1971).

Le faciès le plus répandu est le granite porphyroïde de la Margeride, dit "granite à dents de cheval". Ce granite à texture grenue présente des grains moyens de feldspath potassique, plagioclase, quartz et biotite et de grands cristaux de feldspath potassique perthitique; la cordiérite existe dans certains types un peu plus siliceux, alumineux et alcalins; elle est alors fréquemment accompagnée de muscovite. Ce granite de la Margeride serait en gisement laccolitique, de 5 km d'épaisseur (Colin, 1971); il se serait mis en place

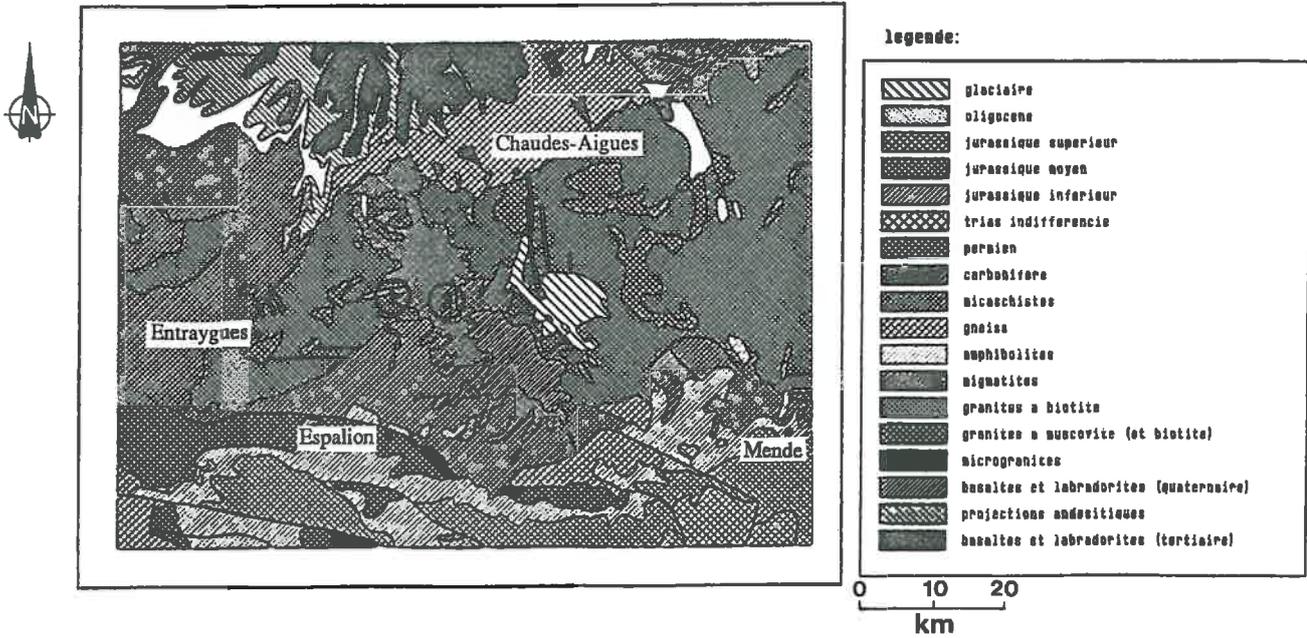


Fig. I.3 : La géologie de l'Aubrac (extrait de la carte géologique au 1/1.000.000 de France, complétée d'après Colin, 1971 ) ① site 1 Puech-Roux ② site 2 Montarquié

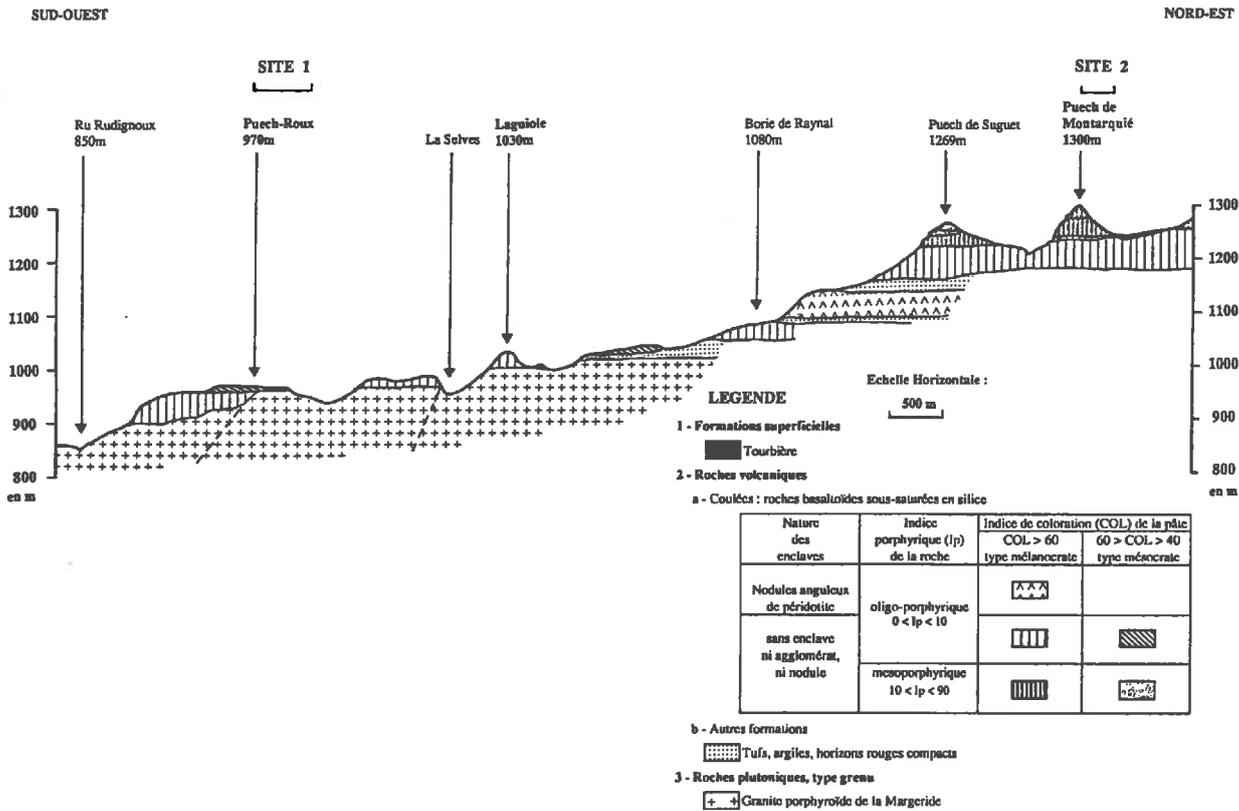


Fig. I.4 : Coupe géologique de la Viadène aux Monts d'Aubrac passant par les 2 sites d'étude : site 1 "Puech Roux" et site 2 "Puech Montarquié" (construite à partir de la carte géologique au 1/80 000 - Colin, 1971)

au Carbonifère (-330 à -312 M.A.) (Rouire et Rousset, 1980).

Plusieurs variantes existent dans la région : d'abord des granites clairs à "deux micas" (muscovite, rare biotite, et tourmaline), fréquemment intrusifs dans le faciès précédent et qui affleurent souvent en gisements horizontaux ou en corps annulaires en Viadène et dans la région Nord-Est (Colin, 1971); ensuite, des filons de faciès variés : microgranite (dans le pays des Boraldes et au Nord), leucogranite aplitique (en Viadène), ou encore des filons plus basiques de microdiorite, microdiorite quartzique (sur le plateau Nord-Est), qui recoupent le granite de la Margeride ou les roches métamorphiques; enfin le granite grenu de Chaudes-Aigues qui affleure en panneau rectangulaire au Nord.

Les sols de la partie aval de l'un des sites qui sera étudié en détail, site 1 "Puech Roux", se sont développés sur le granite porphyroïde de la Margeride (Fig. I.4).

## Les roches volcaniques

Le massif volcanique de l'Aubrac s'étend sur une surface de 400 à 450 km<sup>2</sup> et présente une épaisseur maximale de 360 m. Il comporte exclusivement des produits basaltiques. Du point de vue chimique, ce sont des basaltes alcalins sous-saturés sodiques (Brousse, 1961; Colin, 1971).

Le volcanisme de l'Aubrac se caractériserait schématiquement par des émissions monofissurales mixtes à magma fluide, comparables à celles d'Islande (Goër et Mergoïl, 1971); les produits volcaniques auraient pu sortir le long d'une grande fracture NO-SE (Kieffer, 1971). Les points de sortie sont mal connus; les sommets ne représentent pas des volcans au sens courant du terme mais des lieux où les coulées superposées sont plus nombreuses et plus puissantes.

D'une façon générale, Colin (1971) note une alternance de coulées de laves basaltiques et de produits pyroclastiques (tufo-laves essentiellement). Chaque éruption aurait débuté par l'émission d'une émulsion de magma très riche en gaz donnant le faciès tufeux; dans un deuxième temps se serait épanché un magma fluide, relativement dégazé; la coulée basaltique. Des couches rouges ("horizons rouges compacts") sont fréquemment stratifiées au toit des tufo-laves, sous la coulée.

Trois grands types de faciès apparaissent dans le massif volcanique : *les basaltes, les pyroclastites, les couches rouges.*

° *Les basaltes* des différentes coulées sont difficiles à différencier. Colin (1971) les classe selon trois critères : la présence/absence et la nature des enclaves (nodules de péridotite ou agglomérats), l'indice porphyrique de la roche totale, et l'indice de coloration de la pâte. Les deux premiers critères sont en relation avec la position stratigraphique des coulées. D'une manière générale, la proportion de phénocristaux (essentiellement clinopyroxènes et olivine) croît de la base au sommet de la série (accumulation de cristaux par différenciation gravitaire dans le magma).

Les nodules anguleux de péridotite se trouvent dans les basaltes pauvres en phénocristaux de la base. Les agglomérats arrondis de clinopyroxènes et d'olivine s'observent dans les coulées terminales au sommet des séries porphyriques dont elles constituent une variante.

Les coulées dépourvues d'enclaves constituent la plus grande partie du massif. Ces basaltes affleurent le plus souvent sous forme de prismes (ou "orgues basaltiques"). Par évolution secondaire, ils peuvent acquérir la texture "brûlure de soleil" due au développement de l'analcime (Colin, 1971). Les prismes présentent alors fréquemment un sous-débit en "cailloutis" formé de polyèdres polygonaux plaqués d'oxydes, qui se superpose au débit en prismes toujours dominant.

° *Les pyroclastites* sont abondantes entre les coulées.

Les plus fréquentes sont les niveaux de tufs qui seraient essentiellement des tufo-laves. En fonction de leur consistance et de leur couleur, Colin (1971) distingue différents types : type rouge et compact ; type jaune et vert, poreux et friable; type marron friable mais non poreux.

Les autres types de pyroclastites sont peu abondants dans le massif. Des cinérites, massives ou stratifiées selon que leur milieu de dépôt est l'air ou l'eau sont situées exclusivement à la base de la série. Une brèche d'explosion remaniant des éléments du socle remplit une caldeira (la Garde) et marque la première manifestation volcanique. La brèche andésitique cantalienne est localisée à l'extrémité nord-ouest de l'Aubrac.

° *Des couches rouges compactes ou "horizons rouges compacts"*, généralement de faible épaisseur (1 m en moyenne), sont fréquemment situées au toit des niveaux pyroclastiques. Leur origine serait volcanique : enrichissement en fer ferrique par différenciation pneumatolytique discrète au toit des niveaux tufeux (Colin, 1971) et compaction sous la pression de la coulée basaltique sus-jacente.

Les analyses palynologiques conjuguées aux données paléomagnétiques permettent de proposer un âge villafranchien terminal (-1,6 M.A., -800 000 ans), soit base du quaternaire, pour le volcanisme aubracien (Colin, 1971). Cependant, ces datations semblent remises en cause par les mesures radiochronologiques Potassium-Argon qui situent la période d'activité du volcanisme au miocène supérieur (essentiellement entre 8 et 7,5 M.A.) (Goër, communication orale, 1989); il serait alors contemporain du stratovolcan cantalien.

Deux sites d'étude seront localisés sur des matériaux volcaniques (Fig. I.4) :

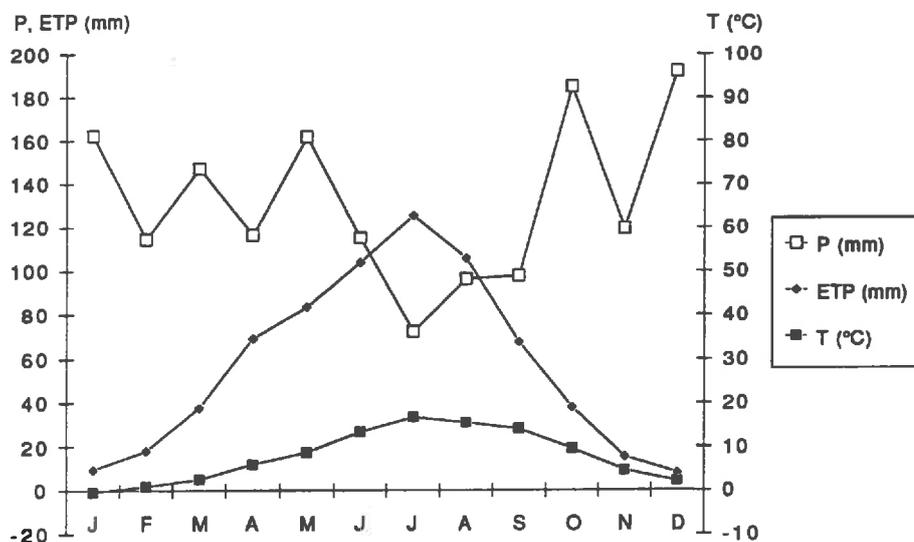
- la partie amont du Site 1 "Puech Roux" est développée sur basalte sans enclaves, oligoporphyrrique, mésocrate (Colin, 1971);
- l'ensemble du Site 2 "Puech Montarquié" est situé sur basalte sans enclaves, mésoporphyrrique, mélanocrate, selon Colin (1971).

## Les roches sédimentaires

Elles sont peu abondantes dans l'Aubrac. Au Sud, dans la vallée du Lot et les Boraldes, quelques dépôts carbonifères, permien et jurassiques sont présents : des conglomérats, grès et psammites du Carbonifère avec intercalations de houille en petits affleurements sur la rive droite du Lot (bassin de Lassouts près d'Espalion); des dépôts continentaux et lacustres permien (pélites et grès de teinte lie-de-vin) en grabens individualisés le long du Lot (Espalion, St-Geniez); des arkoses infraliasiques et des calcaires jurassiques en petits affleurements sporadiques dans la partie aval des Boraldes et la vallée du Lot. Des dépôts oligocènes essentiellement argileux affleurent principalement au nord de la région, notamment dans la partie septentrionale de la Viadène (bassin de Ste-Geneviève).

En résumé, l'Aubrac est un milieu à géologie et morphologie contrastées. Les sites d'étude sont localisés dans sa partie centrale, sur deux grands types de formations géologiques : granite de la Margeride et roches volcaniques, qui constituent, à eux deux, environ les deux-tiers des affleurements de l'Aubrac (Fig.I.3).

Figure I.5 : Diagramme ombrothermique de LAGUIOLE  
(Alt.1030m) - données 1979-1987 - (moyennes annuelles :  
T=7,8°C; P=1580mm; ETP=682mm)



## 4. Le climat

D'une manière générale, c'est un climat à dominance continentale, froid et humide qui règne sur la plus grande partie de l'Aubrac. Cependant, la variabilité spatiale est grande et plusieurs microclimats se différencient selon les principales régions prédéfinies : l'influence océanique se manifeste encore en Viadène entre 800 et 1000 m; l'influence montagnarde caractérise les Monts d'Aubrac et le plateau Nord-Est, situés au dessus de 1000 m; le climat subalpin ne concerne que les crêtes de l'Aubrac; enfin, la vallée du Lot et en moindre partie le pays des Boraldes subissent, outre l'influence atlantique, une influence méditerranéenne.

Les lieux d'étude étant situés à l'Est de la Viadène (Site 1 Puech Roux à 970 m d'altitude) et sur les Monts d'Aubrac (Site 2 Montarquié à 1260 m d'altitude), nous décrivons plus particulièrement le climat qui règne sur ces zones. La station météorologique la plus proche pour les précipitations et les températures est celle de Laguiole (1030 m d'altitude), située à la limite géographique Viadène - Monts d'Aubrac (respectivement à 2 et 8 kilomètres des Sites 1 et 2).

Le diagramme ombrothermique de Gaussen (Fig. I.5) indique les principaux aspects du climat pour cette station de Laguiole.

## Les températures

C'est une région froide : la température moyenne annuelle est de 7,8 °C à Laguiole; elle diminue encore avec l'altitude (6°C sur les sommets volcaniques). Les mois les plus froids sont ceux de novembre à mars ( $T < 5^{\circ}\text{C}$ ); les mois les plus chauds ceux de juin à septembre ( $13^{\circ}\text{C} < T < 17^{\circ}\text{C}$ ). A Laguiole, le nombre de jours de gel est de 109 par an, soit plus d'un quart de l'année (essentiellement de novembre à mai); le nombre de jours sans dégel est de 16 par an, répartis entre novembre et mars. Ces chiffres augmentent avec l'altitude : plus de 200 jours de gel par an à Nasbinals sur le plateau nord-est. Les gelées débutent en octobre et persistent jusqu'en mai. Des gels nocturnes peuvent même sévir en été, en nombre réduit, au dessus de 1000 m (Estienne, 1956). Par contre, les jours à forte température ( $> 25^{\circ}\text{C}$ ) sont limités (19 jours par an répartis entre juin et septembre). Les écarts diurnes sont forts, notamment l'été : jusqu'à 25°C sur les Monts d'Aubrac (Estienne, 1956).

## Les précipitations

La position de l'Aubrac en bordure occidentale des zones hautes en fait l'un des secteurs les mieux arrosés et surtout les plus enneigés du Massif Central.

Les précipitations sont fortes : 1580 mm par an à Laguiole; elles augmentent encore avec l'altitude (de 100 mm pour 100 m de dénivelée (Estienne, 1956); soit 1750 mm environ par an pour le Site 2). Elles sont assez régulièrement réparties au cours de l'année. Les mois qui présentent les plus fortes précipitations se situent en automne et hiver (mois d'octobre à janvier) et au printemps (mois de mai); le mois le plus sec est le mois de juillet. Le nombre de jours de précipitations supérieures à 1 mm est de 135 par an. L'été, les orages sont fréquents, rarement accompagnés de grêle.

La neige, par son volume et sa répartition annuelle, représente un élément important du climat. Le nombre total de jours de neige est en moyenne de 44 par an à Laguiole; il augmente encore sur les Monts d'Aubrac : 50 à 60 jours par an. Les chutes, souvent accompagnées de tempêtes, débutent en octobre et ne s'achèvent qu'au mois de mai. Cependant la couverture neigeuse ne s'installe vraiment qu'en décembre et tapisse la montagne durant les mois de janvier et février. Elle se maintient rarement de façon continue durant tout l'hiver : l'herbe jaunie réapparaît par courte période (0 à 20 jours par mois selon les années), du fait des changements de temps et des redoux. Sur l'année, le sol disparaît 2 à 4 mois sous la neige. Quant à la puissance du manteau neigeux, une couche de 30 à 50 cm constitue l'épaisseur normale au dessus de 1000 m (Estienne, 1956).

La neige participe de manière importante au régime des précipitations. Le rapport de l'eau de fusion à la quantité totale de précipitation est estimé à 0,3 pour l'année vers 1100 m; il atteindrait 0,6 à 0,8 pour les mois de janvier à mars (Estienne, 1956). Le rôle de la fonte des neiges se fait sentir sur le régime des cours d'eau qui gonflent durant quelques semaines en avril-mai.

L'humidité ambiante est forte. Elle se manifeste sous différentes formes : par les fréquents orages et l'abondance des rosées matinales en été; par le brouillard qui règne sur les Monts volcaniques et les plateaux orientaux en hiver notamment.

## Les vents

Sur les Monts d'Aubrac et en Viadène, le vent est très fréquent. A dominance nord, il souffle un jour sur deux (Calmels et Coste, 1929). Cette région connaît plusieurs vents locaux : le "Cantalesco", vent continental issu des régions montagneuses du nord, froid et sec, à fort pouvoir givrant, souffle fréquemment et entraîne la rareté des arbres sur les Monts d'Aubrac et les plateaux orientaux; la "Bise", venue également du nord, dessèche les terres en été, amoncelle la neige en congères l'hiver; les vents d'Ouest arrivent jusqu'en Viadène et amènent la pluie sur les versants des monts volcaniques; le vent du sud-ouest, "l'Outo", amène seulement les orages d'été.

## Evaporation et bilan hydrique

La station de Laguiole ne dispose pas de données d'évapotranspiration potentielle (ETP). Nous avons utilisé les données d'ETP (Penman) de la station d'Aurillac située à 42 km au nord-ouest : le diagramme ombrothermique d'Aurillac présente la même allure que celui de Laguiole; d'autre part, les valeurs de déficit d'écoulement annuel moyen, calculé selon Turc (1959), sont comparables pour les deux stations.

Pour Laguiole, la valeur des précipitations annuelles (1580 mm) est très supérieure à celle de l'ETP ainsi estimée (682 mm). A l'échelle de l'année, le bilan hydrique potentiel est largement positif (898 mm). Cependant l'ETP et les précipitations ont une distribution relative variable selon les mois de l'année. Les précipitations sont largement excédentaires d'octobre à mai ; l'infiltration potentielle annuelle est de 961 mm. Les mois de juillet et août présentent un léger déficit hydrique climatique (53 mm et 10 mm) (Fig.I.5).

Des bilans hydriques ont été réalisés (Annexe I.1).

- Dans le cas des sols relativement profonds qui seront étudiés, la réserve en eau utile est de l'ordre de 50 mm. Le déficit d'eau dans le sol est limité aux mois de juillet-août, et il est négligeable : 13 mm.  
- Pour des sols peu épais à réserve utile très faible (20 mm), comme c'est le cas pour certains rankers de l'Aubrac, le déficit hydrique dans le sol est plus important : il atteint alors 33 mm en juillet, 10 mm en août. La réserve utile est reconstituée en septembre.

## Conclusion : influence du climat sur le milieu physique

La zone étudiée se caractérise donc par un climat rude froid et humide (8 mois "froids et humides" [octobre à mai], 4 mois "tempérés" [juin à septembre], selon le climogramme de Péguy). Les facteurs climatiques précédemment décrits exercent une influence importante sur le milieu physique et sur l'activité humaine. Bien que cette influence ne soit pas toujours facile à cerner, on peut cependant en dégager quelques points.

Le ruissellement consécutif aux fortes averses n'est pas caractéristique de ce climat et affecte peu la région; d'autant plus que les sols sont le plus souvent protégés par la végétation; l'érosion qui s'en suit est donc négligeable; les rivières sont toujours claires (et ce d'autant plus que les facteurs floculants sont importants dans le sol).

L'humidité persistante constitue un facteur important qui pourrait notamment favoriser la genèse et la conservation des propriétés andiques des sols développées sur matériaux volcaniques.

Il semble que l'Aubrac subisse encore des conditions favorables au modelage périglaciaire. Certaines formes dues au froid telles les mottes gazonnées seraient actuelles; elles affectent en particulier les sols sur matériaux volcaniques, plus fragiles.

Cependant, l'influence du froid reste difficile à cerner : il est rare que le sol apparaisse à nu; presque partout la couverture végétale le protège efficacement et ce d'autant plus que l'hiver, la neige constitue un manteau isolant efficace. Braun-Blanquet (1951) qui a effectué des mesures en milieu montagnard, rapporte par exemple que, pour une couche de neige de 30 cm, la plus basse température enregistrée au sol était de -5,3 °C contre -16,7 °C à la surface de la neige; sous une couche de 1 m, le minimum au sol n'était que de -0,6 °C. Ainsi le sol échappe-t-il beaucoup aux effets du gel hivernal. Le froid ne fait pas sentir son action bien profondément; même sur les sommets montagneux, la pénétration du gel dans le sol ne dépasse pas une trentaine de cm, exceptionnellement une quarantaine en milieu humide et non enneigé (Estienne, 1956). Au printemps, lorsque la neige disparaît, le fort horizon de radicelles de la pelouse réduit au minimum les possibilités de reptation et de solifluxion.

## 5. Végétation, occupation du sol - Economie

### Végétation, occupation du sol

Selon les principales régions d'Aubrac, la végétation climacique est très variée : depuis l'étage montagnard à série du hêtre présent sur les plateaux orientaux, les Monts d'Aubrac et la partie Est de la Viadène, jusqu'à l'étage méditerranéen à série chêne pubescent dans le pays d'Olt (Dupias et Lavergne, 1968). Nous décrivons ici principalement la végétation et l'occupation du sol autour des sites d'étude, à savoir l'Est de la Viadène et les Monts d'Aubrac.

A l'est de la Viadène, la végétation climacique subsiste en quelques bois isolés où domine la chênaie - hêtraie montagnarde; quelques landes à genêts paraclimaciques sont présentes, notamment aux endroits où la roche est quasi affleurante. Partout ailleurs, s'étendent des prairies mixtes (fauche et pâturage). Telle est l'occupation du sol pour le site d'étude 1 "Puech Roux"; les espèces dominantes sont le liodent douteux, la flouve, le plantain, le trèfle blanc, le nard, le pissenlit, la fétuque, espèces assez représentatives des prairies de cette zone.

Sur la plus grande partie des Monts d'Aubrac comme sur le plateau oriental, la végétation climacique ou paraclimacique subsiste. C'est le domaine des pelouses montagnardes, vastes prairies d'estive - à gentianes jaunes, nard, achillée millefeuille, narcisses,...-, fréquemment parsemées de zones de tourbières. Dans ces zones, la persistance de certaines espèces végétales considérées comme des reliques des périodes

pérglaciaires souligne l'influence du froid actuel.

Sur les versants ouest des Monts, mieux arrosés, deux grands bois, ceux de Laguiole et d'Aubrac, couvrent près de 3000 hectares. Le hêtre y constitue l'espèce exclusive. Vers les hauteurs, près de sa limite altitudinale (environ 1400 m) (Dupias et Lavergne, 1968), la hêtraie prend la forme clairière d'un pré-bois; les hêtres présentent alors un aspect chétif et rabougri et sont groupés en taillis. C'est le cas du site d'étude 2 "Puech Montarquié. Le sous-bois présente alors des gentianes jaunes, des anémones (*pulsatilla sulphurea*), des pensées (*viola lutea*), de la houlque laineuse comme espèces reconnues.

Dans ces deux zones et à fortiori sur les monts volcaniques, les cultures sont rares et localisées au voisinage des agglomérations : céréales (seigle, avoine), maïs, fourrages pour consommation animale en Viadène, et polyculture familiale classique. Le type d'occupation du sol semble très corrélé avec l'altitude : les prairies permanentes sont localisées à des altitudes plus élevées que les prairies temporaires (< 1000 m), tandis que les cultures ne dépassent pas 800 m d'altitude.

## Economie

Plusieurs barrages hydroélectriques existent en Aubrac : au Nord, le barrage de Sarrans; à l'extrémité Nord-Est, celui de Grandval; à l'Ouest, celui de la Couesque, tous trois sur la Truyère; au Sud, celui de Castelnau-Lassouts sur le Lot; en Viadène celui de la Selves. Quelques petites industries sont implantées à Espalion et à St-Geniez-d'Olt. Le thermalisme est pratiqué à Chaudes-Aigues (source d'eau chaude à 83°C). Les sports d'hiver bénéficient des pistes du Puy du Roussillon et de celles des sources du Brameloup, près de Laguiole. L'été, se manifeste un certain courant touristique de caractère familial et résidentiel. Les grands bois des Monts d'Aubrac sont exploités par endroits.

Mais l'activité agricole demeure la ressource fondamentale de cette région. L'Aubrac est avant tout une zone d'élevage bovin de race Aubrac pure ou en croisement Charolais; dominant des vaches allaitantes et des bovins maigres d'embouche, essentiellement des "bourrets d'herbe" (mâles vendus à 18 mois). Il y a peu de bovins lait. La production laitière est orientée vers la fabrication du fromage (Laguiole, Cantal...). En Aubrac, l'exploitation type est de 45 hectares.

Dans cette zone d'élevage bovin, la production fourragère est d'une grande importance dans l'économie agricole. Or, depuis vingt ans, alors que le cheptel a considérablement augmenté, les fourrages n'ont pas suivi la même évolution: la production moyenne est de 4 à 5 tonnes M.S. à l'hectare. La région est ainsi chaque année confrontée à un déficit fourrager qui contraint les agriculteurs à acheter du foin. Face à ce problème, divers organismes agricoles ont mis en place une campagne d'information sur la Viadène et l'Aubrac; intitulée "Fourrages-Mieux Nord-Aveyron", elle vise à "faire produire plus de stocks fourragers pour l'hiver" (12 à 13 tonnes M.S. à l'hectare), par "une meilleure gestion du pâturage au printemps et une fertilisation accrue" (C.D.A.N.A, 1987).

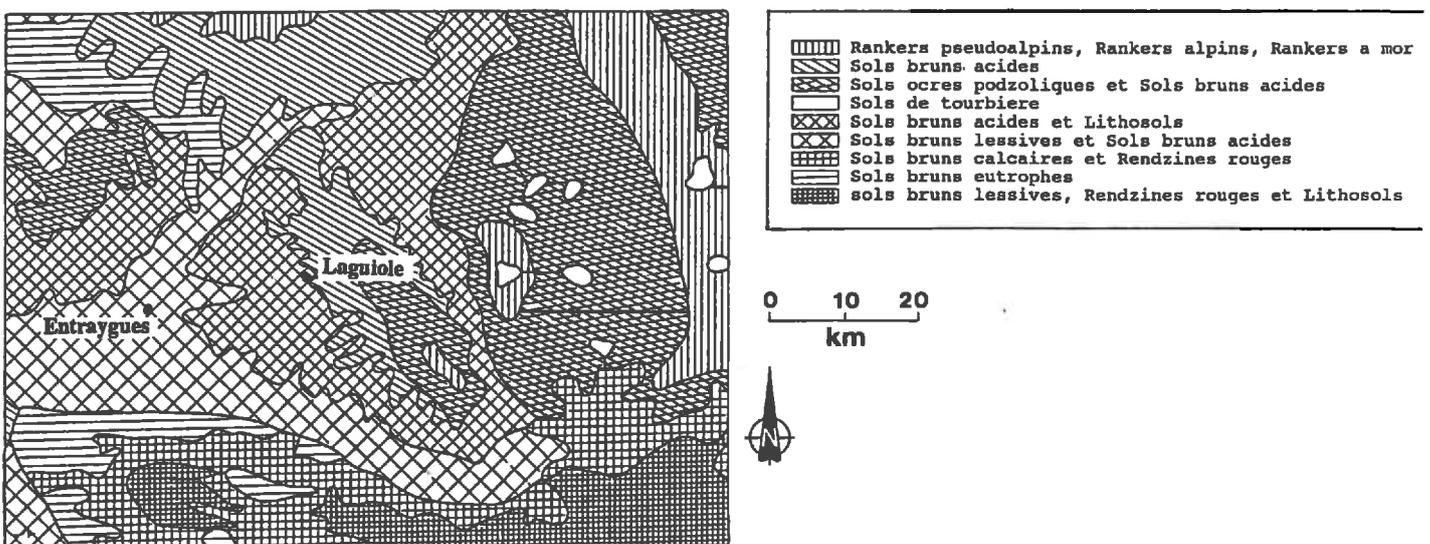


Fig. I.6 : Carte pédologique de l'Aubrac : extrait de la carte pédologique de France au 1/1.000.000; Dupuis, 1966)

## 6. Les sols de la région : données cartographiques et agronomiques disponibles

A notre connaissance, aucune étude pédologique précise n'a été réalisée sur la couverture pédologique de l'Aubrac. Les renseignements dont on dispose sont issus de cartes des sols au 1/1 000 000, celle de France et d'Europe, et de diverses études effectuées par des organismes agricoles de la région.

### 6.1 Les cartes des sols au 1/1 000 000

Sur la *carte pédologique de France au 1/1 000 000* (Dupuis, 1966) (Fig. I.6), les sols de l'Aubrac sont présentés comme : "sols bruns lessivés et sols bruns acides" le long des cours de la Truyère, du Lot, et de La Selve; "sols bruns acides et lithosols" sur la Viadène, une partie des plateaux nord-est et la quasi-totalité du pays des Boraldes; sur les Monts d'Aubrac, selon une altitude croissante, figurent des "sols bruns acides", des "sols ocres podzoliques et sols bruns acides" et des "rankers pseudoalpins, rankers alpins, rankers à mor"; enfin, les mêmes deux dernières unités et "des sols à tourbières" apparaissent sur la partie orientale des plateaux nord-est. Le terme "andique" n'apparaît jamais dans la légende de cette carte.

La *carte européenne des sols au 1/1 000 000* (Tavernier et Louis, 1980-81) (Fig. I.7), plus récente, fait figurer des Andosols ochriques de texture moyenne, en association avec des Andosols humiques, sur l'ensemble des Monts d'Aubrac volcaniques; ces sols font place à des lithosols dystriques sur les plus hauts sommets. La Viadène et la partie occidentale des plateaux nord-est sont occupés par des Cambisols Dystriques.

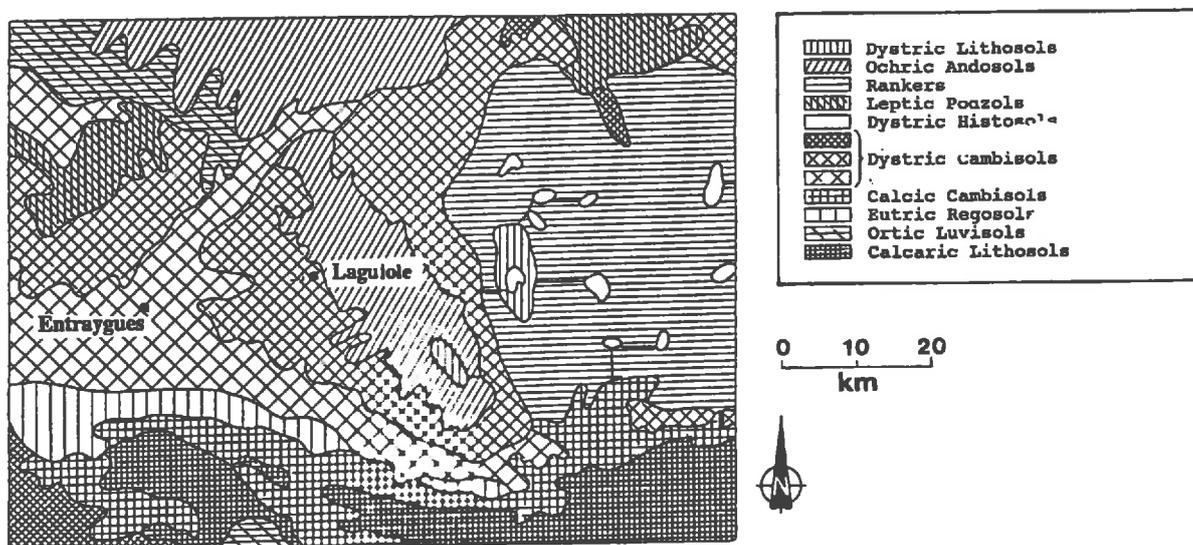


Fig. I.7 : Carte pédologique de l'Aubrac : extrait de la carte pédologique de l'Europe au 1/1.000.000; F.A.O, Tavernier et Louis, 1980-81)

### 6.2 Etudes effectuées par des organismes régionaux

Au niveau régional, il n'y a pas eu d'études pédologiques précises.

Dans les documents divers qui citent le sol, celui-ci est nommé en fonction de son substrat : "sol volcanique", "sol d'origine volcanique", "sol basaltique", "sol sur basalte", pour les sols situés sur substrat basaltique; "sol granitique", "sols sur granite", pour ceux situés sur roches granitiques (Dejou, 1980; Chambre d'Agriculture de l'Aveyron, 1988; C.D.A.N.A, 1988a et 1988b; Balent et al, 1988). Il n'y a pas

de termes de terroirs. Pour désigner leurs sols, les agriculteurs se réfèrent eux aussi à la roche sous-jacente. Ils parlent parfois de "terres noires" pour les sols situés sur basaltes, sols qu'ils tiennent généralement pour plus riches, mais aussi pour "plus fragiles" que les sols situés sur granite (notamment vis à vis de la compaction par les engins agricoles).

Des études ponctuelles, concernant directement le sol, ont cependant été menées, notamment par le Comité de Développement Agricole Nord-Aveyron (C.D.A.N.A.). De 1978 à 1986, cet organisme a effectué des analyses de la couche superficielle (2-15 cm), et ce, essentiellement sous prairies. Une synthèse des données disponibles a été réalisée par type de sol, à savoir "sols sur basalte" et "sols sur granite", d'abord par Dejou (1980) puis par le C.D.A.N.A. (1988a, 1988b). Nous présenterons ici succinctement les résultats en conservant la terminologie des auteurs.

### 6.2.1. Les Sols sur Basaltes

Le tableau I.1 présente les moyennes des 186 analyses effectuées par le C.D.A.N.A.; 80 % sont sous prairies permanentes.

Ces sols de profondeur variable (25 à 70 cm) sont riches en matière organique (M.O.>10 % pour 70 % des cas), supposés bien pourvus en "phosphore" ( $P_2O_5$  Dyer>150 ppm pour 78 % des cas), en "potasse" ( $K_2O$ >120 ppm pour 84 % des cas) et en "magnésie" ( $MgO$ >120 ppm pour 90 % des cas). "Le gros point faible est l'acidité des sols" : alors qu'un pH de 5,7 est considéré comme minimum souhaitable pour une prairie naturelle et un pH de 6,2 comme nécessaire pour des sols cultivés (C.D.A.N.A., 1988a), 91 % des sols ont un pH inférieur à 6,2, et 62 % présentent un pH inférieur à 5,7. Par ailleurs ces sols présentent une forte capacité de rétention pour l'eau (50 à 40 %). Des relations nettes apparaissent entre certaines variables. Ainsi, le pourcentage de matière organique augmente avec l'altitude, tandis que la capacité de rétention pour l'eau est fortement corrélée à la teneur en matière organique (Dejou, 1980).

Ces propriétés chimiques sont comparables à celles des "autres sols volcaniques" du Massif Central Français (Cantal, Haute-Loire, Puy de Dôme).

### 6.2.2. Les Sols sur Granite

238 analyses ont été effectuées par le C.D.A.N.A. (dont 11 % sous prairies permanentes, 89 % sous prairies temporaires et cultures) (Tab. I.1). Ces sols dont la profondeur varie de 25 à 60 cm, sont correctement pourvus en matière organique (M.O.>3 % pour 89 % des cas), en "phosphore" (pour 81 % des cas), en "potasse" (pour 83 % des cas), en "magnésie" (pour 72 % des cas). Par contre, 53 % des sols ont un pH eau inférieur à 6,2; 23 % ont un pH eau inférieur à 5,7. En ce qui concerne les oligo-éléments, 50 % des sols présentent des déficiences en cuivre, 39 % en zinc (C.D.A.N.A., 1988b). Par ailleurs ces sols présentent une capacité de rétention pour l'eau de l'ordre de 20 % (Dejou, 1980).

Tab. I.1 : Synthèse des analyses de la couche superficielle de sols sur basalte et sur granite

Source bibliographique		C.D.A.N.A., 1988					DEJOU, 1980	
Analyses de la couche superficielle (2-15 cm)		M.O. %	A %	pH	$P_2O_5$ Dyer ppm	$K_2O$ ppm	$MgO$ ppm	capacité de rétention % terre fine
SOLS SUR BASALTE (*)	moyenne	12,8	17	5,6	310	237	412	44,9
	écart-type	4,7	7,5	0,39	189	143	301	—
	effectif	186	143	184	186	186	164	27
SOLS SUR GRANITE (**)	moyenne	4,86	15,8	6,06	328	235	184	20,8
	écart-type	2,95	5,9	0,53	230	114	107	—
	effectif	238	225	238	206	238	226	16
Minimum admis pour un bon rendement (CDANA,1988)				5,5 6,2	150	120	120	

(\*) 80 % des prélèvements sont faits sous prairies permanentes, 16 % sous prairies temporaires, 4 % sous culture.

(\*\*) 11 % des prélèvements sont faits sous prairies permanentes, 89 % sous prairies temporaires ou cultures.

## Conclusion

Finalement, il ressort de cette revue bibliographique que les sols de la région, nommés selon leur substrat, sont décrits exclusivement par des analyses de terre de la couche superficielle.

Le problème majeur cité est alors l'acidité et ce, pour les deux types de sol, mais plus particulièrement pour les sols sur basalte. L'accent est mis sur "l'intérêt" de la fertilisation pour améliorer la chimie du sol et ainsi augmenter la production fourragère.

Du point de vue cartographique, les seuls documents disponibles sont au 1/1 000 000. Les autres aspects du sol : morphologie, comportement physico-hydrigue, évolution en fonction des pratiques agricoles, etc..., n'ont pas été abordés dans cette région.

## **Chapitre II**

# **Analyse bibliographique : les caractères généraux des séquences associant les andosols à d'autres types de sols, dans le Massif Central Français**

Une analyse bibliographique des travaux précédemment réalisés par d'autres chercheurs sur les sols volcaniques du Massif Central français, nous a permis de dresser un tableau synthétique des divers types de séquences associant des andosols à d'autres types de sols, bruns acides et podzols en particulier.

Nos propres observations acquises lors de la phase de prospection de terrain préalable au choix des deux sites qui seront finalement retenus, nous ont aidés à compléter ce tableau.

### **1. Les facteurs principaux de l'andosolisation en régions tempérées (Hétier, 1975; Moinereau, 1977)**

#### **Les conditions pédoclimatiques**

Comportant à la fois l'humidité et le drainage, elles sont liées, dans les régions tempérées, à l'altitude qui régit en grande partie le régime hydrique. "L'andosolisation" est favorisée par la 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 des stations où l'évapotranspiration reste toujours faible : c'est le cas du régime climatique de l'étage montagnard, surtout sous couvert forestier, et aux expositions fraîches.

#### **Les caractères physiques et chimiques de la roche-mère**

De ces caractères dépend notamment la teneur en minéraux amorphes. "Les conditions climatiques étant modérées, l'influence des différents facteurs d'altérabilité des roches mères se fait sentir de façon plus sensible que dans les conditions climatiques extrêmes". Ainsi, la composition chimique et physique des roches volcaniques est, en climat tempéré, une condition importante dans le degré et le type de processus conditionnant le "degré et le style de l'andosolisation" (Hétier, 1975).

L'état de division extrême des projections aériennes et des scories accélère l'altération et favorise l'andosolisation tout en n'étant absolument pas une condition nécessaire (Hétier, 1975; Moinereau, 1977). L'acidité de la roche limite l'intensité de l'altération et, oriente vers les processus de podzolisation alors que les roches volcaniques basiques (à minéraux calciques et ferromagnésiens abondants) sont plus rapidement sensibles à l'altération biochimique et favorisent ainsi l'andosolisation.

#### **Le facteur temps : l'âge des matériaux et la durée de la pédogenèse**

Ce point sera détaillé lors de la présentation des chronoséquences (§ 4), le facteur temps jouant un rôle très différent selon la région du Massif Central considérée.

## 2. Lithoséquences

### 2.1 Sols à propriétés andiques sur roches volcaniques basiques - Sols bruns acides sur roches pauvres en bases, acides (granites ou roches métamorphiques)

Ce type de séquence où figurent deux familles de substrat totalement différentes est fréquent en Aubrac. Il correspond aux terminaisons de coulées volcaniques, au contact affleurant socle-roches volcaniques. Le passage s'effectue sur une distance de l'ordre d'une dizaine de mètres. Toutes les séquences de ce type présentent des caractéristiques spécifiques communes.

Au plan géomorphologique, une rupture de pente accentuée marque le plus souvent le contact entre les deux formations géologiques et par suite entre les sols qui se sont développés au dessus. La coulée basaltique s'est épanchée sur le socle granitique préexistant et sa terminaison est marquée par un net abrupt. Cette disposition entraîne une contamination des sols aval par les sols amont. Une zone géologique et pédologique complexe figure au contact granite-basalte (mélange de matériaux géologiques, altération complexe...). Dans ces situations, les sols développés sur basaltes, toujours situés avant la forte rupture de pente, sont peu épais et apparemment peu développés.

L'un des sites d'étude choisis : le site 1 "Puech Roux" présente une séquence de ce type

### 2.2 Séquence Andosols - Sols podzoliques sur roches volcaniques respectivement basiques et acides

Selon Hétier (1975) et Quantin (1982), les sols développés sur roches volcaniques acides (rhyolites, trachytes) montrent des caractères podzoliques marqués. Il serait donc envisageable de trouver des séquences andosols - sols podzoliques, dans les sites de contact de roches volcaniques basiques et de roches volcaniques acides. La coexistence de ces deux types de roches suppose une région volcanique à série magmatique différenciée (depuis des termes moins alcalins et moins riches en silice vers des termes plus alcalins et plus riches en silice). Ce n'est pas le cas de l'Aubrac où la série magmatique est peu différenciée et où ne figurent que des roches volcaniques basaltiques (chap.I).

La Chaîne des Puys, le Cézallier, le Mont-Dore sont, par contre, des districts différenciés où coexistent basaltes et rhyolites ou trachytes. Cependant, "les affleurements de roches volcaniques acides (rhyolites) susceptibles de donner naissance à des sols sont relativement rares dans le Massif Central" (Hétier, 1975) : les émissions de laves différenciées, acides correspondent aux phases initiales des éruptions volcaniques et apparaissent donc stratigraphiquement à la base des séries de coulées. Elles sont donc rarement affleurantes, "souvent recouvertes de colluviums divers" (Hétier, 1975); elles peuvent cependant être dégagées en croupe par des cours d'eau. Alors se développent sur ces roches des sols ocres podzoliques à podzoliques (Hétier, 1975).

Par ailleurs, la position relative des roches volcaniques acides (à la base des séries volcaniques) et des roches volcaniques basiques (au sommet des séries) rend peu probable leur contact direct; il existe plutôt toute une gradation d'un terme à l'autre, donc toute une gradation entre les sols podzoliques et les andosols, susceptibles de se développer au dessus. Par suite, les parts respectives des influences pédologiques et des influences lithologiques dans la nature et les propriétés des sols dans de telles séquences seraient difficiles à déterminer.

A notre connaissance, aucun exemple concret de ce type (séquence Andosols/Sols podzoliques sur roches volcaniques basiques et acides) n'a été décrit dans la bibliographie. Il est fort probable que de telles séquences soient rares dans la nature. Ainsi en Aubrac, sur roche volcanique basique, même sous végétation acidifiante (forêt de résineux...) reconnue comme plus favorable à la podzolisation, les sols ne présentent pas de caractères podzoliques marqués (présence d'horizons Ae ou Bs ou Bh), mais toujours des caractères andiques dominants. Les séquences andosols - sols podzoliques ne semblent donc pas se réaliser sur roches volcaniques basiques, au moins dans les mêmes conditions topoclimatiques. Ceci est peut-être à attribuer au fort pouvoir tampon des andosols. Il est cependant possible qu'en Aubrac, ces forêts de résineux non naturelles aient été implantées à une période relativement récente, et que par suite, le sol n'ait pas eu le temps d'évolution nécessaire à l'apparition de caractères qui seraient plus "en équilibre" avec le milieu de résineux actuels.

Quant aux séquences andosols - sols bruns acides sur même substrat, elles sont probablement impossibles; elles n'ont à notre connaissance jamais été citées dans la bibliographie.

### 3. Séquences altitudinales

#### 3.1 Sur roches volcaniques basiques

En Aubrac, les séquences altitudinales sur matériaux volcaniques basiques, semblent du même type que celles décrites par Moinereau (1974) dans le Velay - Vivarais, et Hétier (1975) dans le Cantal et la Chaîne des Puys.

Pour le Velay - Vivarais, en zones non cultivées, Moinereau (1974) décrit la séquence altitudinale suivante :

- Andosols humiques aux altitudes supérieures à 1000 m;
- Sols Andiques entre 800 et 1000 m;
- Sols brunifiés peu humifères au dessous de 800 m.

Cette zonation présente des exceptions :

- selon l'action de l'homme, notamment la mise en culture : celle-ci tend à relever les limites altitudinales : sols andiques sur les plateaux cultivés ardéchois à 1200 m; sols bruns sur les planèzes cultivées du Velay à 1000 m, par exemple;
- selon l'âge et l'état plus ou moins divisé de la roche mère : par exemple, andosols sur scories du quaternaire récent à 800 m dans le Velay - Vivarais.

Dans le Cantal, Hétier (1975) note la répartition générale : Andosols, puis sols bruns andiques, puis sols hydromorphes ou tourbières selon des altitudes décroissantes. Dans la Chaîne des Puys, il propose le schéma suivant : andosolisation au dessus de 1100 m; andosolisation encore possible mais également présence de sols bruns entre 1100 m et 600 m; absence d'andosolisation, brunification au dessous de 600 m.

Sur les Monts d'Aubrac volcaniques, la séquence la plus fréquente le long d'un versant semble être selon une altitude décroissante : rankers andiques sur les sommets; andosols humiques; sols hydromorphes ou tourbières, soit à peu près le même type que dans le Cantal (Hétier, 1975). Le second site d'étude choisi : site 2 "Puech Montarquié", appartient à ce type.

Sur de plus longues distances, selon des altitudes décroissantes, les sols, de type andosol sur les sommets de l'Aubrac, deviennent de moins en moins humifères et tendent de plus en plus vers des sols bruns.

#### 3.2 Sur roches volcaniques acides

Il n'y a pas d'exemples de telles roches dans l'Aubrac. Dans la Chaîne des Puys, Hétier cite la séquence altitudinale suivante : sol ocre podzolique à 1470 m et passage rapide à des sols bruns acides à des altitudes inférieures.

### 4. Chronoséquences

Comme le souligne Hétier (1975), on doit distinguer l'influence de l'âge des matériaux d'une part, et celui de la durée de la pédogenèse d'autre part.

#### L'âge des matériaux

L'âge des matériaux sur l'andosolisation, n'a d'importance que dans la mesure où interviennent des transformations intrinsèques qui se répercutent sur l'évolution du sol, par exemple des transformations minérales de la roche mère, susceptibles de changer le cours ultérieur de la pédogenèse : c'est ainsi le cas des altérations préglaciaires (antéwürmiennes) qui ont donné aux matériaux du Cantal (Hétier, 1975) ou de l'Aubrac le temps de se transformer partiellement en minéraux argileux. Ceux-ci sont alors présents sous

forme héritée dans les sols actuels. Leur existence ne devrait donc pas être attribuée à la pédogenèse actuelle (Hétier, 1975).

Moinereau (1974) signale cependant une influence de l'âge des matériaux dans la répartition altitudinale des sols.

## La durée de la pédogenèse

La durée de la pédogenèse est fonction du dernier événement qui a provoqué l'érosion du sol précédent et un nouveau départ de pédogenèse. Cette durée est donc très variable et difficile à estimer (Hétier, 1975). Dans l'Aubrac, comme dans le Cantal, les sols des Monts volcaniques ont été érodés et/ou profondément remaniés (moraines) par les glaciers. Par conséquent, la pédogenèse actuelle ne débute probablement qu'après la période glaciaire : son "démarrage" peut ainsi être fixé à -10 000 à -12 000 ans; les sols actuels ayant probablement hérités par ailleurs d'éléments des phases de pédogenèse antérieure (voir § a).

Dans la chaîne des Puys où de nombreuses données géochronologiques sont disponibles, Hétier (1975) introduit la notion de durée d'andosolisation en fonction du temps :

L'évolution serait faible en moins de 1500 ans;

Une période de 4000 à 6000 ans serait nécessaire pour arriver au degré d'andosolisation maximum (résultats analogues à ceux des Japonais mais durée supérieure à celles obtenues sous climat tropical (Quantin, 1974)).

La période de stabilité du degré d'andosolisation maximum ne dépasserait pas 2 000 à 3 000 ans. Sur des sols vieux de 8 000 à 12 000 ans (ce serait le cas des sols de l'Aubrac : post-glaciaires : 11 800 ans), on verrait apparaître une évolution soit vers la brunification, soit vers la podzolisation (caractères crytopodzoliques des Andosols de l'Aubrac).

Hétier (1975) montre que pour le Cantal, le facteur temps n'est pas limitant. En effet, "si on situe le début de la pédogenèse des sols actuels à 10 000 à 12 000 ans (comme dans l'Aubrac), les composés organiques les plus anciens n'ayant guère plus de 4 000 ans, il semble bien que ces sols soient dans une phase de leur évolution correspondant à un équilibre établi depuis longtemps". De plus, il note que, "si l'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 doivent aborder une deuxième phase pédogénétique : la brunification". Toujours selon Hétier, "les deux phases d'évolution" andosolisation - brunification, "ne seraient peut être pas spécifiques aux andosols du Cantal, car il est bien possible que l'andosolisation ait correspondu aux conditions climatiques plus sévères du Tardiglaciaire.

## 5. Conclusion

Finalement, il apparaît de cette reconnaissance de terrain et de cette revue bibliographique que les séquences où figurent des andosols dans le Massif Central sont principalement de deux types :

- soit *des séquences altitudinales*. Le facteur de variation extrinsèque est alors l'altitude qui conditionne elle-même la pluviométrie, la température, le bilan hydrique, la roche-mère restant identique (volcanique basique). Se développent alors, selon des altitudes décroissantes : andosols - sols bruns andiques - sols bruns ou sols bruns hydromorphes;

- soit *des lithoséquences*. Le facteur de variation est alors la roche-mère, les conditions topoclimatiques restant par ailleurs similaires. C'est le cas des séquences : sols à propriétés andiques - sols bruns acides (et/ou sols podzoliques) respectivement sur roches volcaniques basiques et sur roches acides pauvres en bases (granite, micaschistes, éventuellement roches volcaniques acides).

C'est dans ce dernier cas que coexistent sur de courtes distances les sols que nous avons à comparer : sols andiques sur basalte, sols bruns acides sur granite.

# Chapitre III

## Approche macromorphologique

### Séquences et volumes de référence

#### Introduction

L'objectif de ce chapitre est de resituer les sols dans le paysage et de définir les volumes pédologiques dont l'organisation et le comportement physico-hydrique seront particulièrement étudiés et qui seront nos volumes de référence.

Après une reconnaissance régionale de la répartition des 2 types de sol : sols andiques et sols bruns acides, 2 sites ont été sélectionnés dans la partie centrale de la région Aubrac (Fig.I.2).

L'un est en limite Viadène - Monts d'Aubrac, entre 952 et 972 mètres d'altitude, sur socle granitique recouvert à l'amont par une coulée volcanique (Fig.I.4). Il comprend des sols andiques peu épais et des sols bruns acides plus ou moins épais. Il donnera lieu à la sélection de huit volumes de référence. Ceux-ci sont resitués dans le paysage par l'établissement d'une séquence dite "Séquence Puech Roux".

Le second site est localisé sur les Monts d'Aubrac volcaniques, soit en milieu exclusivement volcanique, entre 1262 et 1280 m d'altitude (Fig.I.4). Les sols sont tous à caractères andiques. Six autres volumes seront sélectionnés. Ils sont ici resitués dans le paysage par l'intermédiaire d'une séquence dite "Séquence Montarqué".

#### Démarche suivie

Sur chacun de ces sites, une prospection à la tarière selon un transect le long de la pente a permis de faire un inventaire des différents volumes pédologiques, et d'appréhender leur mode de successions latérale et verticale. Le levé topographique de chaque transect a été réalisé à l'aide d'un clisimètre et d'un topofil. L'étude fine de profils sur fosse a permis de compléter la description des volumes. Les échantillonnages nécessaires aux études ultérieures ont été effectués sur ces profils.

Pour chaque séquence, après une description géomorphologique et géologique rapide du site, nous présenterons la description des différents volumes puis leur répartition le long de la séquence.

## 1. Séquence Puech Roux

Ce premier site est localisé à 8 km à l'Ouest de Laguiole, entre Laguiole et Soulages-Bonneval, près d'Olhou. Il s'agit d'un versant exposé Nord-Est, occupé par une prairie naturelle mixte, qui culmine à 973 m au "Puech Roux". La séquence est établie sur 420 m de long pour une dénivelée totale de 20 m. La pente générale de 5 % en moyenne, est irrégulière et présente un profil convexo-concave (Fig. III 2). Deux ruptures de pente majeures marquent ce profil topographique et séparent 3 domaines. L'amont de la séquence sur 230 m présente une pente moyenne faible (2,6 %) comprenant une rupture assez discrète (4,4 %) à 138 m du sommet. Une rupture de pente importante (15 %) marque la fin de cette zone amont et le début de la zone dite de transition qui s'étend sur 40 m selon une pente moyenne de 5 %. Une seconde

rupture de pente importante (16 %) marque la fin de cette zone de transition et le début de la zone aval qui s'étend selon une pente régulière de 7 % sur les 150 m aval de la séquence.

Ce versant présente 2 grands types de substrat (Fig. I.4). La partie amont est située sur basalte sain. La partie aval est située sur une arène du granite de la Margeride, présentant ici un faciès à cordiérite. Entre les deux, dans la zone de transition, le substrat est complexe. Depuis l'amont vers l'aval : le basalte sain et en prismes devient en quelques mètres plus altéré et débité en petites boules (type pillow-lavas) séparées par une matrice limono-argileuse. Puis s'étend une zone où sont mêlés à la fois des volumes d'origine granitique (quartz, feldspath), discontinus et de faciès divers : couleur rouge et compact, gris et plus argileux, ou ocre vif, et des éléments d'origine volcanique (bombes volcaniques, notamment) (Fig.III.1) .

Une description morphologique des volumes principaux du substrat est donnée dans le tableau III.1. Les analyses chimiques du basalte sain et du granite figurent dans le tableau III.2.

Un transect a été réalisé le long de la pente par sondages à la tarière et 2 tranchées F1 et F2 ont été ouvertes. La tranchée F1 est implantée à la limite de la zone amont et de la zone de transition; on distinguera *au sein de cette tranchée* (Fig.III.3), deux parties nommées : fosse F1A à l'amont sur le basalte sain, et fosse F1B vers l'aval, sur l'altérite de basalte. La tranchée F2 est elle, ouverte dans la zone aval de la séquence, sur granite. Une série de sondages complémentaires à la tarière a été réalisée entre les tranchées. 11 volumes, dont 8 présents au niveau des tranchées F1 et F2, sont distinguables à la tarière. Les observations fines menées sur ces tranchées elles-mêmes ont permis de subdiviser certains volumes sur la base de leurs caractères structuraux. 15 volumes sont ainsi définis au total.

Tab. III.2 : Analyses chimiques des substrats de la séquence Puech Roux : basalte amont et arène granitique aval.

Eléments en %	site Puech ROUX	
	GRANITE aval	BASALTE 1 amont
SiO <sub>2</sub>	70,42	48,29
TiO <sub>2</sub>	0,43	2,94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,33	16,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	1,64	11,32
MnO	0,014	0,16
MgO	0,41	4,29
CaO	0,22	7,97
Na <sub>2</sub> O	1,85	4
K <sub>2</sub> O	5,28	1,79
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,75
H <sub>2</sub> O+=P.F	2,73	2,03
H <sub>2</sub> O-	1,1	1,6
<b>Total sans eau</b>	<b>95,77</b>	<b>98,3</b>
<b>Total avec P.F</b>	<b>98,5</b>	<b>100,33</b>

## 1.1. Description macromorphologique des volumes

### Le volume brun très foncé limoneux, V1 <sup>1</sup>

C'est le volume de surface caractéristique de toute la partie amont de la séquence. Son épaisseur varie de 10 à 30 cm

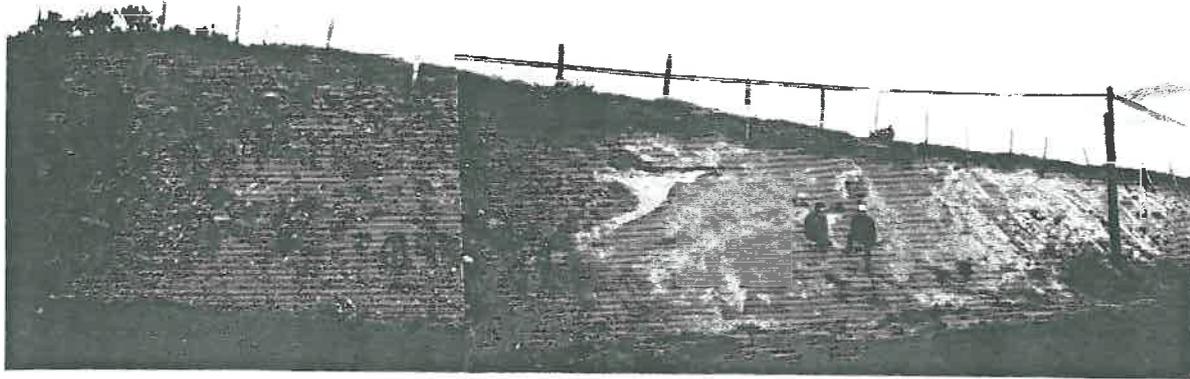
De couleur brun très foncé 10 YR 2/2, devenant brun foncé à brun à l'état sec (10 YR 3/3 à 4/3), il est très riche en matière organique bien humifiée. Sa texture est limoneuse faiblement sableuse avec des sables fins basaltiques. Le toucher est doux. Il devient poudreux à l'état sec. Il contient 15 à 25 % de

<sup>1</sup> Les volumes V1a et V1b correspondent respectivement aux volumes de référence K1, K2 (voir § 1.3).

SO

NE

a



1 m

b

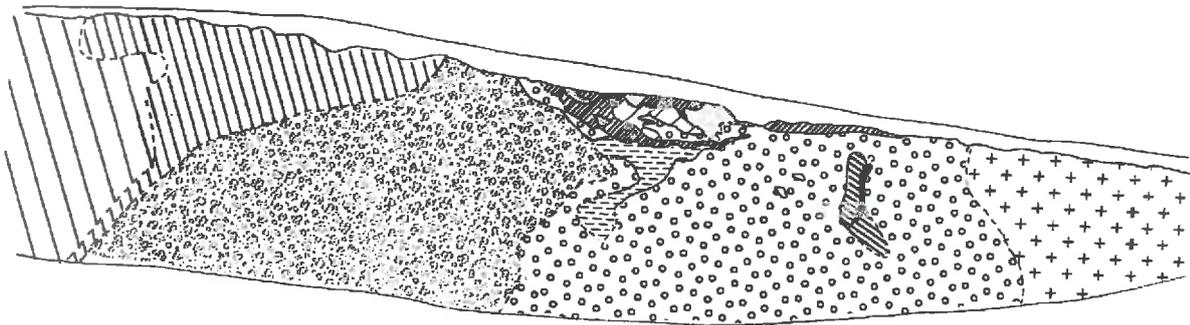


Fig. III.1 : Substrats variés de la séquence 1 Puech Roux (observés en coupe de route)  
a. Photographie; b : schéma correspondant (légende : voir tableau III.1)

légende n° volume	NOM	COULEUR	TEXTURE	MODE D'AFFLEUREMENT	ELEMENTS GROSSIERS	SITUATION	
						verticale	latérale
I.a	Basalte sain en prismes	A sec : gris foncé 2,5Y3,5/0 à cortex brun jaune et patine brun-jaune 10YR 5/6	lithique	prismes séparés par fissures	100%	20-30 cm à ...	amont
I.b	Basalte en écailles dans fissures et prismes très fracturés	A sec : gris clair 10YR 5/1 à cortex en liseré gris clair à blanc	lithique	calicoux aplatis, anguleux remplissant ou bordant fissures entre prismes	100%	2m à ...	amont/ transition
I.d	Basalte en boules "pillow-lavas" (80%)	A sec : gris 7,5YR 5 à 6/0 à cortex en liseré gris-clair à blanc.	lithique	boules 5 à 10 cm (80%) à croûte se desquamant, séparées par I.c	80% du total "I.d + I.c"	30 cm à ...	amont/ transition
I.c	Volumes meubles rouge-jaune entre basaltes altérés (20%)	fraîs : rouge-jaunâtre 5YR 4/6 à 6/8	AL à LA	matrice dans fissures et autour des boules de basalte pillow-lava	0%	30 cm à ...	amont/ transition
II.f	Arène jaune-rougeâtre sableuse	fraîs : jaune rougeâtre à jaune-brunâtre 7,5YR à 10YR 6/8	SLa	"encaissant" de la zone de transition	40% de gravillons de quartz et de gravillons blancs quelques bombes volcaniques	30 cm à ...	transition
II.d	Arène grise argileuse	fraîs : gris-brunâtre clair 2,5Y6/2	ALS	Volume discontinu en large bande irrégulière verticale à oblique	20% gravillons de quartz 10% gravillons blancs friables	1 à 1,5 m à ...	transition
II.a	Arène blanche diacrasée	fraîs : gris-pâle 10YR 7/2	induré ALS	Volume discontinu avec diacrasas remplies de substrat II.g	gravillons de quartz	40/50 cm à 1/1,5 m	transition
II.l	Arène grise sableuse	gris	S	discontinu en poches concaves vers le haut	gravillons de quartz	30 cm à 1/1,5 m	transition
II.g	Volume bordeaux induré	fraîs : rouge-pâle à jaune-rouge dominant 2,5YR à 5YR 6/6, traînées gris-pâle	induré ALS	discontinu ; forme irrégulière	40-50% gravillons de quartz	30 cm à 1/1,5 m	transition
II.g'	Volume rouge induré	fraîs : rouge 2,5 YR 5/8	induré A	discontinu ; en large bande irrégulière oblique	gravillons de quartz gravillons blancs friables	1m à ...	transition
II.h	Volume bordeaux foncé en plaquettes	rouge-jaunâtre 5YR 5/6 : à patine jaune-rouge ou rouge 5YR6/8 et 2,5YR 4-5	lithique	volume de 10 cm de large associé à II.g' en plaquettes feuilletées	rare gravillons de quartz	1m à ...	transition
III	Arène granitique "classique"	gris-clair (5YR 7/1) à brun-rougeâtre clair (5YR 6/3)	graveleuse à sableuse	en arène à structure conservée diacrasée; toit ondulé	Feldspath, quartz, micas, cordiérite	30 à ...	transition et aval

Tab. III.1 : Description morphologique succincte des volumes-substrats observés en coupe de route pour la Séquence Puech Roux. (les figurés des cartouches présentent la légende de la Fig. III.1)

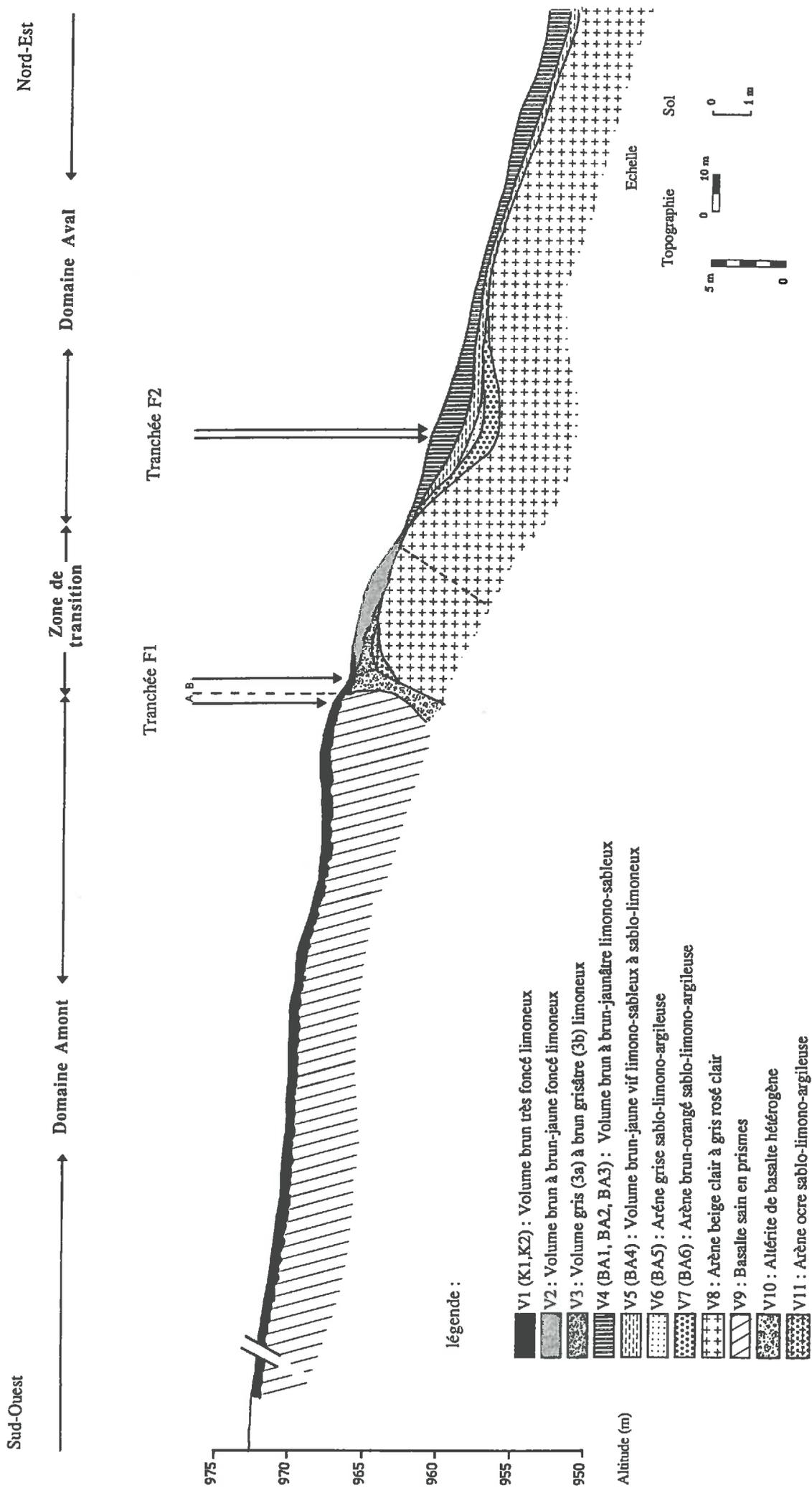


Fig. III.2 : Séquence 1 Puech Roux : Distribution bidimensionnelle des volumes

graviers et cailloux de basalte peu altérés. La structure est nettement microagrégée, très fine. La porosité est très importante (75 %), surtout inter-microagrégats et très fine. Il existe aussi une porosité tubulaire fine correspondant aux racines. Les racines sont nombreuses à très nombreuses, essentiellement très fines. La réaction au test de Fieldes et Perrott<sup>1</sup> est vive et rapide.

Sur la tranchée F1, ce volume pédologique V1 a été subdivisé en 3 volumes V1a, V1b, V1c différenciés essentiellement par la présence ou non d'une sur-structure polyédrique et la densité de l'enracinement.

#### Le volume V1a

La structure microagrégée ne présente pas de sur-structure. Le chevelu racinaire est dense et très fin. Ce volume V1a constitue le volume majeur sur basalte sain.

#### Le volume V1b

Il diffère peu du volume précédent V1a si ce n'est par sa couleur légèrement moins foncée (10 YR 2,5/2,5), son caractère thixotropique, la présence d'une sur-structure polyédrique subanguleuse fine peu nette surimposée à la structure microagrégée et un enracinement un peu moins dense; ces deux derniers caractères lui conférant une porosité un peu plus faible que pour le volume V1a.

C'est un volume discontinu sur basalte sain (fosse F1A) où il est bien représenté entre les blocs et pierres qui constituent le sous-débit des prismes de basalte, dans des espaces concaves de forme diverse, suffisamment larges (plus de 10 cm). Il est par contre continu sur basalte altéré et c'est alors le seul volume organo-minéral (fosse F1B).

#### Le volume V1c

Ses caractéristiques sont identiques à celles du volume V1b, excepté le chevelu racinaire : celui-ci est extrêmement dense et constitue plus de 50 % du volume ; les racines, très fines, tapissent la roche.

Ce volume est présent sur l'ensemble du profil sur basalte sain (fosse F1A). Il est très peu représenté; sa disposition est particulière, très reliée à la présence de la roche : il constitue un liseré de 1 cm moulant la face supérieure des prismes de basalte et est également présent dans les fissures étroites (1 à 3 cm) entre les blocs et pierres qui constituent le sous-débit des prismes de la roche.

Sur basalte sain (fosse F1A), les 3 volumes sont présents; sur altérite du basalte (fosse F1B), on observe seulement le volume V1b (Fig. III.3).

#### Le volume brun foncé limoneux, V2

C'est le volume de surface de la zone de transition. Il diffère assez peu du volume V1, avec lequel la transition est graduelle. Il n'a été observé qu'en sondage à la tarière.

C'est un volume de couleur brun (à brun-jaune) foncé 10 YR 3/3 (à 3/4), devenant brun à brun-jaune à l'état sec 10 YR 5/3 à 5/4, très organique. Sa texture est limoneuse très faiblement argileuse et très faiblement sableuse à sables fins basaltiques. Il contient 15 à 25 % de graviers de basalte peu altéré. Contrairement au volume V1, il n'est pas poudreux à l'état sec.

#### Le volume gris à brun grisâtre, V3

Il est présent dans la zone de transition, sous le volume V2. Il n'a été observé qu'en sondage à la tarière.

Il est caractérisé par sa teinte dominante grise plus ou moins brunâtre. Il présente des taches brun-jaune à brun vif 7,5 YR 5/8 à 10 YR 6/8 plus sableuses (sables fins) issues probablement d'éléments grossiers altérés; et de rares volumes blanchâtres poudreux. Sa texture est limoneuse à limono-sableuse faiblement argileuse. Il contient 20 à 40 % d'éléments grossiers essentiellement sous forme de gravillons brun vif de nature indéterminée et de quelques graviers de basalte gris clair altéré. Selon les variantes de couleur, on peut distinguer 2 volumes V3a et V3b.

Le volume V3a a une couleur gris très foncé à brun-gris foncé 10 YR 3/1 à 10 YR 4/2 humide, devenant gris à gris-clair à gris-brunâtre clair 7,5 YR 5/0 à 10 YR 6 à 7/2 à l'état sec.

Le volume V3b a une couleur brun gris (à brun) 10 YR 5/2 (à 5/3) humide, devenant brun grisâtre à gris brunâtre clair 2,5 Y 5/2 à 4/2 à l'état sec.

<sup>1</sup> Ce test de Fieldes et Perrott (1966) est utilisé classiquement pour mettre en évidence la présence de matériel amorphe dans le sol.

NE

SO

Fosse F1B  
Ranker andique sur altérite du basalte

Fosse F1A  
Ranker andique sur basalte sain

Echelle : 0 50 cm

0 cm

50

100

150

200

250

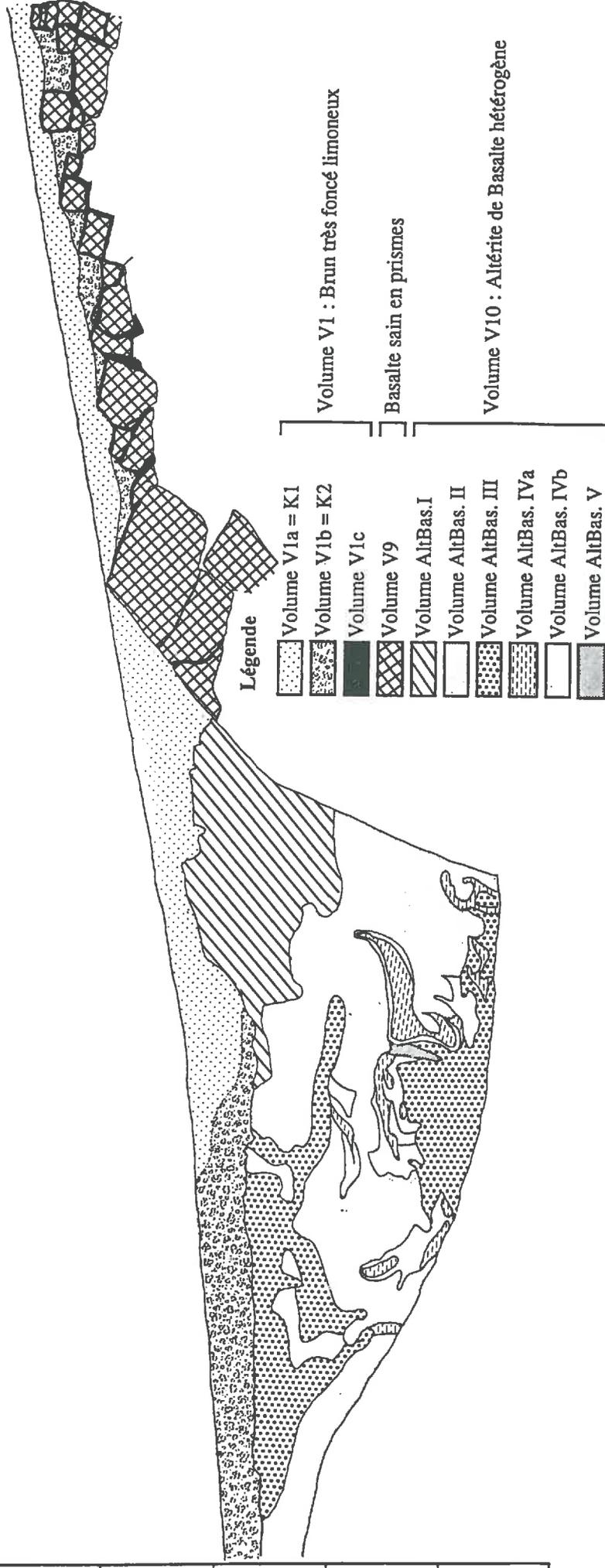


Fig. III.3 : Schéma de la tranchée F1 : Rankers andiques sur basalte sain (F1A) et sur altérite de basalte (F1B)

- Description morphologique des volumes pédologiques et des principaux volumes du substrat : voir tableau III.3 -

## Le volume brun à brun-jaunâtre limono-sableux V4 <sup>1</sup>

Il est caractéristique des sols bruns acides de la zone aval. Ce volume est d'épaisseur très variable : 10 à 75 cm.

C'est un volume organo-minéral de couleur brun à brun-jaunâtre 10 YR 5/3 à 10 YR 5/4 humide, devenant brun pâle à brun jaunâtre pâle 10 YR 6/3 à 6/4 à l'état sec. Sa texture est limono-sablo-argileuse à limono-argilo-sableuse avec des sables grossiers de quartz et de micas. Il présente en moyenne 10 à 20 % d'éléments grossiers sous forme de gravillons de quartz anguleux. Ceux-ci sont plus abondants quand le volume sous-jacent est directement l'arène. De rares graviers ou cailloux émoussés de basalte ont été observés. Le chevelu racinaire est important en surface et diminue vers la profondeur. On note la présence de galeries et turricules de vers de terre. Par rapport aux horizons sous-jacents, c'est un volume relativement bien structuré; la structure observée sur la tranchée F2 est variable à composantes polyédrique à microgrumeleuse ou grumeleuse fine et permet de distinguer 3 volumes V4a, V4b et V4c.

### Le volume V4a

C'est le volume superficiel. Dans la tranchée F2 son épaisseur varie de 5 à 11 cm.

Deux structures sont juxtaposées : la première qui représente environ 70 % du volume est une structure nette grumeleuse fine (agrégats de 0,5 à 1 mm) qui paraît étroitement liée au chevelu racinaire très important dans ce volume; elle est juxtaposée à une structure polyédrique fine (polyèdres subanguleux de 5 à 10 mm) peu nette qui représente environ 30 % du volume et qui est localement à sous-structure microgrumeleuse peu nette. L'ensemble a une sur-structure polyédrique subanguleuse moyenne (10 à 20 mm). La porosité globale est forte (66 %). Elle se présente sous forme de pores inter-agrégats plus ou moins polyconcaves très fins, et fissuraires fins (1 à 2 mm). La macroporosité biologique est importante sous forme de pores tubulaires racinaires et de larges chenaux de galeries de vers de terre. On note de nombreux turricules de vers de terre. La réaction au test de Fieldes et Perrott est négative.

### Le volume V4b

C'est le volume de subsurface. Dans la tranchée F2, son épaisseur moyenne est de 21 cm.

Par rapport aux volumes V4a et V4c sus- et sous-jacents, il présente un caractère plus compact. La texture est un peu plus argileuse et un peu moins limoneuse que dans V4a. Deux structures sont juxtaposées : la principale qui constitue environ 75 % du volume est une structure nette à peu nette polyédrique subanguleuse fine (5 à 10 mm) localement à sous-structure microgrumeleuse peu nette; elle est juxtaposée à une structure grumeleuse fine (agrégats de 0,3 à 0,5 mm) qui constitue 25 % du volume et qui est essentiellement localisée au voisinage des racines fines. La porosité globale est moyenne (56 %), plus faible que dans les volumes V4a et V4c sus- et sous-jacents. Elle est surtout fissurale très fine et fine inter-agrégats polyédriques et polyconcave entre les microagrégats. La macroporosité biologique est assez importante, sous forme de pores racinaires tubulaires et de larges chenaux de galeries de vers de terre. La réaction au test de Fieldes et Perrott est minime et lente.

### Le volume V4c

Dans la tranchée F2, son épaisseur moyenne est de 34 cm. C'est l'horizon le plus "microagrégé" des sols de cette partie aval.

Organominéral, il est caractérisé par rapport aux volumes V4a et V4b par son caractère "boulant". Sa structure est microgrumeleuse fine le plus souvent à sur-structure polyédrique subanguleuse fine (2 à 5 mm). La structure microgrumeleuse est plus nette au voisinage des racines fines. La porosité globale est importante (62 %); elle est polyconcave peu nette inter-microagrégats et fissurale entre les polyèdres. La macroporosité biologique quoique inférieure à celle des horizons sus-jacents V4a et V4b reste assez importante sous forme de pores tubulaires et de chenaux de galeries de vers de terre. La réaction au test de Fieldes et Perrott est positive bien qu'assez faible.

## Le volume brun jaune vif limono-sableux à sablo-limoneux V5 <sup>2</sup>

Il est présent sous le volume V4a. Il a été décrit finement sur la tranchée F2 où son épaisseur moyenne est de 43 cm.

Apparemment non organique, il présente une couleur brun-jaune vif 10 YR 5/6 à 5/8 à l'état humide, devenant brun très pâle à brun-jaune pâle 10 YR 7/3 à 6/4 à l'état sec. Sa texture est limono-sablo-argileuse à sablo-limono-argileuse à sables grossiers nombreux de quartz et micas. Il contient environ 25 % de gravillons de quartz anguleux. Sa structure est moins nettement exprimée, polyédrique subanguleuse grossière (50 à 100 mm) peu nette à nette; localement on observe une structure microgrumeleuse au

<sup>1</sup> Les volumes V4a, V4b, V4c correspondent respectivement aux volumes de référence BA1, BA2, BA3 (voir §.1.3).

<sup>2</sup> Ce volume V5 correspond au volume de référence BA4 (voir § 1.3).

voisinage des rares racines fines. La porosité est moyenne (58 %), essentiellement intra-agrégats polyédriques sous forme de pores vacuolaires fins de 1 à 2 mm. On observe encore des galeries de vers de terre. Les racines sont rares. La réaction au test de Fieldes et Perrott est minime et lente.

En sondage à la tarière, il est reconnu par son caractère plus sableux et sa couleur plus vive à l'état humide, plus claire à l'état sec, que l'horizon sus-jacent V4.

#### **Le volume d'arène grise sablo-limono-argilleuse V6 <sup>1</sup>**

Il est présent localement dans la zone aval. Dans la tranchée F2, il existe à 116 cm sur une épaisseur moyenne de 17 cm.

Sa couleur dominante est gris-brunâtre clair 10 YR 6/2, devenant gris-pâle 10 YR 7/2 à 8/3 à l'état sec, avec des passées fines diffuses beige-foncé et gris. Il présente des traînées contrastées de couleur brun-jaunâtre à brun vif 10 YR à 7,5 YR 5/8 sub-horizontales ferrugineuses, à tendance plus argileuse, notamment à la base de cet horizon. Sa texture est nettement sableuse avec une part non négligeable de limons et d'argile (S1a à S1c), avec des sables grossiers et de nombreux gravillons de quartz (50 %). Il présente quelques cailloux de basalte émoussés. On note de nombreux charbons de bois de taille centimétrique. Sa structure est massive, peu nette; elle tend cependant à se débiter en gros polyèdres plus ou moins aplatis de 5 cm. La porosité globale est moyenne à faible (54 %) essentiellement sous forme de cavités vacuolaires, subarrondies fines, millimétriques, intra-polyèdres. On note l'absence de traits biologiques.

#### **Le volume d'arène brun-orangé sablo-limoneuse V7 <sup>2</sup>**

Il est présent localement sur la zone aval. Dans la tranchée F2, il apparaît à 133 cm sur une épaisseur moyenne de 52 cm.

Il est légèrement plus humide que les horizons sus-jacents. Il présente une couleur brun-jaune vif 10 YR 5/8 à l'état humide, devenant brun très pâle 10 YR 7/3 à 8/3 à l'état sec.

Par ailleurs sa texture et sa structure sont proches de celles du volume V6. Sa texture est sableuse avec une part non négligeable de limons et d'argile (S1a à S1c) et de nombreux sables grossiers de quartz et paillettes de micas. Il contient de nombreux gravillons de quartz (50 %). De rares graviers de quartzites et quelques cailloux et pierres de basalte émoussés sont présents. Sa structure est massive peu nette; elle tend à se débiter en polyèdres grossiers (5 cm). La porosité globale est moyenne à faible (52 %) essentiellement sous forme de pores en cavités vacuolaires subarrondis millimétriques intra-agrégats. On note quelques pores fissuraux peu nets très fins (moins de 1 mm de large) à tracé en baïonnettes.

#### **L'arène graveleuse beige-clair à gris-rosé V8**

Elle constitue le substrat de toute la zone aval à des profondeurs variables et est aussi présente dans la zone de transition.

Ce volume présente une couleur dominante brun-jaunâtre à jaune 10 YR 6/6 à 7/6 avec des passées plus claires 10 YR 7/1 à 8/1 augmentant en profondeur à l'état humide, rosée à blanc-rosâtre 7,5 YR 7,5/4 à 7/6 à 10 YR 8/2 à l'état sec. Sa texture est graveleuse à sableuse avec des sables grossiers et de nombreux gravillons de quartz, feldspath alcalin et mica. Elle présente une structure particulière; en profondeur, l'architecture du granite fortement diaclasée est conservée.

Dans la zone de transition, sa texture est un peu plus limoneuse (S1) et sa structure est plus massive.

#### **Le basalte sain en prismes V9**

Il est présent sur toute la zone amont dont il constitue le substrat.

C'est une roche très dure, à cassure conchoïdale, de couleur gris-très foncé 2,5 Y 3,5/0 avec de rares phénocristaux, très faiblement altérée avec un cortex millimétrique brun-jaune 10 YR 5/6. Elle présente une patine brun-jaune 10 YR 5/6. Ce basalte est débité en prismes plus ou moins grossiers (15 à 30 cm de large, jusqu'à 60 cm en profondeur) dont l'axe est incliné de 30 à 45° E par rapport à la verticale. Les prismes sont eux même composés d'articles en blocs et pierres anguleux bien ajustés. Les prismes et

<sup>1</sup> Ce volume V6 correspond au volume de référence BA5 (voir § 1.3).

<sup>2</sup> Ce volume V7 correspond au volume de référence BA6 (voir § 1.3).

articles sont séparés par des fissures plus ou moins larges (1 à 5 cm) remplies de volumes pédologiques meubles dans la fosse F1A. Le toit des prismes, forme des sinuosités en "marches d'escalier" délimitant des zones concaves et convexes et, constitue une limite abrupte avec les volumes pédologiques sus-jacents. Les faces supérieures et latérales des prismes et les faces des blocs et cailloux du sous-débit sont tapissées de racines fines.

### L'altérite de basalte hétérogène V10

Elle est présente sur courte distance au passage de la zone amont et de la zone de transition, et a été décrite essentiellement sur la fosse F1B. Elle est composée de volumes très hétérogènes discontinus (Fig.III.3).

Le volume dominant est un volume de couleur brun-grisâtre très foncé à foncé 2,5 Y 3/2 à 4/2, devenant brun-grisâtre à brun 10 YR à 2,5 Y 5/2 à 10 YR 5/3. Il présente une texture limoneuse à sables fins de basalte. La charge en éléments grossiers est variable mais toujours forte : avec 60 à 80 % de graviers, cailloux et rares pierres de basalte gris clair altéré dans la masse (nodules zonés jaune-orangé friables et concentrations noires dans la porosité). La structure de la matrice fine est peu nette à nette polyédrique fine. Les racines sont rares et très fines.

Le volume V3 pourrait constituer une variante de ce volume d'altérite, avec une matrice plus abondante et un faciès plus altéré.

### Le volume d'arène ocre sablo-limono-argileuse V11

Il est présent dans la zone de transition.

Ce volume a une couleur dominante jaune brun à jaune plus ou moins pâle 10 YR 6/6 à 7/6 à 2,5 Y 7/4 mêlée de brun-vif 7,5 YR 5/8 et de gris clair 10 YR 7/1 à l'état humide; jaune à jaune orangé 2,5 Y 7/6 à 10 YR 7/8 à 7/6 mêlé de rouge-jaunâtre 5 YR 5/8 et de gris pâle 10 YR 7/2 à l'état sec. Sa texture est grossière sablo-limono-argileuse à sablo-argilo-limoneuse riche en sables grossiers de quartz. Il présente de nombreux gravillons de quartz et des gravillons brun vif de nature indéterminée; on note des taches blanchâtres probablement issues de l'altération de feldspaths alcalins. Sa structure est massive.

Après cette description macromorphologique des volumes pédologiques et des substrats identifiés sur le versant, nous présenterons leur agencement vertical et latéral le long de la pente. La description sur fosse permet de préciser l'allure des transitions verticales entre volumes.

## 1.2. Agencement des volumes

La séquence présentée sur la figure III.2 montre la répartition spatiale des différents volumes décrits ci-dessus. Deux domaines séparés par une zone de transition ont pu être distingués.

### Le domaine amont

Deux types de *successions verticales* sont représentées sur ce domaine amont, comme sur le profil de la fosse F1A (Fig.III.3).

La première, la plus fréquente, est du type : V1a/V1b/V1c/V9 (V9=Basalte sain); elle est présente lorsque le toit des prismes de basalte présente une forme concave, et correspond le plus souvent aux sols les plus épais (20 à 30 cm en moyenne).

La seconde succession verticale est du type : V1a/V1c/V9 (V9=Basalte sain); elle est observable lorsque le toit des prismes de basalte présente une forme convexe. Le sol est alors moins épais (10 cm en moyenne).

Le passage de l'une à l'autre de ces successions verticales est rapide.

*Latéralement* pour ce domaine amont sur basalte sain, les variations principales correspondent à des variations d'épaisseur et de présence/absence du volume V1b sur une courte distance (5 à 20 cm).

Le volume V1b est un volume qui peut être interrompu par place. Sa présence/absence est liée à la disposition relative des prismes de basalte : il figure dans des excavations ou poches assez larges (> 10 cm) déterminées par une forme concave du toit des prismes basaltiques. Son épaisseur varie de 15 à 0 cm;

l'épaisseur moyenne est de 10 cm.

Les volumes V1a et V1c sont présents tout le long du domaine amont. L'épaisseur du volume V1a, qui est le volume le plus représenté, varie latéralement de 15 à 2 cm; l'épaisseur moyenne étant de 10 cm. Le volume V1c forme un liseré de 1 à 2 cm de large moulant les faces supérieures des prismes basaltiques et est présent dans toutes les fissures étroites (1 à 3 cm de large) entre les prismes et entre les blocs et cailloux de leur sous-débit.

A la base des profils, c'est le volume V9 (basalte sain en prismes) qui est présent, sauf au contact de la zone de transition où il fait place au volume V10 (altérite de basalte) qui n'est alors plus surmonté que par le volume V1b (Fig. III.2).

L'organisation verticale et latérale des volumes de ce domaine amont est donc étroitement liée à la géométrie du substrat basaltique sous-jacent.

### La zone de transition

Dans la zone de transition de nouveaux volumes spécifiques à cette partie de la séquence apparaissent.

A l'amont, le volume V1 est encore présent au dessus du volume V2 qui apparait en biseau. Ce volume V2 remplace progressivement le volume V1; son épaisseur augmente de l'amont vers l'aval de 10 à 50 cm.

Au dessous, apparait le volume gris V3 dont l'épaisseur diminue vers l'aval de 65 à 10 cm. Ce volume est probablement d'origine basaltique et peut être rapproché du volume principal de l'altérite du basalte V10 dont il pourrait constituer un prolongement sous un faciès plus meuble et plus altéré.

En profondeur, le volume d'arène granitique ocre V11, peu épais : 10 à 20 cm, passe progressivement au volume d'arène gris-clair V8.

Les successions verticales observées sont de type :

- V1b/V10 (Fosse F1B)
- V1b/V2/V3/V11/V8 dont : V1/V2/V3b/V3a/V11/V8 et V1/V2/V3a/V3b/V11/V8
- V2/V3b/V11/V8

Dans cette partie intermédiaire de la séquence, les variations sont très rapides. Cette zone de transition présente 2 types de volume d'origine différente. Les volumes superficiels présentent des caractères proches des volumes amont et sont affectés par un colluvionnement des matériaux amont (V1/V2 progressif). Le volume V3 est encore d'origine basaltique tandis qu'apparaissent des volumes d'arène granitique en profondeur.

### Le domaine aval

Il est marqué par l'apparition de nouveaux volumes qui sont nettement caractérisés à la tarière par une couleur plus claire et une texture plus grossière à sables grossiers quartzeux par rapport aux volumes amont.

Le volume V2 de la zone de transition fait place au volume V4. Ce dernier, présent sur toute la zone aval sur une épaisseur très variable de 10 à 75 cm, surmonte le volume V5 qui subsiste lui aussi sur toute cette zone sur une épaisseur variable de 10 à 50 cm. Localement sur les profils les plus épais apparaissent les volumes V6 et V7 d'arène granitique sablo-limono-argileuse, tandis que l'arène grise graveleuse V8 est partout présente mais à des profondeurs très variables : 30 à 190 cm.

Dans cette zone aval, les variations verticales entre volumes sont très progressives notamment sur les profils les plus épais. Lorsque l'arène graveleuse est présente à moindre profondeur, les transitions entre volumes sont plus brutales.

Trois types de succession verticale ont été observés

- V4/V5/V8; cette succession correspond aux sols les moins épais : 30 à 40 cm jusqu'à l'arène graveleuse V8
- V4/V5/V7/V8
- V4/V5/V6/V7/V8; elle correspond aux sols les plus épais (profondeur de l'arène V8 supérieure à 110 cm); c'est le cas du profil de la tranchée F2 (Fig. III.4) qui comprend tous les volumes de cette partie aval.

NNE

SSO

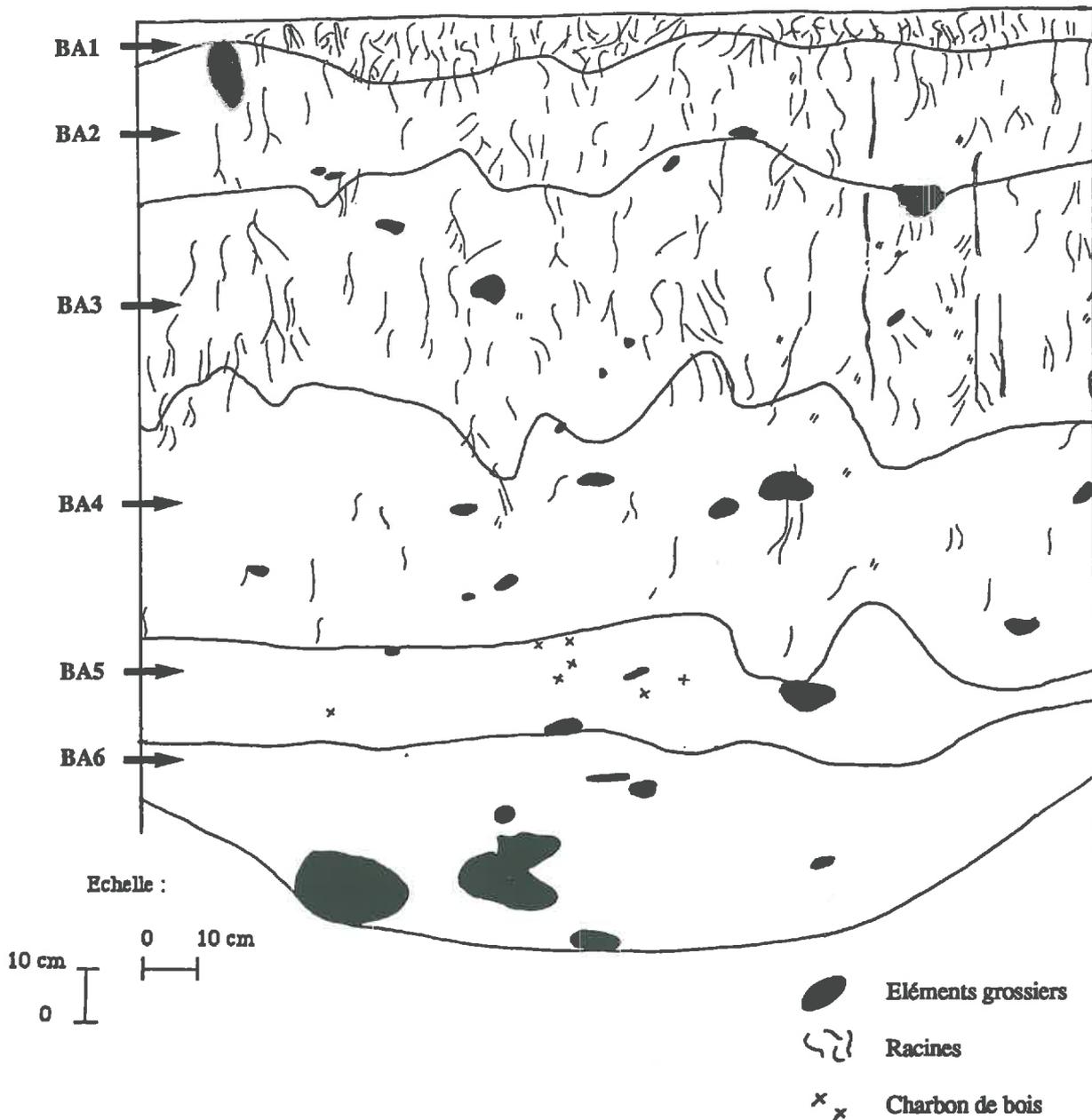


Fig. III.4 : Schéma de la tranchée F2 : Sol Brun Acide sur arène granitique.

-Description macromorphologique des volumes pédologiques BA1 à BA6 : voir tableau III.4 -

A l'inverse du domaine amont où la distribution des volumes a pu être bien approchée par une analyse bidimensionnelle (relation avec la géométrie du substrat), sur ce domaine aval les règles de la distribution spatiale des différents volumes - dont le problème de variation de profondeur du sol jusqu'à l'arène graveleuse V8, et les modalités de la présence des volumes d'arène sablo-limono-argileuse (V6, V7) -, n'ont pu être déterminés. Une prise en compte de la troisième dimension serait nécessaire pour aller plus loin dans cette analyse. Notons simplement que les sols les plus épais correspondent généralement à des situations topographiques où figurent des thalwegs transversaux à la pente de la séquence.

Tab. III.3 : Description macromorphologique des volumes observés sur la fosse F1A : Ranker andique sur basalte sain et sur la fosse F1B : Ranker andique sur altérite de basalte

Volume de "référence"	Volume séquence	Position verticale	Couleur humide	M.O.	Éléments grossiers	Texture	Thixotropie	Structure	Porosité	Activité Biologique	Traits pédolog.	Test de Fieldes et Perott (pHNaF)	Limite inférieure
K1	V1(a)	surface 0 à 15 cm	brun très foncé 10YR2/2	très forte 24% graviers basalte	10-25% graviers basalte	L à Sf bas.	—	microgrumeleuse nette	très forte (74%) inter-microagrégats très fine et tubulaire fine (racines)	chevelu racinaire très dense	—	(+++) (10.3)	régulière à ondulée, distincte à graduelle
K2	V1(b)	surface	brun très foncé à foncé 10YR2,5/2,5	très forte 21% et cailloux de basalte sain et de basalte altéré	20% de graviers	L à Sf bas	+	microgrumeleuse (90%) juxtap. à polyédrique très fine (10%) sur-struct. polyéd. fine comme V1(b)	très forte (73%) inter-microagrégats très fine et tubulaire fine (racines) comme V1(b)	chevelu racinaire très dense	—	(+++)	interrompue, nette à distincte en F1A régulière et nette en F1B
—	V1(c)	surface	comme V1(b)	très forte	comme V1a et V1b	comme V1a et b	—	—	—	chevelu racinaire extrêmement dense	—	comme V1(a)	très nette, abrupt avec basalte
BASALTE SAIN	V9	surface à profond	pâte gris très foncé 2,5Y3,5/0	—	5 à 10% phéno-cristaux	Lithique Basalte	—	Lithique débit en prismes 30 cm large	fissures 1 à 3 cm entre prismes	—	—	—	—
<b>Altérite de basalte :</b>													
AltBas. I	—	surface à moyen 15 à 70 cm	brun jaune foncé 10YR3/4-6	—	50 à 95% graviers pierres de bas. Ia : 95% Ib : 80%; Ic : 55%	LS à Sf bas.	—	peu nette polyéd. fine	poroux à peu poreux fine	racines très fines assez nombreuses intra-agr. et autour éléments grossiers	—	—	interrompue
AltBas. II	V10	surf. à prof. 20 à ... cm	brun gris foncé 2,5Y 3-4/2	—	40 à 90% graviers cailloux de bas. gris clair très altéré dans masses (noir et orange) IIa : 85% IIb : 60%; IIc : 40%	L à LS à Sf. bas	—	polyédrique fine	poroux	races racines très fines	—	—	interrompue
AltBas. III	—	surf. à très prof. 20 à ... cm	brun jaune 10YR5/6 traminées disc. gris clair et rouille	—	10 à 100% graviers cailloux de bas. très très altérés (conc. noires et oranges) IIIa : 100%; IIIb : 80% IIIc : 50%; IIId : 10%	variable L à LA	—	polyédrique fine	poroux porosité d'entassement et/ou porosité moyenne intra-agrégat	races	—	—	interrompue
AltBasIV IV.A	—	profond	jaune brun à jaune 10YR6/8 à 2,5Y7/6	—	0%	AL	—	continue; pâteux	peu poreux	pas de racines	—	—	—
IV.B	—	liséré bordant IV.A	gris olive clair dominant (5Y6/2) plages brun vif 7,5YR5/6	—	30% graviers de basalte de forme aplatie anguleux brun foncé	LA	—	massive	—	—	—	—	—
AltBasV	—	biseau rouille	brun-vif 7,5YR5/6	—	100% graviers anguleux et aplatis	—	—	Lithique	porosité d'entassement	—	—	—	—

Tab III.4: Description macromorphologique des volumes observés sur la fosse F2 : Sol Brun Acide sur arène granitique

Volume de référence	Volume Séq.	Position verticale	Couleur humide	M.O.	Eléments grossiers	Texture	Structure	Porosité	Activité Biologique	Traits pédologiques	Test de Fieldes et Perott	Limite inférieure
BA1	V. 4a	surface 0 à 8 cm	brun clair 10YR5/3	assez forte (.9%)	10% gravillons quartz	LSg(a)	(micro)grumeleuse (70%) juxtaposée à polyédrique fine (30%)	forte (<- racines) (66%) *inter-agrégats *tubulaire (racines) *de chenaux	chevelu racinaire très dense vers de terre coléoptères	turricules	( ) (8.9)	régulière, distincte à nette
BA2	V. 4b	surface 8 à 29 cm	Id.1a	moy. (.4,4%)	20% : gravillons quartz et rares cailloux Basalte et Granite	LSga	polyéd. subang. fine (75%) juxtaposée à (micro)grumeleuse autour racines fines "mottes compactes"	moy. (<- racines) (56%) * inter-agrég. polyéd. fissurale et tubulaire *intra-agrégat * chenaux	racines fines et moy. vers de terre coléoptères	turricules rares charbons de bois	( ) (9.2)	ondulée, graduelle
BA3	V. 4c	moyen 29 à 73 cm	brun jaunâtre 10YR5/4	moy. (.2,6%)	10% gravillons quartz; rares cailloux basaltés	LSf	microgrumeleuse à surstruct. polyédrique (à $\mu$ grumeleuse (55%) juxtap. à "polyédrique fine associée à $\mu$ gru." (45%))	forte (<- structure) (62%) *inter-agrégats ( $\mu$ et poly) *intra-agrégat polyéd. tubulaire *chenaux	racines très fines vers de terre coléoptères	turricules rares charbons de bois	(+) (9.7)	irrégulière, distincte
BA4	V. 5	moyen à profond 73 à 116 cm	brun jaune vif 10YR5/6	faible (.1,7%)	25% : gravillons quartz; rares cailloux basaltés	LSga à SgLa	peu nette polyéd. subang. grossière (90%) juxtaposée à grumeleuse (10%)	moyenne (58%) * surtout intra-agrégats :vacuolaires *inter-agrégats faible *chenaux	rare racines fines vers de terre	turricules rares charbons de bois	(+) (9.4)	ondulée, graduelle
BA5	V. 6	très profond 116 à 133 cm	gris brunâtre clair 10YR6/2	très faible (.1,2%)	50% : gravillons quartz; rares cailloux basaltés et quartzites	SLa à SAl	massive; débit peu net en polyédres grossiers	moyenne à faible (54%) * surtout intra-agrégat vacuolaire	—	traînées brun jaunâtre à brun vif (7,5YR5/8) nbreux charbons	( ) (9.0)	ondulée, distincte
BA6	V. 7	très profond 133 à 185 cm	brun jaunâtre vif 10YR5/8	nulle (.0,6%)	50% : gravillons quartz; rares cailloux basaltés et quartzites	SLa à SAl	massive; débit peu net en polyédres grossiers	moyenne à faible (52%) * surtout intra-agrégat vacuolaire * rares pores fissuraux en baillonettes	—	—	( ) (8.8)	non observée
granite	V. 8	—	gris à gris rosé	—	—	sabl. à gravel.	particulaire	moyenne	—	—	—	—

### 1.3. Synthèse et conclusion

Cette séquence présente donc 2 grands systèmes de sols correspondant à un domaine amont et un domaine aval.

#### Un domaine amont de rankers andiques

Le domaine amont est composé de sols développés sur basalte; il est caractérisé par des sols peu épais (20 à 30 cm), avec un volume V1 comprenant 2 faciès principaux V1a et V1b, qui présentent les caractéristiques morphologiques des volumes andiques (Quantin, 1982; R.P.F., 1990; Moinereau, 1980) et notamment de l'horizon humifère andique Aa (R.P.F., 1990) à savoir :

Ce sont des volumes de couleur brun très foncé, très humifères, à texture apparente limoneuse, à structure microgrumeleuse fine très friable, fluffy, très poreux, présentant un toucher onctueux, devenant poudreux à l'état sec avec un chevelu racinaire dense. La présence d'allophanes et/ou d'alumine libre est attestée par le test au NaF (dit de Fieldes et Perrott) qui entraîne en présence de phénolphtaléine une coloration rouge vive et rapide.

Ces sols seront qualifiés de Rankers andiques.

Deux volumes considérés comme caractéristiques de ces rankers andiques, feront l'objet d'études complémentaires fines dans la suite de ce travail. Nous leur attribuerons la lettre K:

- le volume V1a, *renommé K1*, prélevé sur la fosse F1A;
- le volume V1b, *renommé K2*, prélevé sur la fosse F1B.

Le volume V1c ne sera pas étudié, car très proche du volume V1b et surtout très limité en extension.

#### Un domaine aval de sols bruns acides

Le système aval est composé d'une couverture pédologique développée sur arène granitique; il est caractérisé par des sols plus ou moins profonds jusqu'à l'arène, présentant des volumes de couleur plus claire brun à brun jaune, à texture nettement plus sableuse, limono-sableuse à sableuse avec des sables grossiers quartzeux.

Le volume V4 et en moindre partie le volume V5 présentent les caractères morphologiques des sols bruns acides ou Alocrisols, notamment de l'horizon AAl et/ou SA1 (R.P.F., 1990) avec :

- une couleur claire teinte 10 YR; pureté 5; clarté 4 pour V4; 10 YR 5/6 pour V5;
- une structure qui résulte de la combinaison et/ou de l'association d'une structure grumeleuse fine à très fine (microgrumeleuse) et d'une structure polyédrique sub-anguleuse.

Notons que ces seuls critères morphologiques peuvent être communs à d'autres types de sol.

Ces sols sont caractérisés par une variation graduelle, des caractères texturaux et structuraux. Ainsi, sur la tranchée F2, de la base au sommet, on passe progressivement d'une texture sableuse à une texture plus limoneuse et on observe la succession des structures suivantes : d'abord massive puis polyédrique grossière puis à composante grumeleuse fine à très fine juxtaposée et/ou associée à une structure polyédrique subanguleuse fine.

La matière organique est parfaitement incorporée. De nombreux vers de terre colonisent témoignant d'une bonne activité biologique. Galeries et porosité racinaire induisent une forte macroporosité biologique dans tout l'ensemble supérieur du sol. La texture est dominée par les sables quartzeux qui augmentent globalement en profondeur, mais ce sont des sols relativement bien pourvus en argile. On ne note aucune indication morphologique d'éluviation ou d'illuviation sur la plus grande partie des profils, excepté dans les volumes profonds d'arène sablo-limoneuse (V6 et V7).

La présence constante dans tous les profils d'éléments grossiers de nature basaltique témoigne d'une certaine contamination par les matériaux du domaine amont, contamination probablement due à des mouvements sur courte distance selon la pente vers l'aval.

Six volumes pédologiques, qui seront considérés comme caractéristiques des "Sols Brun Acides" seront étudiés plus finement par la suite; nous leur attribuerons les lettres "BA"; tous sont présents au niveau de la tranchée F2 (Fig. III.4) sur laquelle ils ont été prélevés :

- le volume V4a, *renommé BA1*;
- le volume V4b, *renommé BA2*;
- le volume V4c, *renommé BA3*;
- le volume V5, *renommé BA4*;

- le volume V6, renommé BA5;
- le volume V7, renommé BA6.

### Une lithoséquence

Finalement, il apparaît nettement que même si les sols bruns acides de la zone aval présentent des indices de contamination par les volumes andiques de la zone amont, cette contamination n'est qu'un phénomène secondaire et c'est avant tout la roche sous-jacente qui détermine les caractères des sols. Sur roche acide, riche en silice, alcaline potassique, peu basique, grenue, se sont développés des sols bruns acides. Sur roche volcanique basique, sous-saturée en silice, alcaline sodique à texture microlithique, riche en verre, se sont développés des sols à caractères andiques.

Cette séquence Puech Roux peut donc être qualifiée de "lithoséquence".

### Séquence représentative des sites de coexistence sols andiques - sols bruns acides.

Elle peut être considérée comme tout à fait représentative des sites de contact basalte - granite, de coexistence sur courte distance des deux types de sol : sols à caractères andiques - sols bruns acides, fréquente dans les régions volcaniques du Massif Central français puisque marquant l'interface socle/coulée volcanique.

Ainsi que nous avons pu le constater lors d'une reconnaissance de terrain dans le sud du Massif Central, pour rechercher des sites appropriés à l'étude et à la comparaison des sols à propriétés andiques et des sols bruns acides, ces sites présentent certains caractères spécifiques.

Au plan géomorphologique, une rupture de pente accentuée marque le plus souvent le contact entre les deux formations géologiques et par suite entre les sols qui se sont développés au dessus. La coulée basaltique s'est épanchée sur le socle granitique préexistant et sa terminaison est marquée par un net abrupt. Cette disposition entraîne une contamination des sols aval par les sols amont.

Une zone géologique et pédologique complexe figure au contact granite-basalte (mélange de matériaux géologiques, altération complexe ...). Dans ces situations, les sols développés sur basaltes, toujours situés avant la forte rupture de pente, sont peu épais et apparemment peu développés, sans différenciation d'un horizon (B). Les sols sur basalte à horizon (B) différencié, à propriétés andiques plus développées se trouvent dans les zones exclusivement basaltiques où le socle granitique n'affleure plus. C'est le cas du deuxième site "Montarqué" que nous allons maintenant présenter.

## 2. Séquence Puech Montarqué

Ce deuxième site est localisé dans la partie centrale des Monts d'Aubrac, en milieu exclusivement volcanique, à 10 km à l'est de Laguiole, dans le bois communal de Laguiole. Il s'étend le long d'un versant exposé à l'Est occupé par une hêtraie à arbres chétifs, qui culmine à 1280 m au "Puech de Montarqué".

Le transect a été établi sur 220 m de long pour une dénivelée totale de 18 m le long de ce versant. D'Ouest en Est, le profil topographique (Fig. III.5) présente d'abord un sommet aplati puis une pente concavo-convexe à forte déclivité (pente moyenne de 27 %) qui s'atténue ensuite progressivement et se prolonge par une zone à très faible déclivité (pente moyenne de 1 %) localement occupée par une clairière et interrompue à l'est par un talus artificiel. A l'aval de la séquence, une petite dépression est occupée par une tourbière.

Le substrat est exclusivement composé de matériaux volcaniques. Deux grands types de faciès ont été observés sur le site soit en affleurement, soit sous forme d'éléments grossiers dans les profils de sol : le basalte proprement dit et des tufo-laves.

Le basalte affleure en gros prismes au sommet du transect et en contrebas du site en coupe de route. C'est une roche très dure peu poreuse. Il constitue le substrat de la partie amont et de la moitié supérieure du versant. Ce basalte est aussi présent en éléments grossiers dans la plupart des volumes pédologiques observés, sous des formes saines ou plus altérées et friables.

Les tufo-laves sont de 2 types : tufo-lave jaune et tufo-lave rouge (ou horizon rouge compact). Ce sont des roches plus poreuses, à éléments scoriacés. Elles constituent le substrat de la moitié inférieure du versant et très probablement de toute la partie aval de replat.

Les analyses chimiques élémentaires des basaltes et de la tufo-lave rouge figurent dans le tableau III.5. Tous sont riches en fer, pauvres en silice (sous-saturés).

Tab. III.5: Analyses chimiques totales des substrats de la séquence Puech Montarqué : basalte et tufo-lave rouge.

Eléments en %	site Puech MONTARQUIE		
	BASALTE sommets	BASALTE coupe route	TUFO-LAVE ROUGE
SiO <sub>2</sub>	44,93	44,73	42,21
TiO <sub>2</sub>	2,87	3,04	3,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,3	13,92	22,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	12,91	13,01	14,17
MnO	0,19	0,19	0,22
MgO	9,48	8,85	3,02
CaO	11,96	11,68	3,71
Na <sub>2</sub> O	3,72	3,25	1,97
K <sub>2</sub> O	0,76	1,26	1,97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,65	0,67	1,22
H <sub>2</sub> O+=P.F	0,4	1	8,08
H <sub>2</sub> O-	0,9	1	7,2
<b>Total sans eau</b>	<b>100,77</b>	<b>100,6</b>	<b>94,18</b>
<b>Total avec P.F</b>	<b>101,17</b>	<b>101,6</b>	<b>102,26</b>

Un transect a été réalisé le long de la pente par sondages à la tarière et une fosse F a été ouverte en bas de pente dans la zone de replat. Douze volumes, dont 3 présents sur la fosse F, sont distinguables à la tarière. Les observations fines menées sur la fosse F ont conduit à subdiviser certains volumes sur la base de leurs caractères structuraux. Quatorze volumes sont ainsi définis au total dont 7 décrits sur fosse et/ou affleurement.

## 2.1. Description macro-morphologique des volumes

### La litière

En surface, on note toujours une litière bien développée de 1,5 à 2 cm d'épaisseur, qui présente depuis le haut vers le bas : une couche de 1 cm de feuilles de hêtres d'abord entières et saines puis très peu décomposées; une couche de 0,5 à 1 cm composée de 40 % de débris de feuilles et brindilles, et 60 % de matrice de couleur brun à brun-rouge foncé 5 YR à 10 YR 2/2 (humide) très riche en matière organique, composée de "billes" arrangées en structure très lâche grumelleuse. Le passage au volume V'1 sous-jacent se fait progressivement sur 1 cm. Cet humus est de type Moder.

### Le volume superficiel très foncé, V'1<sup>1</sup>

C'est le volume superficiel de l'ensemble du transect sous la litière. Son épaisseur varie de 10 à 30 cm. Dans la fosse F, son épaisseur est de 12 cm.

<sup>1</sup> Ce volume V'1 correspond au volume de référence AN1 (voir § 2.3).

Ce volume V'1 est un volume frais, de couleur très sombre brun très foncé à l'amont à brun-rouge foncé vers l'aval, 10 YR 2/2 à 5 YR 3/2 à l'état humide, brun foncé à brun rouge foncé 10 YR 3/3 à 5 YR 3/2 à l'état sec, très riche en matière organique bien humifiée, avec quelques débris de feuilles et brindilles. Sa texture est limoneuse. Il contient 5 à 10 % de graviers de basalte peu altéré. La structure est nettement microagrégée à grumeleuse fine avec des agrégats sub-arrondis souvent coprogènes. La porosité est extrêmement importante (82 %) inter-agrégats polyconcave et sous forme de larges cavités. Les racines sont très nombreuses et très fines sous forme d'un chevelu racinaire très dense. C'est un volume très meuble quasiment maintenu structuré par les racines. La réaction au test de Fieldes et Perrott est faible et lente.

Au sommet de la pente, lorsque ce volume surmonte directement le basalte, il présente à sa base une structure un peu plus dense à sur-structure polyédrique fine et un caractère thixotropique. Le chevelu racinaire est alors moins dense.

#### **Le volume brun-rouge sombre gravilloneux, V'2**

Il est présent sur la moitié inférieure de la pente où il constitue le volume principal avant le substrat dur. Il n'a été décrit que d'après sondages à la tarière. Son épaisseur varie de 10 à 55 cm. Les variations de texture et d'humidité (observations au printemps) ont conduit à différencier des "sous-volumes".

##### **Le volume brun-rouge gravilloneux frais et limono-sableux, V'2a**

C'est un volume frais organo-minéral de couleur brun rouge foncé 5 YR 3/3 à 3/2 à l'état humide, brun rouge foncé à brun-rouge 5 YR 4/3 à 4/4 (V'2a<sub>1</sub>) passant au brun-rouge à rouge-jaune 5 YR 4/4 à 4/6 (V'2a<sub>2</sub>) en profondeur à l'état sec. Localement, on observe de rares taches sableuses jaune-brun 10 YR 6/8 à l'état humide. Sa texture est limoneuse à limono-sableuse. Il est thixotropique. Il présente de nombreux gravillons de basalte gris 7,5 YR 5/0 friable, de tuf scoriacé jaune-rouge à rouge-jaune 7,5 YR 6/6 à 5 YR 5/6 et de tuf rouge; ces gravillons augmentent en profondeur de 20 à 50 %. Ce volume V'2a présente une réaction positive, vive et rapide au test de Fieldes et Perrott.

C'est le principal sous-volume de V'2. Son épaisseur varie de 10 à 55 cm.

Lorsque ce volume V'2a se trouve au dessus du volume V'2b, il présente sur 10 cm à sa base un caractère très humide avec présence d'eau libre (V'2a<sub>3</sub>); les autres caractères ne diffèrent pas de ceux de V'2a<sub>2</sub>.

##### **Le volume brun rouge gravilloneux frais et sableux, V'2b**

Sa couleur dominante est identique à celle du volume V'2a<sub>2</sub>; mais il présente de nombreuses taches sableuses de couleur jaune-brun 10 YR 6/8 à l'état humide (jaune-brun à jaune 10 YR 6/8 à 7/8 à l'état sec) qui constituent 40 à 50 % du volume; ces taches sont probablement issues de tufo-laves jaunes très altérés. Elles confèrent à ce volume une texture plus sableuse : sablo-limoneuse à sableuse avec des sables fins jaunes. Les gravillons abondants sont essentiellement constitués de tufo-laves jaune-rouge, plus rarement de basalte gris friable.

C'est un volume très peu représenté. Son épaisseur est de 10 cm.

#### **Le volume brun-jaune foncé à brun-vif gravilloneux, V'3**

Il est présent en bas de pente au début de la zone de replat. Il n'a été décrit que d'après des sondages à la tarière. Son épaisseur varie de 50 à 70 cm.

C'est un volume frais, organo-minéral, de couleur brun-jaune foncé à brun 10 YR 4/4 à 7,5 YR 3/4 à l'état humide, brun-jaune foncé à brun 10 YR 4/4 à 7,5 YR 4/4 (V'3a) passant à brun vif 7,5 YR 4/6 (à 5/6) vers la profondeur (V'3b) à l'état sec. Sa texture est limoneuse à limoneuse faiblement sableuse. Il est thixotropique. Il contient 10 à 20 % de gravillons de basalte friable, de rares gravillons de tuf rouge ainsi que quelques graviers de basalte dur. La réaction au test de Fieldes et Perrott est vive et rapide.

#### **Le volume brun-vif gravilloneux à eau libre, V'4**

Il est présent comme volume profond en bas de pente au début de la zone de replat, à 60 ou 80 cm de profondeur. Il n'a été décrit que d'après sondages à la tarière.

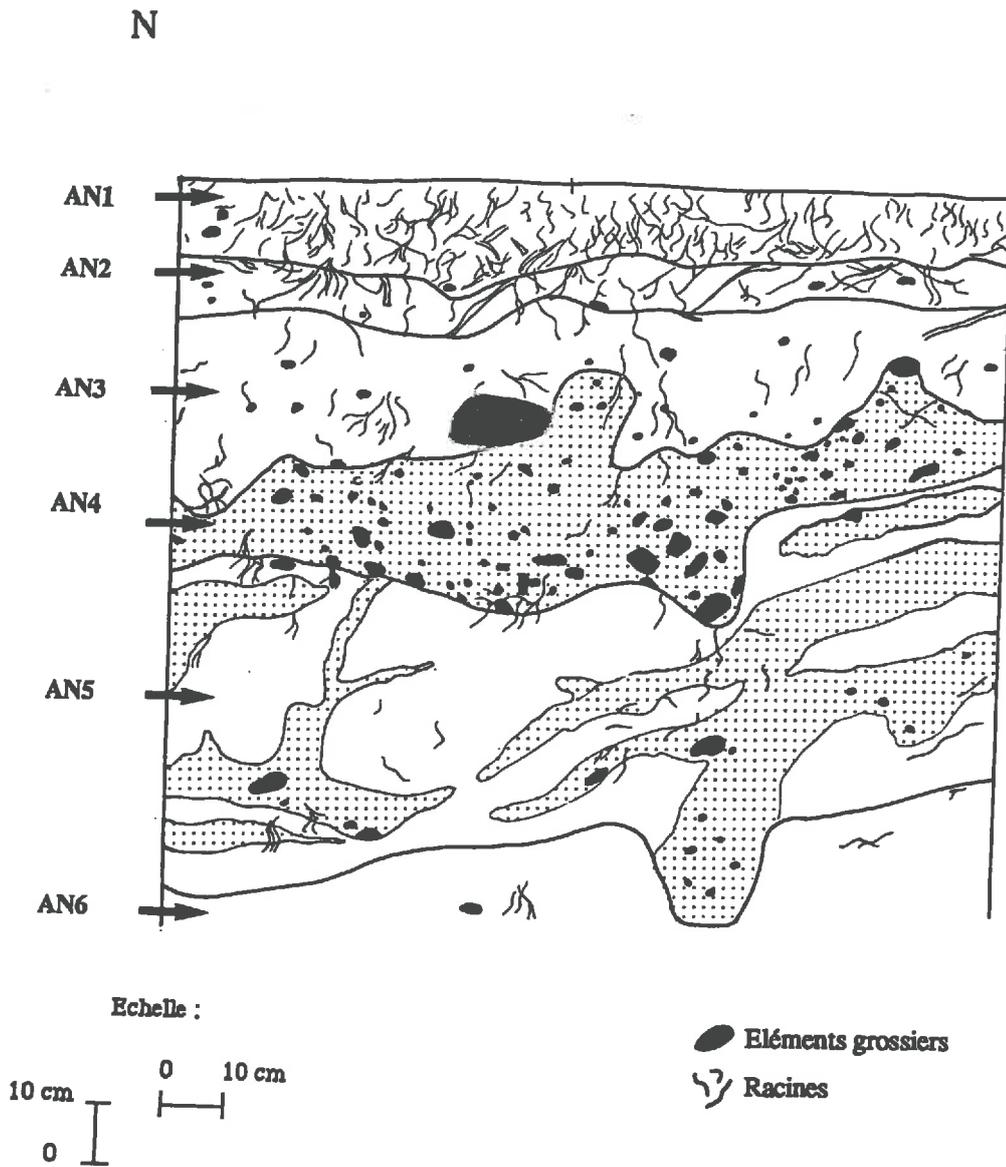


Fig.III.6 : Schéma de la tranche F : "Andosol Montarquié".

-Description macromorphologique des volumes pédologiques AN1 à AN6 : voir tableau III.6 -

Tab. III.6 : Description macromorphologique des 6 volumes observés sur la fosse F : Andosol Montarqué

Volume de référence	Volume séquence verticale en cm	Couleur humide	M.O.	Eléments grossiers	Texture	Thixotropie	Structure	Porosité	Activité Biologique	Traits pédolog. Perott (pHNaF)	Test de Fieldes	Limite inférieure
AN1	V'1 0 à 12cm	brun foncé à brun-rouge foncé 7,5YR à 5YR 3/2	Très forte -26% humifiée * débris	rare (< 5%) G et C, de basalte peu altéré	Limoneux L	non	microgrumeleuse à grumeleuse fine très nette coprogène	extrêmement poreux (82%) *inter-agrégats polyconaves fins *cavités biologiques inter-agrégats très poreux	seule faune : fourmis chevelu racinaire très dense; racines sub-horiz. à base	filaments gris cendres	négatif (9.3)	légèrement ondulée nette (<1 cm)
AN2	V'5a 12 à 21cm	brun-rouge foncé 5YR 3/4	très forte (18%).	5 à 10% G et C de basalte peu altéré	Limoneux légèrement argileux La	oui	apparence continue polyédrique subang. moyenne sous-struct. microgrumel. nette (juxtaposée à microgrumeleuse très nette dans porosité tubulaire près des racines)	très poreux (81%) pores très fins (<mm) *interagregats polyéd. tubulaires *intermicroagregats polyconaves *pores fissuraux fins sub-horiz.	pas de macrofaune racines assez nombreuses très fines et moy., rarement nécrosées	positif (10.)	légèrement ondulée distincte à graduelle (5 cm)	
AN3	V'5b 21 à 41cm	brun rouge foncé 5YR 3/4	forte (9.4%).	10 à 20% G et C de basalte peu altéré	Limoneux légèrement argileux La "farineux"	oui très	apparence continue microgrumeleuse nette souvent à sur-structure peu nette à nette polyédrique subanguleuse moyenne (juxtaposée à microgrumeleuse très nette près des racines).	très finement poreux (76%) *pores très fins essentiellement polyconaves intermicroagregats *quelques pores tubulaires fins	pas de macrofaune racines assez nombreuses très fines	très vif et rapide (10.8)	ondulée graduelle (5 à 10 cm)	
AN4	V'5c 41 à 59cm	brun-rouge foncé 5YR 3/4 à 4/4	moyenne (3%).	30 à 40 % G, C, (P) de basalte peu altéré	Limoneux légèrement sableux Lsa	oui très	polyédrique subanguleuse moyenne peu nette à nette (50 %), juxtaposée à microgrumeleuse (50%)	poreux (73%) * pores tubulaires très fins inter-agrégats polyéd. intermicroagregats très fins.	pas de macrofaune racines peu nombreuses très fines	très vif et rapide (10.4)	irrégulière graduelle (10 cm)	
AN5	V'6 59 à 107cm	brun-rouge foncé violacé 5YR 3/2 * 30% de "langues" 5YR 3/3 à 3/4 (AN4) * trainées gris-rouge foncé 5YR4/2 à base	faible à nulle (0.4%)	<10% de G jaune-brun altéré	Limoneux L	oui	polyédrique subanguleuse moyenne à grossière (80 %) juxtaposée à microgrumeleuse (20%) autour des rares racines. * structure peu nette à tendance lamellaire.	poreux (62%) * surtout fissures très fines (mm) interagregats; pores intra-agregats en petites cavités subarrondies	rare racines très fines	(volumes plus vifs de AN4)	irrégulière distincte à graduelle (5 cm)	
AN6	V'7 107 à >240cm	brun-gris foncé à brun dominant 10YR 4/2 à 5/3 * taches liserés jaune-rouge 7,5YR 6/8 * taches jaune clair	nulle (0.3%)	10 à 40% de gravillons très altérés friables brun-jaune peu contrastés	Limono-argilo-sableux Las	non	polyédrique subanguleuse peu nette grossière structure lamellaire grossière	poreux (60%) * surtout fissures fines inter-agregats * pores intra-agregats en petites cavités très fines subarrondies	très rares racines très fines	taches et liserés jaune-rouge	négatif (9.4)	non observée

Apparemment peu ou non organique, c'est un volume très humide avec de l'eau libre. Il présente une couleur orangée caractéristique brun à brun-vif 7,5 YR 4/4 à 4/6 à l'état humide, brun-vif (à jaune-rouge) 7,5 YR 5/6 à 5/8 (à 6/8) à l'état sec. Sa texture est limoneuse à limoneuse faiblement sableuse. Il contient 10 à 30 % de gravillons de basalte friable, de rares gravillons de tuf rouge et des graviers de basalte dur non altéré. La réaction au test de Fieldes et Perrott est positive mais lente.

#### **Le volume brun-rouge violacé, V'5<sup>1</sup>**

Il est présent à l'aval de la zone de replat sur une épaisseur de 50 à 60 cm.

Frais, organominéral, ce volume V'5 présente une couleur brun-rouge foncé 5 YR 3/4 à brun-rouge 5 YR 4/4 à l'état humide, brun à brun foncé 7,5 YR 4/4 à l'état sec. Sa texture varie de limoneuse faiblement argileuse en surface à limoneuse faiblement sableuse en profondeur. Il présente un caractère nettement thixotropique. Il contient des graviers de basalte dur peu altéré peu abondants en surface devenant abondants en profondeur. Le chevelu racinaire important en surface diminue vers la profondeur. La réaction au test de Fieldes et Perrott est vive et rapide.

La structure observée sur la fosse F est variable, à composantes microgrumeleuse très fine et polyédrique fine à moyenne. Elle permet de distinguer 3 volumes : V'5a, V'5b, V'5c.

##### **Le volume V'5a**

C'est le volume de subsurface. Sur fosse, il est présent à 12 cm de profondeur, sur une épaisseur moyenne de 9 cm.

Sa texture est limoneuse faiblement argileuse. Les graviers de basalte sont peu abondants (5 à 10 %).

La structure principale est *polyédrique subanguleuse moyenne peu nette à sous-structure microgrumeleuse très fine nette*. Elle est juxtaposée à une structure microgrumeleuse fine dans la porosité tubulaire racinaire. La porosité est très importante (80 %) : sous forme d'une porosité tubulaire racinaire fine importante et sous forme de pores très fins inter-microagrégats très abondants. On observe aussi une porosité fissurale très fine discontinue et subhorizontale.

Sur fosse, la limite supérieure avec le volume sus-jacent V'1 est très nette, marquée notamment par une différence de structure et des racines subhorizontales à la limite entre les 2 volumes. La limite inférieure avec le volume V'5b est graduelle à distincte.

##### **Le volume V'5b**

Sur fosse, il est présent à 21 cm de profondeur, sur une épaisseur moyenne de 20 cm.

Sa texture est comparable à celle de V'5a; le pourcentage d'éléments grossiers est un peu plus élevé : 10 à 20 %.

La structure est nettement *microagrégée très fine nette à très nette parfois à sur-structure polyédrique moyenne peu nette à nette*. Dans la porosité tubulaire, la structure microagrégée devient très nette; elle ne présente alors jamais de sur-structure. La porosité globale est très importante (76 %) essentiellement sous forme de pores très fins inter-microagrégats. Il existe aussi une porosité tubulaire racinaire très fine, moins importante que dans le volume V'5a.

C'est un volume très friable, farineux, poudreux à l'état sec.

##### **Le volume V'5c**

Sur fosse, il est présent à 41 cm sur une épaisseur moyenne de 18 cm.

La texture est limoneuse faiblement sableuse. Il est caractérisé par une teneur en graviers, cailloux et rares pierres de basalte peu altéré à contours émoussés, plus importante (30 à 40 %) qui permet de le distinguer à la tarière des volumes V'5a et V'5b.

Deux structures sont *juxtaposées en proportions égales: une structure à tendance polyédrique subanguleuse moyenne et une structure microgrumeleuse fine peu nette à nette*. On observe une sur-structure peu nette polyédrique subanguleuse grossière. La porosité est importante (73 %), sous forme de pores inter-microagrégats fins et inter-polyèdres.

#### **Le volume brun-rouge foncé à gris-rouge foncé V'6<sup>2</sup>**

Ce volume est présent en profondeur dans la partie aval de la zone de replat. Dans la fosse, il apparaît à 59 cm de profondeur, sur une épaisseur moyenne de 46 cm.

Frais, non-organique, il présente une matrice dominante de couleur brun-rouge foncé à gris-rouge

<sup>1</sup> Les volumes V'5a, V'5b, V'5c correspondent respectivement aux volumes de référence AN2, AN3, AN4. (voir § 2.3).

<sup>2</sup> Ce volume V'6 correspond au volume de référence AN5 (voir § 2.3)

foncé 5 YR 3/2 à 5 YR 4/2 à l'état humide devenant gris-rouge à brun-rouge 5 YR 5/2 à 5/3 à l'état sec. On note environ 30 % de zones de couleur plus vive brun-rouge 5 YR 3/4 à 4/4 à l'état humide en langues discontinues obliques ou subhorizontales assez contrastées, dont les caractères sont proches de ceux du volume V'5c. Localement, on observe aussi des traînées diffuses brun-grisâtre à brun rouge foncé 10 YR 4/2 à 5 YR 4/2 à l'état humide. Sa texture est nettement limoneuse; elle est limoneuse légèrement sableuse dans les zones plus vives. La matrice contient peu d'éléments grossiers, sous forme de quelques graviers de basalte très altérés, très poreux à patine jaune-brun et de rares graviers de basalte sain. Les zones plus vives sont plus riches en graviers de basalte peu altérés. Il présente un caractère thixotropique. Les racines sont rares et très fines. La réaction au test de Fieldes et Perrott est positive, mais peu rapide.

La structure dominante qui correspond à 80 % du volume, est à *tendance polyédrique subanguleuse moyenne à grossière peu nette à nette, localement associée à une structure lamellaire grossière*. Une structure *microgrumeleuse peu nette*, très peu représentée en volume (10 à 20 %), est *juxtaposée* à la structure dominante dans la porosité tubulaire racinaire. La porosité globale est assez importante (62 %), essentiellement fissurale fine entre les agrégats polyédriques, et intra-agrégats polyédriques en cavités subarrondies fines ou très fines.

A la tarière, il est bien reconnaissable par sa couleur.

### **Le volume brun-grisâtre à brun-jaunâtre V'7 <sup>1</sup>**

Ce volume est présent en profondeur dans la partie aval de la zone de replat. Dans la fosse, il apparaît vers 110 cm et sa limite inférieure n'est toujours pas atteinte à 240 cm.

Frais, non-organique, c'est un volume de couleur brun-grisâtre foncé à brun 10 YR 4/2 à 5/3 à l'état humide, devenant brun-pâle à brun-jaune clair 10 YR 6/3 à 6/4 à l'état sec. Il présente 10 à 30 % de taches de 2 à 5 mm contrastées et de liserés très fins interrompus et plus diffus, de couleur jaune-rougeâtre à rouge-jaunâtre 7,5 YR 6/8 à 5 YR 5/8 à l'état humide, argilo-ferrugineux. On note aussi 5 à 10 % de taches très fines en ponctuations jaune à jaune très pâle 7,5 YR 8/6 à 8/4 à l'état humide. Sa texture est limoneuse faiblement argileuse, faiblement sableuse (Las). Il contient une charge variable (10 à 40 %) de gravillons et graviers de basalte à patine jaune-brun à brun-jaune 10 YR 6/6 à 6/4 très altérés, très peu contrastés par rapport à la matrice. Certaines passées sont plus graveleuses. La réaction au test de Fieldes et Perrott est négative.

Sa structure est peu nette, à *tendance polyédrique subanguleuse grossière* localement associée une *structure lamellaire grossière* de 1 cm d'épaisseur. La porosité globale reste assez importante (60 %) avec une porosité fissurale fine inter-agrégats polyédriques et une porosité intra-agrégats sous formes de cavités très fines.

A la tarière ce volume est bien reconnaissable par sa couleur brun-grisâtre à jaune-brun. C'est un volume d'altération soit des tufo-laves jaunes soit du basalte.

### **Le basalte, V'8**

Il a été observé en deux affleurements : au sommet et en contrebas du site.

C'est une roche dure à cassure conchoïdale, à patine brun-gris à brun-jaune 2,5 Y 5/2 à 10 YR 5/6, à pâte très fine présentant une structure Sonnenbrenner avec des zones gris foncé à gris 2,5 Y 4/0 à 2,5 YR 5/0, non poreuses et des zones plus claires grises 2,5 Y 6/0 à 2,5 YR 6/0, très finement poreuses, avec 20 à 40 % de phénocristaux. A l'affleurement, il présente un débit en prismes verticaux de 30 à 80 cm de large séparés par des joints de retrait (fissures) de 1 à 4 cm de large. Sur l'affleurement de coupe de route ces prismes sont eux même débités en petits polyèdres polygonaux anguleux (débit cailloutis).

Ce basalte est présent dans tous les sols sous forme d'éléments grossiers, sous des faciès plus ou moins altérées, plus ou moins friables. Il constitue le substrat dur du sommet et de la moitié supérieure du versant où il est présent à de faibles profondeur : 20 à 30 cm.

### **Les tufo-laves V'9**

Ce sont des roches à cassure non conchoïdale, à contours émoussés avec des éléments figurés et une pâte. Elles ont été observées comme éléments grossiers dans les volumes de sol. Elles constituent

<sup>1</sup> Ce volume V'7 correspond au volume de référence AN6 (voir § 2.3).

probablement le substrat de toute la partie inférieure du transect.

Deux types sont différenciables essentiellement sur la base de leur couleur : tufo-lave jaune et tufo-lave rouge.

**Tufo-lave jaune à jaune-rouge V'9a**

La pâte présente une texture comparable à celle des grès, de couleur variable jaune à jaune pâle 10 YR 7/6 à 2,5 Y 7/4 à jaune-rouge à brun-rouge clair 5 YR 6/6 à 5 YR 6/3 à sec; elle est peu poreuse. On observe 40 à 50 % d'éléments scoriacés de couleur gris-rouge foncé à brun-rouge 5 YR 4/2 à 5 YR 4/3 à sec, de taille variable (2 mm à 25 mm), très poreux avec 50 à 70 % de pores vacuolaires. Existents aussi 20 % de phénocristaux gris foncé 7,5 YR 4/0 à sec.

**Tufo-lave rouge V'9b**

La pâte est fine de couleur brun-rougeâtre à rouge 2,5 YR 4/4 à 4/6 à sec. On observe environ 30 % d'éléments figurés fins de 2 à 4 mm, de 2 types : des éléments brun-rouge foncé 2,5 YR 3/4 à sec, peu contrastés par rapport à la pâte, très finement poreux (10 à 30 % de pores vacuolaires); et des éléments plus contrastés rouge très sombre 2,5 YR 2,5/2 à sec, peu poreux. Il existe aussi de nombreux petits phénocristaux (20 %), blancs 5 YR 8/1, translucides, aussi bien répartis dans la pâte que dans les éléments figurés.

**En résumé :**

Le volume superficiel V'1 est bien différencié par rapport aux autres volumes par sa couleur, sa structure, l'importance du chevelu racinaire.

Les volumes médians V'2a<sub>1-2</sub>, V'3, V'5 présentent les uns par rapport aux autres des caractéristiques morphologiques très proches. Ils sont distingués sur la base de faible différence de couleur et/ou de charge en éléments grossiers : ainsi le volume V'2a<sub>1-2</sub> est plus rougeâtre et plus foncé, riche en gravillons de tuf rouge et jaune-rouge; le volume V'3 est plus orangé, le volume V'5 est plus violacé.

Les volumes inférieurs, (volumes V'2a<sub>3</sub>, V'2b, V'4, V'6, V'7) sont bien différenciés par les critères de couleur (V'6, V'7, V'4), d'humidité (V'2a<sub>3</sub>, V'4), de texture (V'2b) qui sont spécifiques à chacun.

## 2.2. Agencement des volumes

La séquence présentée sur la figure III.5 montre la répartition des différents volumes décrits ci-dessus.

### 2.2.1 Agencement vertical des volumes

Quatre modes de *successions verticales* ont été observés le long de ce transect.

- V'1/Basalte (Basalte = V'8); c'est la succession verticale observée pour les sols du sommet et de la moitié supérieure de la pente; l'épaisseur du sol jusqu'au basalte est alors faible : 20 à 30 cm. Il s'agit de Rankers andiques sur basalte.

- V'1/V'2/Tufo-lave (Tufo-laves = V'9); c'est la succession observée pour les sols situés dans la moitié inférieure de la pente; l'épaisseur jusqu'à l'obstacle varie de 20 à 70 cm. Ces sols peuvent être considérés comme des sols andiques moyennement épais brun-rougeâtre sombre, gravillonneux sur tufo-laves. Il y a plusieurs variantes :

- V'1/V'2a<sub>1</sub>/Tufo-lave: sols de faible épaisseur (20 à 25 cm) jusqu'au substrat dur.

- V'1/V'2a<sub>1</sub>/V'2a<sub>3</sub>/V'2b/Tufo-lave : sol de 50 cm jusqu'au substrat dur.

- V'1/V'2a<sub>1</sub>/V'2a<sub>2</sub>/Tufo-lave : sols de 70 cm jusqu'au substrat dur.

Le substrat ou roche-mère est constitué de tufo-lave rouge et/ou jaune, d'après l'importance des gravillons de cette nature dans le profil.

- V'1/V'3a/V'3b/V'4/Tufo-lave; c'est la succession observée pour les sols de bas de pente au début de la zone de replat. Les sols sont alors plus épais : 95 à plus de 120 cm jusqu'à l'obstacle dur (tufo-lave jaune probablement). Ce sont des sols andiques épais brun-rouge orangé très humides en profondeur.

- V'1/V'5/ V'6/V'7 (V'7: altérite jaune-gris); elle correspond à la succession observée pour les sols situés sur la partie aval de la zone de replat; c'est le cas notamment du profil de la fosse F (Fig. III.6). Le substrat dur n'est pas atteint à 120 cm dans tous les sondages, ni à 240 cm dans la fosse. Ce sont des sols andiques très épais brun-rouge violacé sur altérite jaune-gris.

Au sein de chacune de ces successions verticales, les variations entre volumes sont progressives.

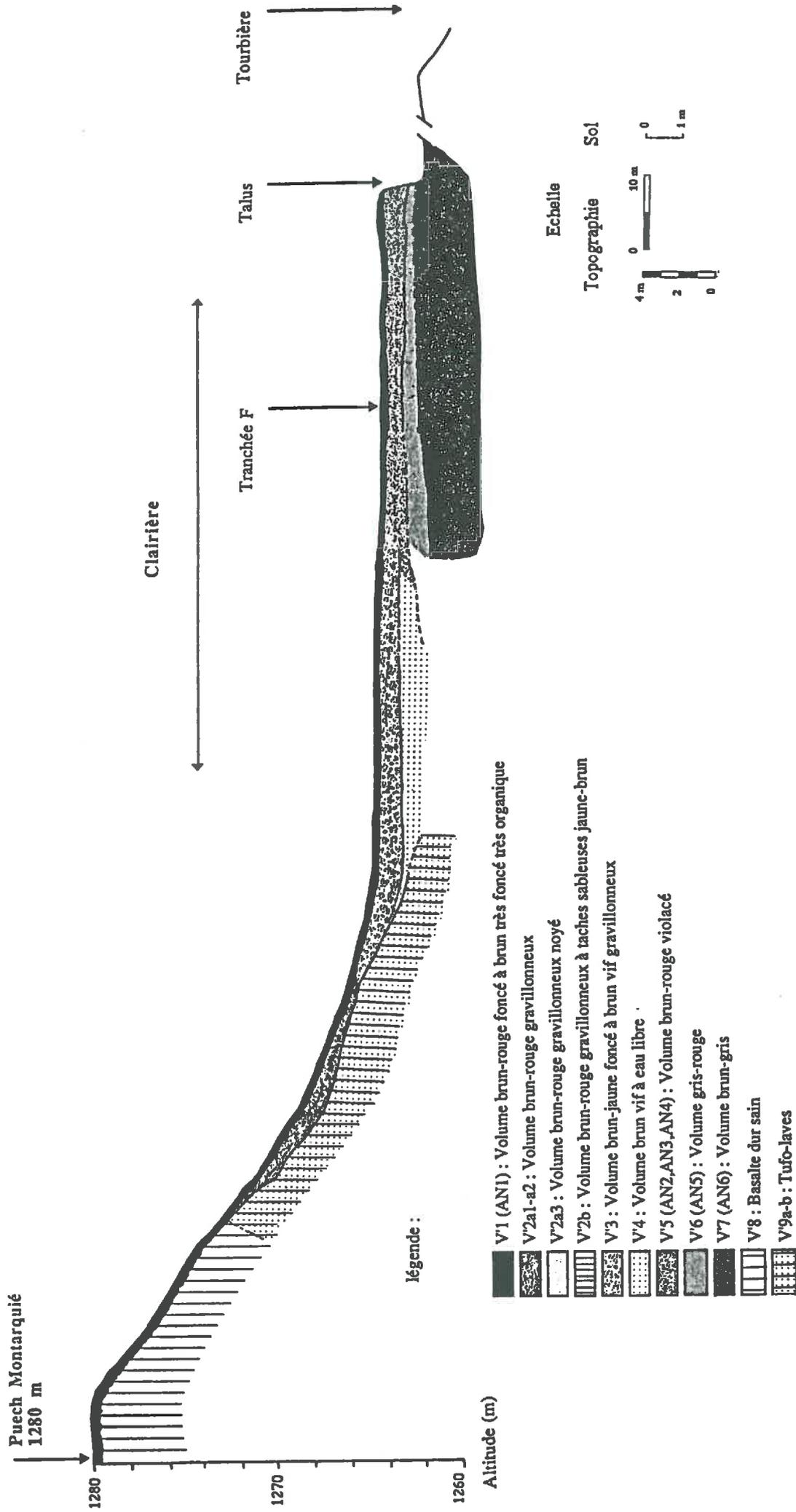


Fig. III.5 : Séquence 2 Puech Montarqué : Distribution bidimensionnelle des volumes

### 2.2.2 Agencement latéral des volumes

Le volume superficiel V'1 est présent sur l'ensemble de la séquence sur une épaisseur de 10 à 30 cm. En milieu de pente, sous V'1, apparaît le volume brun-rouge sombre gravillonneux V'2; ce dernier persiste sur une épaisseur de 10 à 55 cm sur toute la moitié inférieure de la pente puis est progressivement remplacé par le volume brun-rouge orangé V'3, tandis qu'en profondeur apparaît le volume brun-vif V'4 noyé. A l'aval de la zone de replat, le volume V'3 passe progressivement au volume brun-rouge violacé V'5 tandis qu'en profondeur, apparaît le volume gris-rouge V'6 surmontant le volume d'altérite brun-gris V'7.

Les variations latérales entre les différents volumes *médians* sont faibles et très progressives. Les différences entre ces volumes reflètent en atténué les différences qui existent entre les volumes profonds sous-jacents. Cette "homogénéisation" des volumes médians s'explique par une incorporation profonde de la matière organique qui confère aux sols une couleur sombre sur une grande épaisseur; la roche-mère toujours basique et à forte teneur en fer leur donne à tous une couleur rougeâtre; de plus les phénomènes de colluvionnement le long de la pente forte tendent aussi à homogénéiser les sols.

Les volumes *inférieurs* V'2a3, V'2b, V'4, V'6, V'7 varient selon leur position dans le transect. Leurs caractéristiques semblent déterminées par des variations de faciès des roches volcaniques sous-jacentes et/ou par leur position par rapport aux voies de circulation préférentielle de l'eau selon le jeu de la pente, 2 facteurs variant le long de la pente (variations lithologiques et variations de fonctionnement hydrique).

### 2.3. Synthèse et Conclusion

#### Sols exclusivement à caractères andiques : du "Ranker andique" à l'"Andosol"

Les sols de cette séquence développés sur roches volcaniques basiques plus ou moins poreuses, à altitude relativement élevée, sous climat froid et constamment humide, présentent tous des caractères andiques. Leur épaisseur est très variable : 20 à plus de 240 cm jusqu'à la roche dure. Les sols de l'amont peu épais sont comparables aux "rankers andiques" de la séquence Puech Roux. Les sols développés à l'aval, profonds, présentent des *caractères morphologiques andiques bien développés* (Moinereau, 1977; Leamy et al, 1980; Quantin, 1972, 1982; R.P.F., 1990) sur une grande épaisseur comme c'est le cas du profil observé sur la tranchée F.

Ce profil apparaît assez homogène morphologiquement. Profond, il présente : une couleur humide foncée (clarté de 3) sur une grande épaisseur, de teinte brun-rouge influencée par le matériau parental très basique et riche en fer. Il est riche en matière organique bien humifiée jusqu'à une profondeur importante (encore 3,4 % à 50 cm); ce qui traduit à la fois une bonne décomposition et un lent turn-over de la matière organique. Il présente une texture apparente limoneuse fine, un toucher gras, onctueux, fluant, doux; une thixotropie nette, notamment entre 20 et 60 cm. Il possède une forte humidité : la teneur en eau pondérale mesurée à l'humidité au champ (au printemps) est de 90 à 70 % jusqu'à 40 cm de profondeur. C'est un profil bien drainé, sans engorgement apparent même après une forte pluie. La structure des volumes supérieurs (V'5a, V'5b et V'5c) est apparemment continue; elle se révèle finement microgrumeleuse, fluffy, floconneuse, "farineuse" plus ou moins généralisée à l'observation fine. C'est dans le volume V'5b, entre 20 et 40 cm, qu'elle est le plus pleinement développée. Elle s'effrite en poudre à l'état sec. Elle donne des volumes très poreux, à très faible densité apparente : la densité apparente mesurée au densitomètre à membrane est de 0,43 à 0,9 sur les 60 premiers cm. L'"aspect continu" de la structure observé à l'humidité de terrain s'explique par cette structure très finement poreuse, très "généralisée", très fine. Le chevelu racinaire est très dense jusqu'à 20 cm; les racines sont moins abondantes aux profondeurs supérieures mais restent présentes jusqu'à 1 mètre. La réaction au test de Fieldes et Perrott (1966) est vive et rapide notamment entre 30 et 60 cm. Par ailleurs on ne note aucune trace macromorphologique d'éluviation-illuviation au moins jusqu'à 110 cm.

Ce sol sera qualifié par la suite d'"Andosol Montarqué".

Six volumes pédologiques, qui seront considérés comme caractéristiques des "Andosols" épais de cette région seront étudiés plus finement par la suite; nous leur attribuerons les lettres "AN"; tous sont présents au niveau de la fosse F (Fig. III.6) sur laquelle ils ont été prélevés:

- le volume V'1, renommé AN1;
- le volume V'5a, renommé AN2;
- le volume V'5b, renommé AN3;
- le volume V'5c, renommé AN4;
- le volume V'6, renommé AN5;

- le volume V'7, renommé AN6.

### Sols représentatifs de l'Aubrac volcanique

Les sols de cette séquence sont bien représentatifs des sols de l'Aubrac volcanique observés lors de prospection. Cette séquence et les sols représentés sont aussi proches de sites décrits par Hétier dans le Cantal (Hétier, 1975).

Cette séquence présente des sols andiques d'épaisseur très variable, à variations latérales et verticales très progressives, volumes médians très peu différenciés, à caractères nettement andiques, volumes profonds bien différenciés par des caractères en relation avec des variations lithologiques et/ou de fonctionnement hydrique le long de la pente.

*L'épaisseur très variable* des sols le long du versant peut s'expliquer par 2 hypothèses non exclusives l'une de l'autre, lithologique et géomorphologique. Les sols les moins épais sont situés au sommet et dans la moitié supérieure de la pente soit dans des positions topographiques plus sensibles à l'érosion; par ailleurs ces sols sont développés sur des basaltes massif, durs et peu poreux. Les sols les plus épais sont situés sur la partie aval du transect, notamment en bas de pente forte, soit dans des positions plus susceptibles à recevoir des apports par colluvionnement, solifluxion ; par ailleurs ils semblent développés sur des formations volcaniques de type tufo-laves qui, plus poreuses et plus tendres, sont susceptibles de s'altérer plus facilement et de favoriser un développement plus rapide des sols (Quantin, 1982).

Sur ce site, comme fréquemment par ailleurs en Aubrac volcanique, *l'influence périglaciaire* et/ou glaciaire sur le modelé et les sols est attestée par la présence de figures de phénomènes de transport de type solifluxion et/ou moraines (Derruau, communication orale, 1989). On note ainsi des volumes à forte charge en éléments grossiers hétérométriques (blocs, pierres, cailloux, graviers) de basalte sain peu altérés à contours émoussés mélangés à la matrice meuble. C'est le cas notamment sur la partie aval du replat sur le talus et sur le profil de la fosse F où le volume V'5c (AN4) riche en éléments grossiers de basalte dur, sain, à contours émoussés, de taille variable surmonte des volumes profonds V'6 et V'7 (AN5, AN6) à éléments grossiers plus rares, très altérés, moins grossiers. Ceci traduirait une rupture entre l'ensemble inférieur V'6, V'7 (AN5, AN6) de profondeur supérieure à 60 cm, et l'ensemble supérieur dont l'horizon V'5b (AN4) constituerait la base. Cet ensemble supérieur pourrait avoir été ainsi "transporté" sur l'ensemble inférieur.

La présence d'une structure lamellaire observée sur la fosse dans les volumes profonds : V'6 et V'7 (AN5 et AN6) pourrait être interprétée comme résultant de l'action du gel-dégel, aux périodes périglaciaires (Van Vliet-Lanoë, 1988).

On pourrait proposer le schéma chronologique suivant : 1) pré-existence probable des volumes profonds V'6 et V'7 soumis à des périodes de gel intense avec formation d'une structure lamellaire; 2) ensemble supérieur vraisemblablement soliflué sur ces horizons profonds.

## 3. Conclusion du chapitre III

### 3.1 Synthèse des deux séquences étudiées : Puech Roux et Puech Montarquié

La séquence 1 "Puech Roux" a permis de présenter les grandes caractéristiques des sites de coexistence sols andiques - sols bruns acides. Nous avons pu montrer que dans ces situations, même si la contamination des sols bruns acides situés à l'aval par les sols andiques amont était réelle, c'était avant tout l'influence de la roche-mère qui déterminait les caractéristiques et l'évolution "pédogénétique" des sols, et que cette séquence pouvait être qualifiée de lithoséquence.

La séquence 2 "Puech Montarquié" a permis de décrire des sols andiques plus épais et à propriétés andiques apparemment mieux exprimées le long d'un versant tel qu'il est fréquent d'en rencontrer dans l'Aubrac volcanique. Les variations latérales et verticales entre volumes andiques étant alors très progressives, peu marquées, déterminées par le faciès de la roche volcanique sous-jacente et par des variations de fonctionnement hydrique.

## PLANCHE I

Photos de blocs de sol (prélevés sur plan horizontal), déshydratés par échange eau-acétone, imprégnés par résine à pigment fluorescent et éclairés aux rayons ultraviolets : les vides apparaissent en blanc; la matrice solide en noir.

Fig. III.7 : Structure des volumes de l'andosol "Montarquié" :

- Photo 1 : horizon AN1
- Photo 2 : horizon AN2
- Photo 3 : horizon AN3
- Photo 4 : horizon AN4
- Photo 5 : horizon AN5
- Photo 6 : horizon AN6

2

Fig. III.8 : Structure des volumes du sol brun acide "Puech Roux" :

- Photo 1 : horizon BA1
- Photo 2 : horizon BA2
- Photo 3 : horizon BA3
- Photo 4 : horizon BA4
- Photo 5 : horizon BA5
- Photo 6 : horizon BA6

Fig. III.7

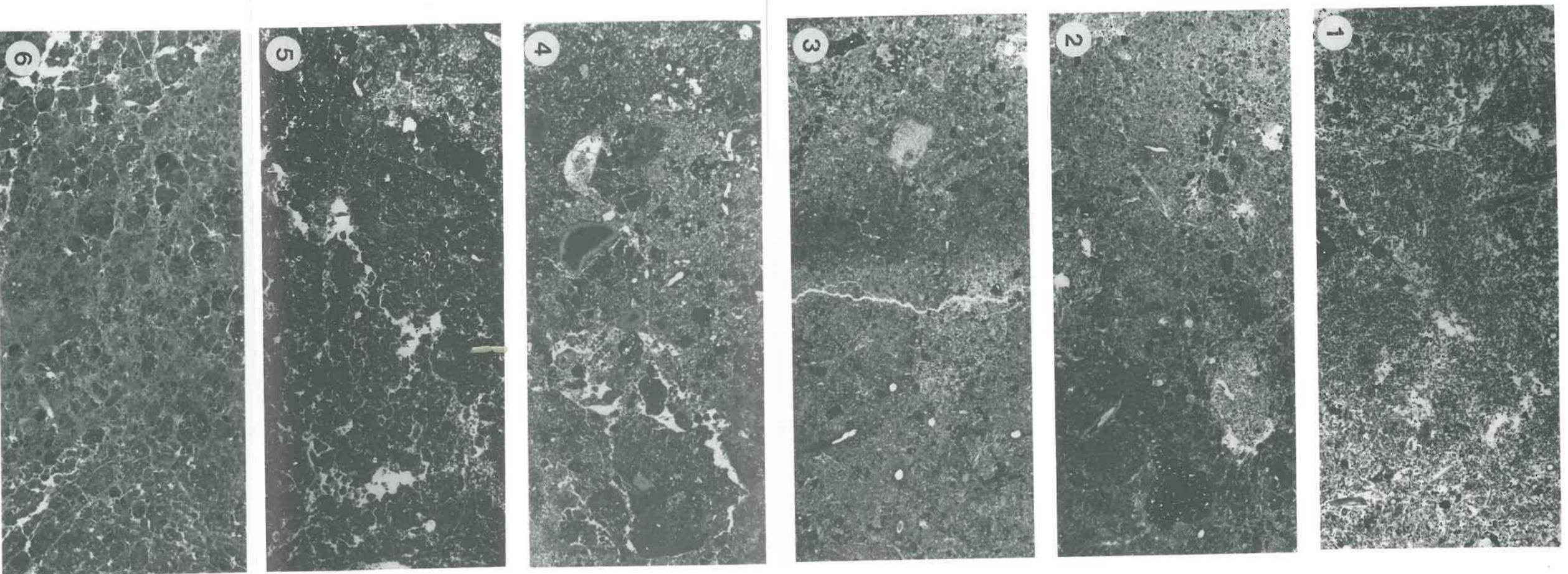
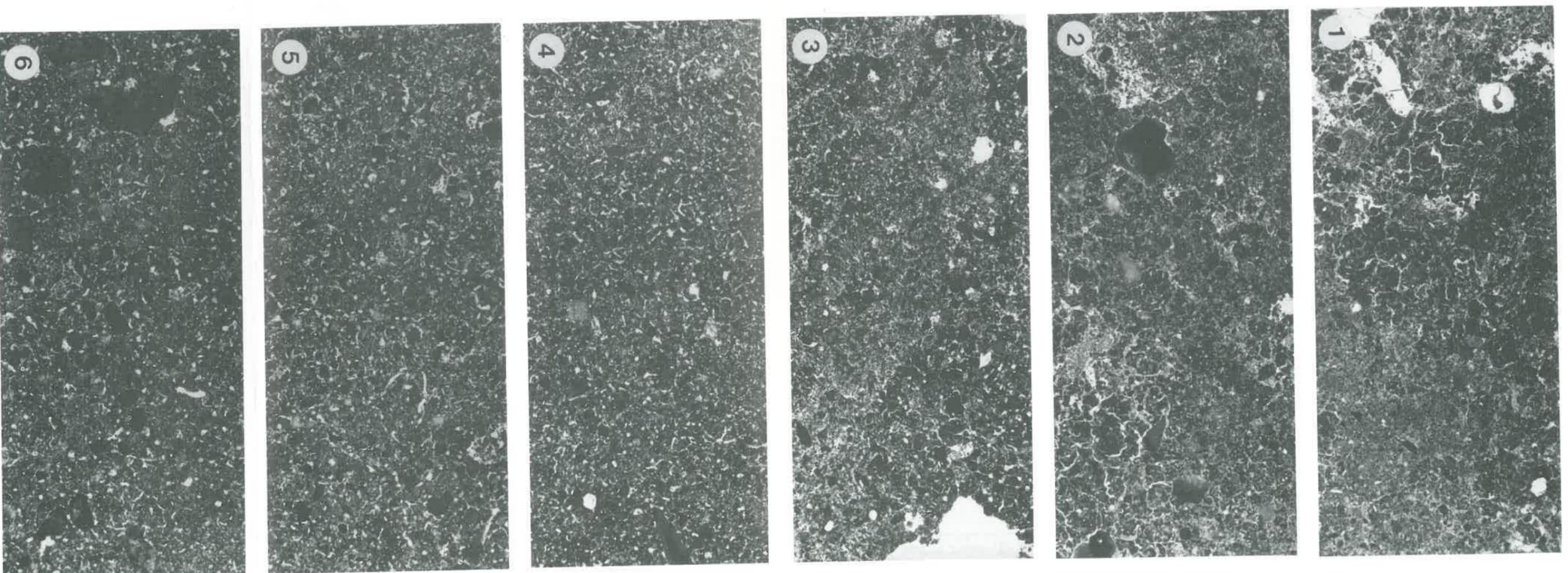


Fig. III.8



Echelle : 0 1cm

Quatorze volumes pédologiques ont été sélectionnés pour des études plus fines dans la suite de ce travail :

\* 8 volumes de sols andiques :

- 6 volumes pédologiques d'andosol Montarquié : AN1, AN2, AN3, AN4, AN5, AN6. Ils sont situés sur une même verticale et permettront de suivre l'évolution au sein d'un même profil des caractéristiques étudiées.

- 2 volumes pédologiques de rankers andiques de l'amont de la séquence Puech Roux : K1 et K2.

\* 6 volumes de sol brun acide : BA1, BA2, BA3, BA4, BA5, BA6 situés sur une même verticale et qui permettront de suivre l'évolution des volumes d'un sol brun acide.

### 3.2 Premiers éléments de comparaison entre sols andiques et sols bruns acides

Au cours de ce chapitre, nous avons procédé à une description macro-morphologique des volumes pédologiques de deux grands types de sols : des sols bruns acides d'une part, des sols andiques (rankers et andosols) d'autre part.

Une première comparaison permet de mettre en évidence une certaine convergence des caractères morphologiques entre sols andiques et sols bruns acides, mais aussi des divergences.

Les structures des différents volumes pédologiques étudiés, peuvent être visualisées sur la figure III.7 pour l'andosol et sur la figure III.8 pour le sol brun acide.

#### Convergence

Au niveau de l'apparence générale du profil, les 2 types de sol apparaissent comme assez homogènes morphologiquement, avec des variations progressives des caractéristiques de couleur, texture et structure notamment. C'est un des faits qui a notamment abouti à la définition floue d'un horizon dit (B) cambique dans la classification américaine (Aurousseau et al., 1985).  
Notons dans les 2 cas un chevelu racinaire jusqu'à une grande profondeur.

Au niveau structure, les 2 types de sol présentent sur la partie supérieure et médiane des profils une structure à composantes microgrumeleuses et polyédriques subanguleuses. Dans les 2 cas la structure microagrégée semble plus développée et surtout à porosité associée plus grossière au voisinage des racines.

Au niveau évolution verticale des structures, on observe une évolution générale comparable dans les 2 types de profils :

- horizons superficiels (AN1, BA1) : à structure microgrumeleuse à grumeleuse;
- horizons intermédiaires (AN3 et BA3) : à structure microgrumeleuse la plus développée, plus fine que dans l'horizon superficiel.
- horizons profonds (AN5, AN6 et BA5, BA6) à caractère plus dense.

Au niveau des traces morphologiques éventuelles d'éluviation - illuviation, dans les 2 types de sol, elles paraissent absentes dans la plus grande partie du profil; des traces de tels phénomènes semblent cependant attestées dans les volumes profonds, sous forme de taches rouilles dans le volume AN6 de l'Andosol, sous forme de traînées rouilles dans le volume BA5 du sol brun acide.

#### Divergence

Certains caractères morphologiques sont très nettement différents entre les 2 types de sol :

- la couleur : foncée dans les sols andiques, nettement plus claire dans le sol brun acide. Ce caractère est très lié à la teneur en matière organique : matière organique très abondante et incorporée profondément dans le profil d'andosol; teneur plus faible dans le sol brun acide.
- la texture : texture moyenne à fine dans l'andosol, apparemment à dominance limoneuse fine; texture grossière à moyenne dans le sol brun acide, limono-sableuse à sablo-limoneuse avec une part importante de sables grossiers quartzeux.
- le toucher : doux, onctueux et thixotropique dans les volumes d'andosol; râpeux, jamais thixotropique dans le sol brun acide.

### La structure

- la macroporosité : si dans les 2 types de sol, on observe un chevelu racinaire important en surface diminuant en profondeur mais présent jusqu'à une profondeur importante dans les 2 cas; la macroporosité est plus développée dans le sol brun acide, notamment du fait de l'activité de la macrofaune : galeries de vers de terre (Fig.III.7a, b, c et Fig.III.8 a, b, c).

- si dans les 2 types de sol, pour les volumes supérieurs 1 à 4, la structure est à composantes microgrumeleuse et polyédrique, la taille des agrégats, de la porosité associée et surtout son caractère de "généralisation" varie (Fig.III.7 et III.8) : dans l'andosol, la structure est d'apparence *continue*; ceci est dû à une structure générale très finement poreuse, devenant poudreuse à l'état sec; par ailleurs la structure microagrégée est plus *généralisée*; le volume le plus microagrégé AN3 est "*farineux*". Dans le sol brun acide, la structure est moins finement poreuse, la porosité est moins fine, la structure microgrumeleuse et la porosité polyconcave associée est moins *généralisée* et il existe une porosité fissurale fine; le volume BA3 le plus microagrégé est "*boulant*".

Enfin, la porosité globale est plus forte et plus fine dans l'andosol par rapport au sol brun acide.

- volumes profonds : si dans les 2 types de sol la structure est plus massive et moins nettement exprimée par rapport aux horizons supérieurs; dans l'andosol, les horizons inférieurs AN5 et AN6 présentent une porosité fissurale et une structure à tendance polyédrique localement associée à une structure lamellaire, tandis que dans les horizons inférieurs du sol brun acide, la structure est plus massive, très mal exprimée et avec une porosité essentiellement intra-agrégats vacuolaires.

Pour poursuivre cette comparaison, il a semblé intéressant d'approfondir certains points comme la caractérisation des constituants, la caractérisation plus fine des structures et porosités associées, la caractérisation du comportement physico-hydrrique de chacun de ces sols et d'essayer de voir comment les caractéristiques de constitution et structure pouvaient influencer sur les caractères physiques de ces sols. Ce sera là l'objectif fixé des chapitres qui suivent.

## Chapitre IV

# Données physico-chimiques et minéralogiques

### Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre la caractérisation minéralogique et physico-chimique des 14 volumes pédologiques choisis à partir de l'étude de terrain : 6 volumes de sols bruns acides et 8 volumes de sols andiques. L'objectif est de mieux cerner les caractères et les propriétés de ces volumes, d'appréhender le contexte physico-chimique ambiant, et d'établir des relations entre divers paramètres (morphologie, minéralogie...). Cette partie permettra aussi de se caler par rapport aux travaux effectués par d'autres auteurs et par rapport aux classifications.

La caractérisation des matériaux andiques pose différents problèmes qui seront évoqués au cours de ce chapitre. Notons dès à présent une modification souvent irréversible de leurs propriétés physico-chimiques par séchage à l'air. Les propriétés d'échantillons séchés, telles qu'elles sont classiquement étudiées au laboratoire sont donc de valeur très limitée pour prédire le comportement de ces sols au champ. Elles doivent plutôt être mesurées à la teneur en eau naturelle; c'est le principe que nous avons adopté pour la plupart des analyses.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu les résultats concernant la matière organique et la granulométrie, puis l'analyse des constituants par diffraction de rayons X et par dissolution sélective, et enfin les résultats des analyses physico-chimiques (pH, complexe adsorbant, CEC, rétention du phosphore).

## 1. Matière organique et granulométrie

### 1.1. La matière organique

Les déterminations ont été réalisées au laboratoire d'Arras, sur sol séché à l'air, tamisé à 2 mm. Le carbone total et l'azote total ont été dosés respectivement selon la méthode Anne (oxydation au Bichromate de Potassium) et la méthode Kjeldahl. La quantité de matière organique est estimée à partir de la teneur en carbone :  $M.O. (\%) = 1,72 \times C (\%)$ . Les résultats sont présentés sur la figure IV.1.

Dans les sols andiques, la teneur en matière organique est très importante dans les volumes de surface des sols andiques et ce aussi bien dans l'andosol sous forêt (26 %) que dans les rankers andiques sous prairie, à moindre altitude (24 et 21 %). Malgré cette accumulation importante de matière organique, les rapports C/N sont moyennement élevés (13 à 11) et témoignent d'un assez bon degré d'humification.

Dans l'andosol, la quantité de matière organique s'abaisse rapidement avec la profondeur mais reste de 3,3 % dans AN4, à 50 cm de profondeur; dans ce dernier volume, le rapport C/N chute à 10 indiquant une meilleure minéralisation par rapport aux volumes sus-jacents. Dans les volumes profonds, le taux de matière organique devient inférieur à 1 %.

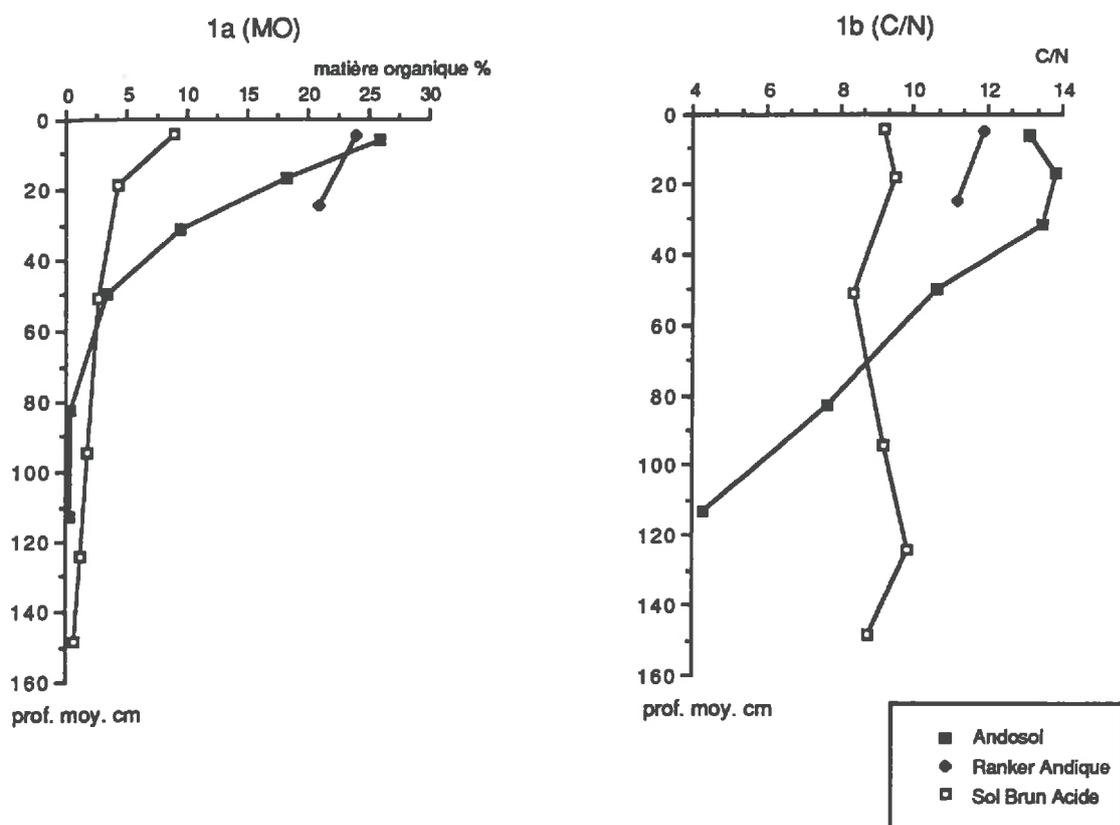


Fig. IV.1 : Evolution verticale des teneurs en matière organique (1a) et des rapports C/N (1b) dans l'Andosol, le ranker andique et le sol brun acide.

Dans le sol brun acide, la teneur en matière organique est nettement plus faible : de 9 % dans le volume superficiel, elle chute à 4,4 % dans le volume sous-jacent, puis diminue progressivement vers la profondeur. Le rapport C/N est moins élevé que dans les sols andiques et reste à peu près constant dans l'ensemble du profil (C/N de 9).

## 1.2. Granulométrie

De nombreux auteurs mentionnent les difficultés rencontrées pour obtenir la dispersion des fractions fines dans les sols développés sur matériaux volcaniques (Maeda et al, 1977; Wada 1977; Warkentin et Maeda, 1980; Quantin, 1982; etc...). Ces difficultés sont notamment attribuées aux fortes liaisons organo-minérales, au phénomène de déshydratation irréversible formant des pseudo-sables, au comportement électropositif des complexes riches en hydroxydes, à la variabilité du comportement suivant la composition des complexes...(Quantin, 1991). La dispersion est gênée à la fois par les forces chimiques de floculation dans les gels d'allophanes sur les échantillons non desséchés (liées aux propriétés amphotères de ces constituants) et par les forces physico-chimiques de cimentation tendant à former des particules plus grossières dans les échantillons séchés (Warkentin et Maeda, 1980).

Le critère généralement utilisé pour une méthode de dispersion est la production d'une quantité maximum de matériel fin. Les auteurs préconisent différents prétraitements : destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, traitement aux ultrasons, destruction des ciments amorphes par dissolutions sélectives et au moment de la dispersion, ajustement du pH selon la composition du sol afin d'éviter la floculation.

Il n'y a pas une meilleure méthode de dispersion valable pour tous les andosols mais la méthode utilisée la plus fréquemment consiste en une dispersion aux ultrasons d'une suspension de sol *non desséché*, à pH 3 ou à pH supérieur à 9 selon la composition du sol, en utilisant un *polyphosphate* comme défloculant chimique, avec souvent destruction préalable de la matière organique (Warkentin et Maeda, 1980).

### Méthodes utilisées

\* C'est cette méthode avec dispersion à pH alcalin, qui a été utilisée pour les analyses granulométriques des 14 volumes pédologiques choisis. Elle a été réalisée à l'ORSTOM selon le protocole suivant (méthode notée "Hu") :

Les échantillons de sol conservés frais et tamisés à 4 mm, ont été soumis à un traitement H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (à 40 volumes) à froid pour détruire la matière organique, puis à un traitement ménagé aux ultrasons afin de briser les ciments organo-minéraux, traitement effectué sur un temps limité pour ne pas affecter la cristallinité des minéraux. Après tamisage des fractions les plus grossières, la suspension de particules < 50 µm a été dispersée à l'hexamétaphosphate de sodium (utilisé à faible concentration : 0,04 g/l, afin de réduire les phénomènes d'adsorption de phosphates par les échantillons), et ce, à pH alcalin adapté à la composition des sols étudiés. La répartition des particules a été suivie au sédigraph. Il n'y a pas eu de problème de floculation.

\* A titre comparatif, une analyse granulométrique classique sur sol séché à l'air et agitation standard (méthode classique pipette, notée "St"), a été réalisée à Arras.

#### 1.2.1 Comparaison des spectres granulométriques obtenus sur échantillons maintenus humides et sur échantillons séchés à l'air

Quatre échantillons ont fait l'objet de ces comparaisons : les volumes intermédiaire (AN3) et profond (AN6) de l'andosol, le volume de surface du ranker andique (K1) et le volume intermédiaire (BA3) du sol brun acide.

##### 1.2.1.2 Résultats

Pour les volumes AN3 et AN6 de l'Andosol, le séchage à l'air entraîne : une nette augmentation des fractions les plus grossières (supérieures à 20 µm), notamment des *sables fins*; une nette diminution des fractions fines (inférieures à 20 µm), en particulier de la *fraction argile*. C'est dans le *volume médian microagrégé AN3* que le phénomène est le plus accentué : sur sol séché à l'air, le pourcentage "argile+limons fins" est divisé par 2,6 tandis que la quantité de sables est multipliée par 5 (Fig.IV.2a). Le spectre granulométrique est aussi beaucoup plus étalé.

Pour le *volume profond AN6*, la différence selon les 2 méthodes reste importante bien que moins accentuée (Fig. IV.2b).

Dans le *volume superficiel K1 du ranker andique*, seules sont affectées les quantités d'argile et celles de sables fins et grossiers, les premières diminuant de 10 % au profit des secondes par séchage à l'air (Fig.IV.2c).

Dans le *volume médian BA3 du sol brun acide*, les variations du spectre granulométrique selon les deux méthodes sont nettement réduites (Fig. IV.2d) mais les argiles diminuent encore de 32 à 24 % au profit de chacune des fractions supérieures à 20 µm, notamment des limons grossiers. Comme dans le cas du ranker andique, la quantité de limons fins n'est pas affectée par la méthode utilisée.

##### 1.1.1.2 Discussion

Pour l'échantillon du sol brun acide, l'écart selon les 2 méthodes est faible et il est possible qu'il ne soit guère significatif. : on ne peut exclure l'hypothèse d'une microdivision des fractions limoneuses par les ultrasons (Robert et Tessier, 1974), bien que le traitement ultrasonique soit ici effectué de manière très ménagée. Notons aussi une possible surestimation des argiles par la technique Sédigraph par rapport à la méthode pipette.

Par contre, pour les échantillons de sols andiques, les écarts sont nettement significatifs. Ces différents modes d'analyse granulométrique montrent qu'une organisation du sol en agrégats stables de la taille des sables se forme lors de la dessiccation pour ces échantillons. On retrouve ici le phénomène de "pseudo-sables" : pseudo-particules au sein desquelles sont "agrégées" des particules plus fines; ce phénomène est cité par de nombreux auteurs tant pour des sols contenant une forte proportion de constituants amorphes que pour des sols à halloysite, ou pour des oxisols (Kubota, 1972; Wesley, 1973). Les expériences de Kubota (1972) qui mène des analyses granulométriques sur des échantillons préalablement équilibrés avec différentes contraintes hydriques (Fig. IV.3) montrent que ces modifications du spectre granulométrique lors de la déshydratation interviendraient dès les faibles contraintes hydriques (pF de 3 à 4).

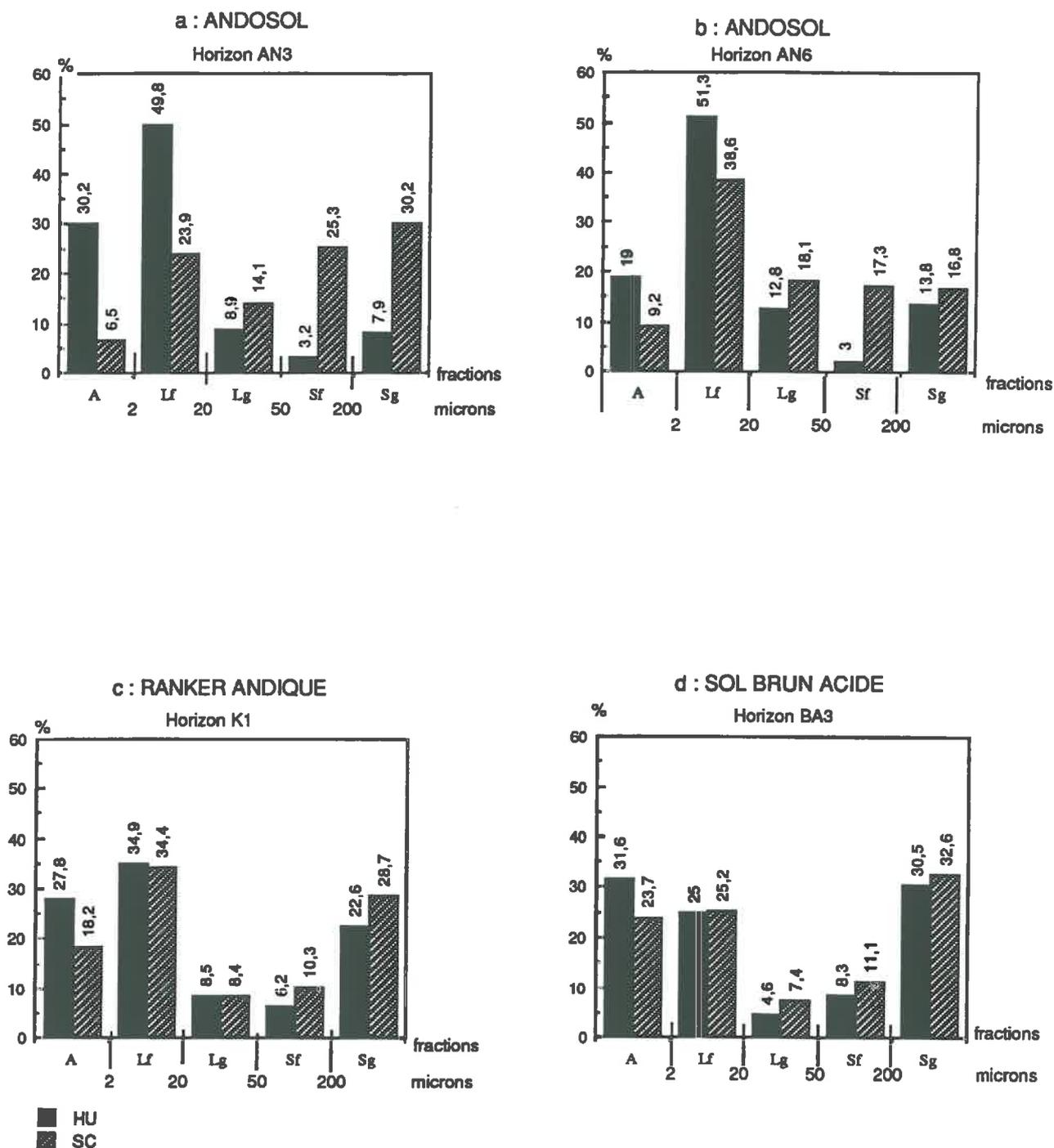


Fig. IV.2 : Comparaison des spectres granulométriques selon les 2 méthodes "Hu" (sol conservé frais et traité aux ultrasons) et "St" (sol séché à l'air; méthode classique) pour les horizons intermédiaire AN3 (a) et profond AN6 (b) de l'andosol; pour l'horizon K1 du ranker andique (c) et pour l'horizon intermédiaire BA3 du sol Brun acide (d).

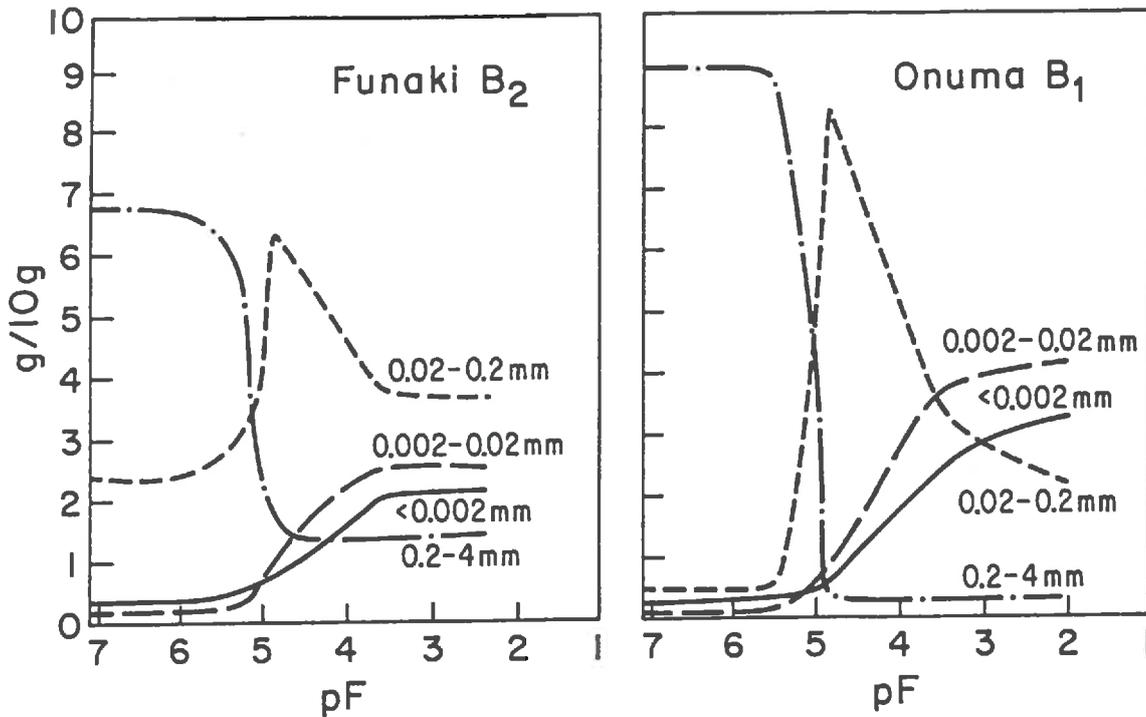


Fig. IV.3 : Distribution de la taille des particules de 2 sols allophaniques après déshydratation à différentes valeurs de succion (Kubota, 1972 - in Warkentin et Maeda, 1980).

La comparaison des deux méthodes montre combien il est difficile, voire illusoire de vouloir déterminer avec certitude les teneurs en argile sur de tels matériaux. Les résultats dépendent énormément des méthodes qui doivent toujours être précisées. Cela souligne en outre, le caractère aléatoire de tout critère de classification basé sur de tels résultats (Soil Survey Staff, 1975 notamment) à fortiori si les méthodes employées ne sont pas strictement comparables.

Notons que les résultats de granulométrie obtenus sur échantillons humides dispersés aux ultrasons paraissent nettement plus proches de la texture estimée sur le terrain.

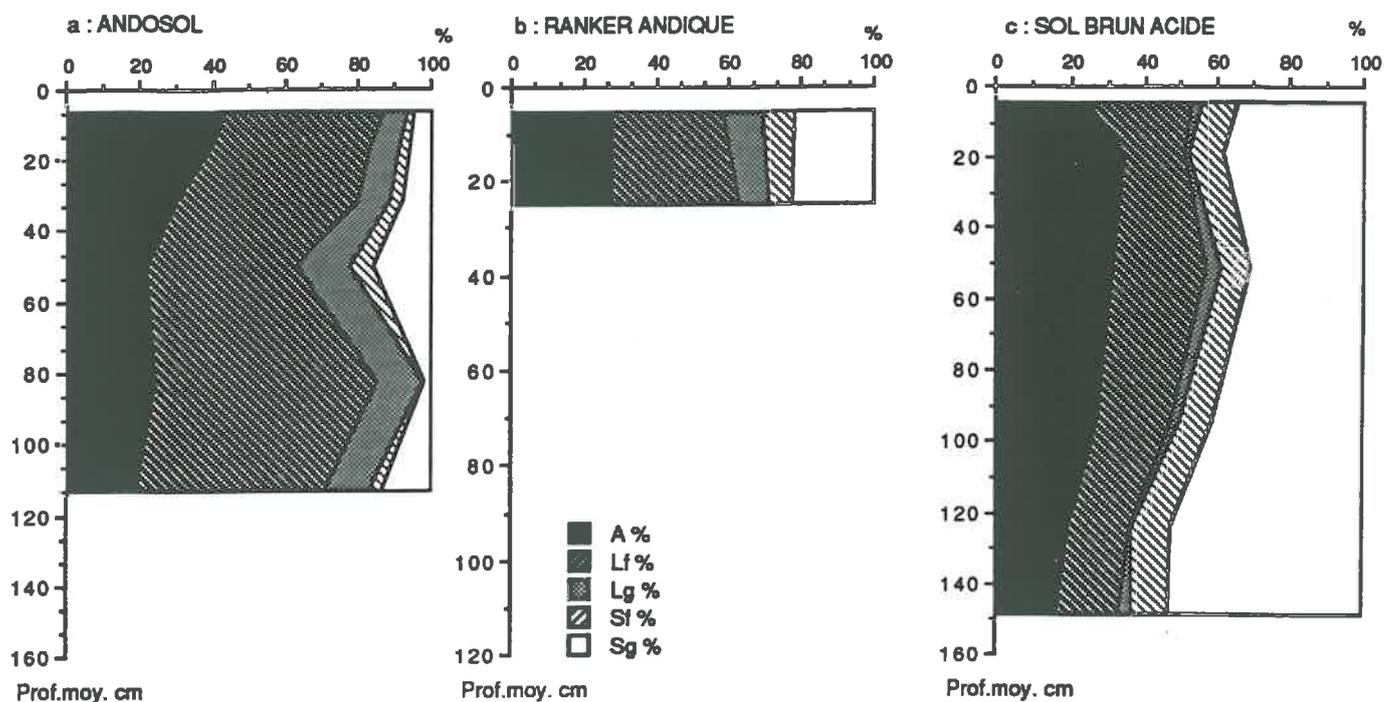


Fig.IV.4 Profils granulométriques pour l'andosol (a), le ranker andique (b) et le sol brun acide (c).

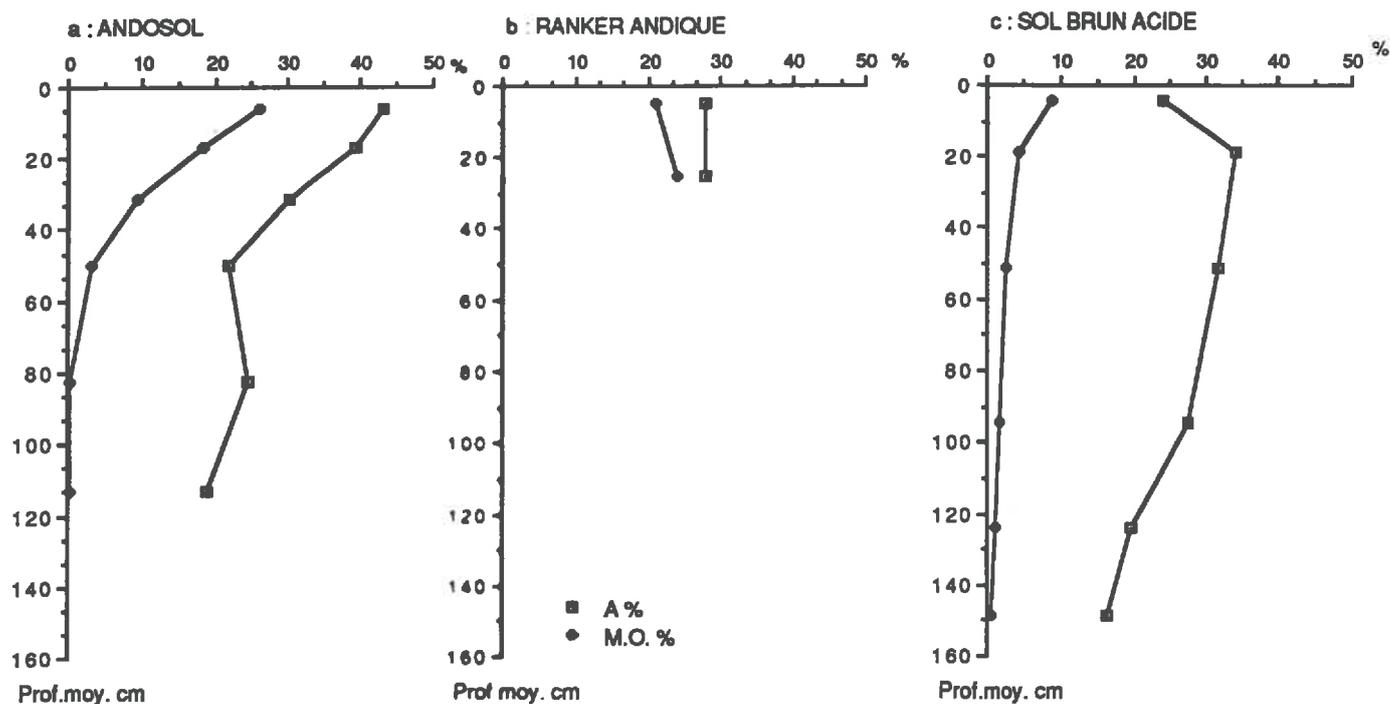


Fig. IV.5 Comparaison des profils de teneurs en matière organique et de teneurs en particules < 2µm pour l'andosol (a), le ranker andique (b) et le sol brun acide (c)

### 1.2.2. Les profils granulométriques des sols andiques et du sol brun acide sur sol conservé frais

Dans l'andosol, pour l'ensemble des horizons, la texture est fine : les fractions inférieures à 20 µm (argile+limon fin) constituent 63 à 87 % du sol tamisé à 4 mm (Fig.IV.4a).

Les argiles, relativement abondantes, augmentent globalement de la base au sommet du profil, de 19 à 43 %. Les sables, essentiellement grossiers, présentent un maximum de 20 % dans le volume intermédiaire AN4 qui est aussi plus riche en éléments grossiers de basalte.

On note un remarquable parallélisme des courbes d'argile et de matière organique (Fig.IV.5a) qui peut s'expliquer par la forte association de ces 2 types de colloïdes en complexes organo-minéraux.

Dans le ranker andique, la granulométrie est plus grossière (Fig.IV.4b) : les fractions sables, limons et argiles constituent chacune 30 % de la fraction inférieure à 4 mm; ce qui traduit un stade d'altération moins avancé que pour l'andosol.

La granulométrie du sol Brun Acide est caractérisée par l'abondance des sables grossiers qui diminuent relativement vers la surface (de 50 à 35 %) (Fig. IV.4c). C'est un profil relativement bien pourvu en argile (24 à 34 %) avec un maximum dans le volume de sub-surface BA2 plus compact, sans cependant d'indice de phénomène d'éluviation-illuviation. On note une faible quantité de particules de taille intermédiaire 20 à 200 µm (Lg+ Sf : 13 à 11 %).

Verticalement, chacune des fractions granulométriques évolue peu et ce sol présente peu de différenciation texturale.

## 2. Analyse des constituants

Dans la plupart des classifications, le critère retenu comme la caractéristique la plus spécifique des andosols est l'abondance des produits dits "amorphes". Sous le nom "produits amorphes" sont souvent regroupés toute une gamme de complexes tant organiques que minéraux, sous des états très divers, qui vont des composés amorphes aux constituants "paracristallins" (Quantin et Bouleau, 1983) notamment :

- des ions adsorbés de type hydroxyalumineux par exemple;
- des complexes organo-métalliques;
- des gels d'hydroxydes;
- des minéraux silicatés paracristallins ou amorphe dits "minéraux à organisation cristalline à courte distance" (A.I.E.P.A, Herbillon 1983) appartenant soit au système  $Al_2O_3, SiO_2-H_2O$  comme les imogolites ou les allophanes s.s. ou comme les opales alumineuses (Herbillon, 1983), soit au système  $Fe_2O_3-SiO_2, H_2O$  comme les ferrihydrites, ou les hisingérites.

Ces composés "amorphes" présentent des caractères généraux qui leur sont spécifiques et qui expliquent la difficulté qu'il y a à les caractériser (Pedro, 1983) :

- ils présentent une composition chimique mal définie et variable; ce sont toujours des composés hydratés et hydroxylés;
- ils sont toujours de très petite taille (diamètre < 0,1µm);
- leur constitution structurale est mal définie;
- leur réactivité chimique est relativement élevée

La structure de ces composés correspond à "une organisation cristalline imparfaite" caractérisée par des états : soit "paracristallin" (présentant un ordre à grande distance dans 1 ou 2 directions de l'espace et donnant seulement des bandes relativement larges sur les spectres de diffraction des rayons X), soit "amorphe ou désorganisé", (ne présentant plus d'ordre à grande distance, mais souvent à courte distance : arrangement de 5 à 10 atomes, et ne donnant alors plus de réflexions de Bragg en diffraction des R.X), c'est à dire sous 2 états ne présentant pas d'ordre à grande distance mais seulement un ordre à courte distance. C'est ce qui fait la difficulté d'étude de leur constitution, notamment par les R.X.

La réactivité chimique élevée résulte avant tout de leur constitution structurale désorganisée et aussi de leur grande surface spécifique découlant elle-même de leur petite dimension. Ils sont plus sensibles aux dissolutions chimiques que les minéraux argileux cristallisés et la dissolution chimique sélective peut-être utilisée pour la détermination de ces constituants non cristallisés. Mais ils sont caractérisés par l'absence de compartiments définis. C'est ce qui fait la difficulté de leur étude par les méthodes d'extraction sélective.

Afin d'essayer malgré tout d'identifier les divers constituants tant du sol Brun Acide que des sols Andiques, nous présenterons successivement

- les résultats des analyses totales;
- les résultats de la diffraction des rayons X qui permettent d'identifier les minéraux cristallisés de la fraction argileuse; la microscopie optique venant compléter l'identification des minéraux grossiers
- les résultats obtenus par les méthodes d'extractions sélectives, pour caractériser et estimer les proportions des différentes formes cristallisées ou amorphes, minérales ou organiques de l'aluminium, du fer et du silicium des constituants.

## 2.1. Analyses Totales

Ces analyses totales ont été réalisées à Arras par mise en solution solide et dosage par fluorescence X pour Al et Si; attaque à l'acide fluorhydrique et dosage par absorption atomique pour Fe. Les résultats sont exprimés en pourcentages pondéraux d'oxydes par rapport à la fraction < 2 mm séchée à 105°C.

Elles permettent une première comparaison des éléments constitutifs des sols.

### 2.1.1 Sols Andiques

#### 2.1.1.1 L'Andosol

Il est caractérisé par des teneurs élevées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (14 à 23 %) comparables à celles de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15 à 25 %). Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  sont faibles (23 à 31 %), proches de celles de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fig.IV.6 a1). Les rapports molaires  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de l'ordre de 2 suggèrent une part non négligeable de phyllosilicates dans ce sol.

Les valeurs de perte au feu sont très élevées (11 à 40 %) traduisant une quantité importante de matière organique mais aussi d'eau de constitution des minéraux ( $\text{H}_2\text{O}^+$  de 10 à 14 %, soit 33 à 54 g pour 100 g d'argile). La quantité d'eau adsorbée à la surface des constituants ( $\text{H}_2\text{O}^-$ ) varie de 10 à 5 % ; elle peut correspondre au moins en partie à l'eau de l'hallowysite - métahallowysite qui est mise en évidence sur les diagrammes de R.X (§ 2.2)

Parmi les éléments mineurs (Fig.IV.6 b1),  $\text{TiO}_2$  est le plus abondant (3,3 à 5,9 %) dans ce profil d'andosol; comme le fer, il s'exprime principalement sous forme d'oxydes (ilménite, anatase) présents essentiellement dans les fractions grossières.  $\text{MgO}$  (1,7 à 4 %) et  $\text{CaO}$  sont relativement abondants en accord avec la présence d'olivine, de pyroxènes, et de plagioclases calciques attestées dans les fractions grossières.

#### *Evolution verticale*

Par rapport aux basaltes du site, on observe une augmentation de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  et une diminution du  $\text{SiO}_2$ , des éléments alcalins et alcalino-terreux ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) suggérant une évolution importante par rapport à la roche : le stock de silicates primaires est peu abondant dans le sol ; lors de l'altération le Si a été exporté du profil; il y a eu avec évacuation des bases et accumulation relative des autres éléments. Par rapport aux tufo-laves rouges du site, l'écart est très réduit pour Al, Mg, Ca mais subsiste pour les autres éléments.

Au sein des volumes pédologiques, l'aluminium et le fer présentent une évolution verticale comparable. Depuis le bas vers le haut, on observe une diminution relative des éléments Si, et surtout de Fe, Al, Ti ainsi que de l'eau adsorbée  $\text{H}_2\text{O}^-$  corrélativement à l'augmentation vers la surface de la M.O. et de l'eau de constitution  $\text{H}_2\text{O}^+$ .

Par rapport aux volumes inférieurs (AN5, AN6), les volumes supérieurs (AN1 à AN4) sont plus riches en éléments alcalins et alcalinoterreux. Ceci est à associer à une quantité plus grande d'éléments grossiers peu altérés dans l'ensemble supérieur. Il est aussi possible qu'il y ait recyclage des bases par l'activité biologique en surface.

#### 2.1.1.2 Le ranker andique

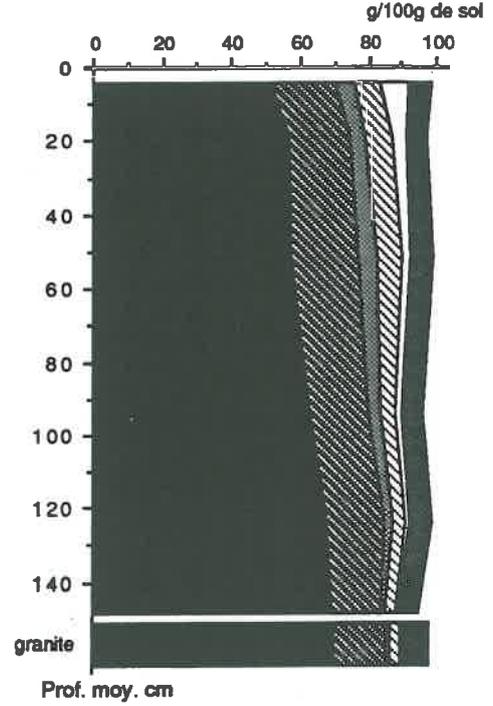
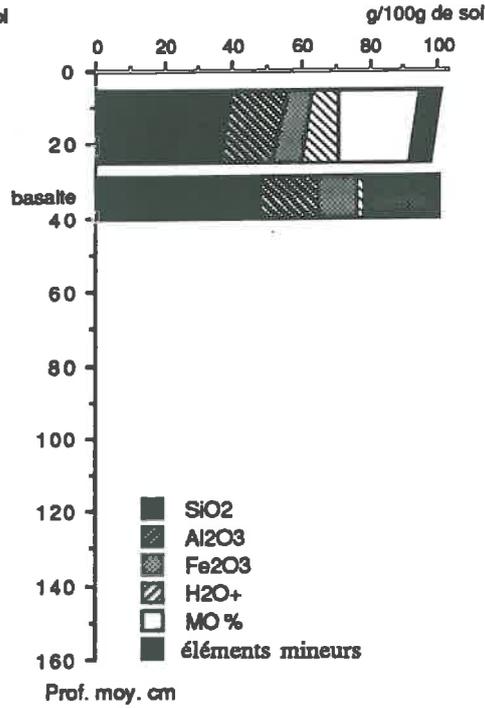
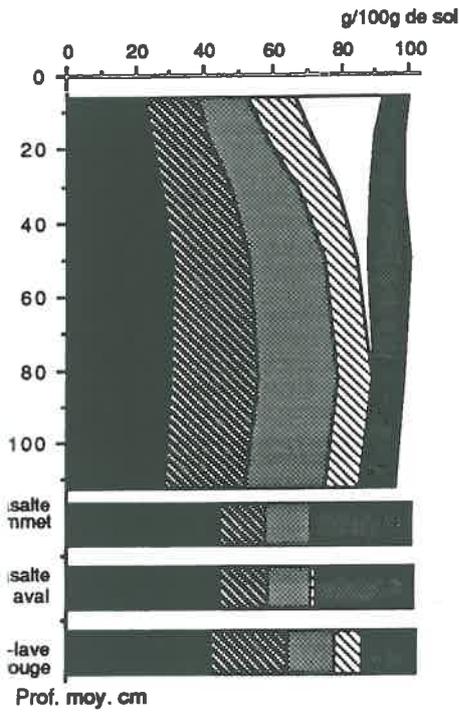
Comparé aux horizons de l'Andosol, les volumes du Ranker Andique apparaissent presque 2 fois moins riches en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , en  $\text{MgO}$  et en  $\text{TiO}_2$  (Fig.IV.6.a2), fait témoignant d'une moindre richesse en minéraux ferromagnésiens et en oxyhydroxydes de fer et de titane. Ils sont par contre plus riches en  $\text{SiO}_2$

6a

1 ANDOSOL

2 RANKER ANDIQUE

3 SOL BRUN ACIDE



6b

1 ANDOSOL

2 RANKER ANDIQUE

3 SOL BRUN ACIDE

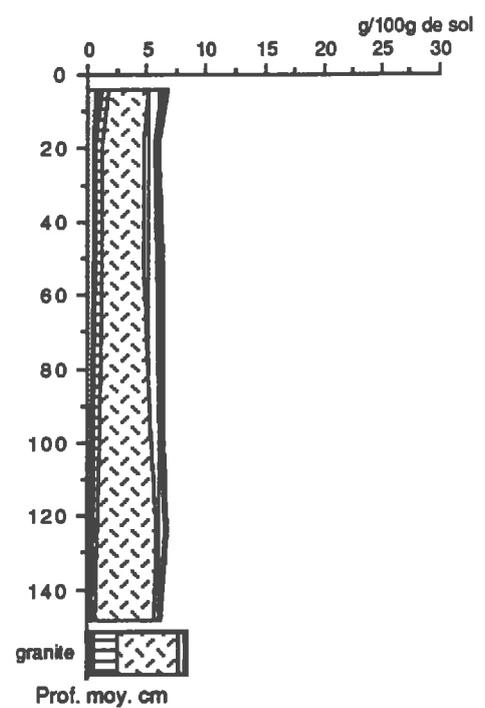
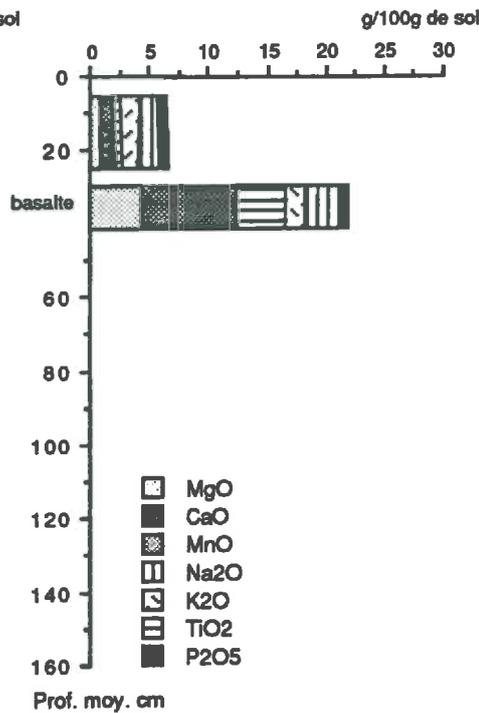
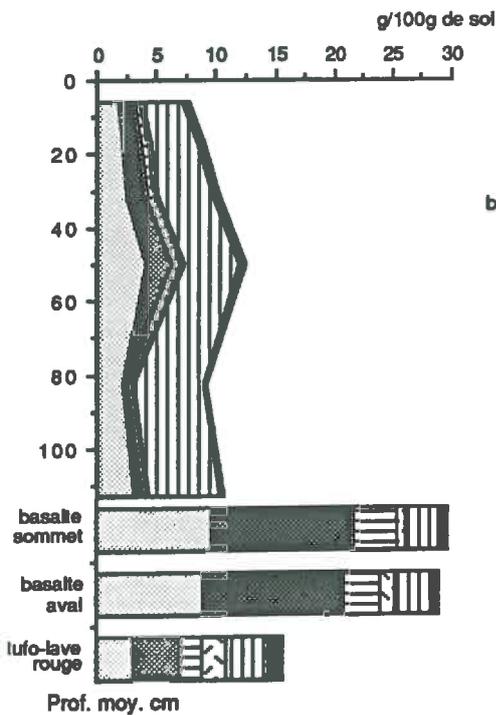


Fig. IV.6 : Analyses totales : Evolution des éléments majeurs (6.a) et des éléments mineurs (6.b) en fonction de la profondeur dans l'Andosol Montarqué (1), le Ranker Andique (2) et le sol Brun Acide (3).

( $\geq 37\%$ ). Le rapport moléculaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est 2 fois plus élevé que pour les horizons de l'Andosol : de l'ordre de 4, attestant d'une plus grande richesse en silicates primaires par rapport à l'Andosol. Ils ont aussi plus riches en  $\text{K}_2\text{O}$  ( $\geq 1,4\%$ ).

*Par rapport au substrat basaltique*, on note une diminution relative des bases Mg, Ca, Na alors que le K reste constant, fait suggérant une altération préférentielle des plagioclases (Ca-Na) et une moindre altération des micas ou feldspath K. Les éléments Si, Fe, Al diminuent également, alors qu'augmente la perte au feu.

### 2.1.2 Sol Brun Acide

Les analyses montrent une nette prédominance de la silice (50 à 70 % de  $\text{SiO}_2$ ) dans les horizons de ce sol brun acide, due essentiellement aux sables grossiers quartzeux (Fig.IV.6 a3).  $\text{K}_2\text{O}$  est relativement abondant (3,4 à 5 %) témoignant de l'abondance de micas et/ou feldspaths potassiques (fractions limons et sables) ou de minéraux phylliteux micacés dans les fractions fines (argile et limon fin).

Par rapport aux sols andiques, les valeurs de perte au feu sont nettement moins élevées (4 à 17 %). De même, les teneurs en  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  sont significativement plus faibles. Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont comparables à celles des sols andiques. Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont proches de celles du Ranker Andique.

#### Evolution verticale

Par rapport au granite sous-jacent, la différenciation est peu marquée. On note essentiellement une diminution de Na due probablement à l'altération des plagioclases.

Dans le sol, vers la surface, on observe: une diminution relative de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  dues respectivement à la diminution des sables grossiers quartzeux et à l'altération des feldspaths potassiques et micas avec évacuation du K; une augmentation relative de tous les autres éléments notamment de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , du  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , du  $\text{TiO}_2$  mais aussi du  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , de la M.O. et de  $\text{H}_2\text{O}^+$ . Il est également possible que outre cette évolution verticale, existe un phénomène de contamination par les éléments basaltiques amont.

*Les différences majeures entre sols andiques et sol brun acide* reflètent les différences chimiques des substrats sous-jacents : le granite est sursaturé en silice, riche en potassium; les basaltes sont sous-saturés en silice, riches en fer et magnésium

*Les différences entre andosol et ranker andique* reflètent une évolution plus poussée des premiers par rapport aux seconds: moindre stock de minéraux primaires altérables; exportation de la silice et des bases; accumulation relative des éléments lourds : Fe, Mg, Ti...

## 2.2 Identification des constituants minéraux cristallisés aux rayons X (fraction < 2 $\mu\text{m}$ )

Après traitement  $\text{H}_2\text{O}_2$  sur terre humide, puis traitement 10 mn aux ultrasons, la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  a été séparée par dispersion dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium [à 40 g/l] proportion 10/1000) et centrifugation Sharples sur calque (même méthode que pour la granulométrie). La composition minéralogique de ces fractions a été déterminée par diffraction des rayons X avec un diffractomètre Siemens sur des argiles orientées, saturées  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ .

L'ensemble des phyllosilicates a été étudié par comparaison de diagrammes obtenus sur les argiles saturées Mg (Mg), saturées Mg et traitées à l'éthylène glycol sous vide (MgE.G.), saturées K (K), saturées K et chauffées à différentes températures (K100, K200, K250, K350, K450, K500, K550). Une évaluation semi-quantitative a été réalisée en se basant sur les proportions relatives des aires des pics.

### 2.2.1 Le sol brun acide

Les spectres de diffraction pour les 6 horizons du sol brun acide sont présentés sur les figures.IV.7 et IV.8

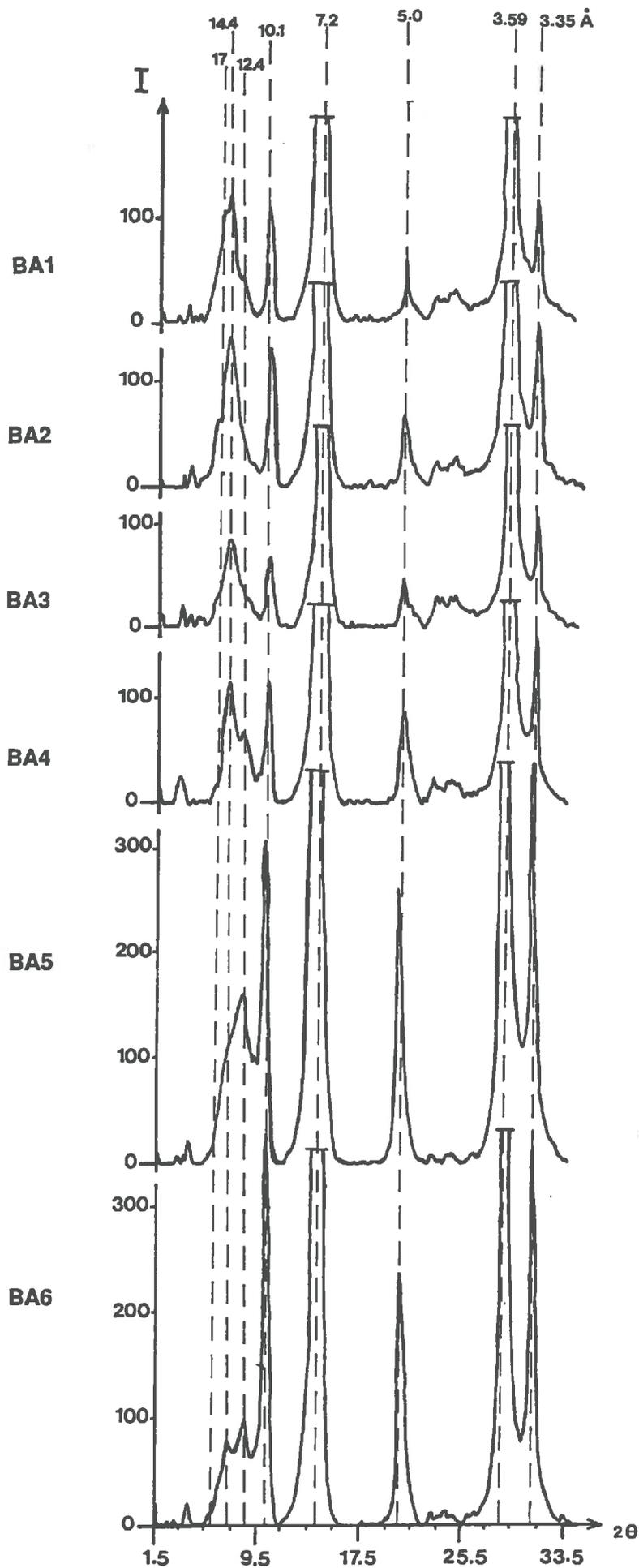


Fig.IV.7 : Diagramme de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à  $2\mu\text{m}$  pour les horizons BA6 à BA1 du Sol Brun Acide - Traitement Mg.

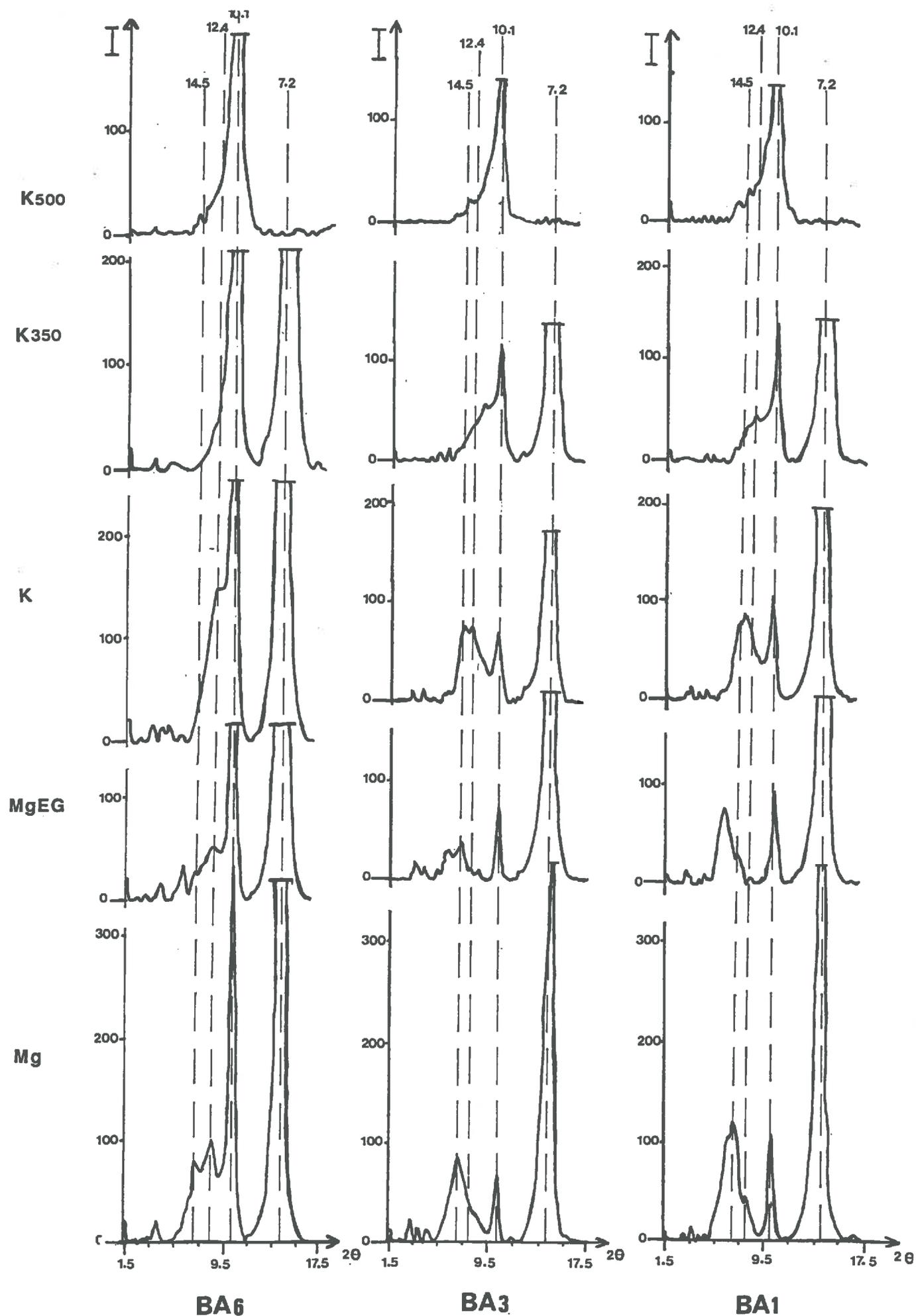


Fig.IV.8 : Diagramme de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à  $2\mu\text{m}$  pour les horizons BA6,BA3, BA1 du Sol Brun Acide à différents traitements.

### 2.3.1.1 Nature des minéraux

*La Kaolinite (K)* est bien caractérisée par ses pics à 7,22 Å d(001); 3,58 Å d(002); 2,39 Å d(003), qui disparaissent au chauffage à 500 °C; ces pics sont aigus, symétriques, biconcaves et étroits, ce qui témoigne d'une bonne cristallinité.

*Les Argiles micacées (AM)* sont mises en évidence par les pics à 10,1 Å (d001); 5,0 Å (d002); 3,34 Å (d003) présents quel que soit le traitement, et qui sont d'allure biconcave, aigus, étroits et symétriques. La forte intensité de la raie d(002) à 5 Å, les faibles valeurs des rapports des intensités des raies d(001) sur d(002), témoignent de la nature essentiellement dioctaédrique de ces minéraux (Brindley et Brown, 1980; Thorez, 1975); cette constatation est en accord avec les observations effectuées au microscope optique : les argiles micacées présentes dans les fractions fines sont essentiellement de type muscovite (probablement primaire) et séricite et/ou pinnite (issues de l'altération des feldspaths) tandis que les biotites sont présentes surtout dans les fractions grossières et ce, sous forme déjà fortement altérées.

*Les phyllosilicates à 14 Å* sont différenciés selon leur comportement aux différents traitements; on distingue :

- des phyllosilicates à 14 Å, non modifiés à l'E.G. et par saturation au K ferment à 10 Å : ce sont les *vermiculites au sens strict*, notées "Vss".
- des minéraux à 14 Å non modifiés à l'E.G. et au K, mais qui ferment progressivement à 10 Å au chauffage : cette fermeture serait due à l'enlèvement des cales OHAl interfoliaires; un tel comportement est interprété comme correspondant à des minéraux à comportement intergrade (Vicente et al, 1977) à couches interfoliaires hydroxy-alumineuses incomplètes (Barnishel, 1977); ce sont des minéraux intergrades interprétés comme *vermiculites hydroxyalumineuses* : "VAIOH" ou "Int N.G."
- des minéraux à 14 Å à Mg et K, qui gonflent à 16,9 Å -17,4 Å à l'E.G. et ferment progressivement à 10 Å au chauffage : ce sont *des minéraux à 14 Å gonflants à comportement intergrade* : "Int.G."
- des minéraux à 14 Å à Mg, qui gonflent à 17-18 Å à l'E.G et ferment à 10 Å par saturation au K : il s'agit des *smectites* "Sm".
- une part des minéraux à 14 Å qui reste stable quel que soit le traitement est interprétée comme *chlorites* "Chl".

Ces différents phyllosilicates à 14 Å apparaissent le plus souvent sous forme interstratifiée 14 Å-14 Å (Vss-VAIOH; VAIOH-IntG; IntG-Sm). On observe alors des pics dont la position est intermédiaire entre celles des différents minéraux argileux "simples" les constituant.

*Les interstratifiés d'argiles micacées et de minéraux à 14 Å* : "IS" les plus fréquents sont des interstratifiés à 12-13 Å au Mg, notamment sous forme d'interstratifiés IS (AM<sub>1/2</sub>-(Vss-VAIOH)<sub>1/2</sub>) : horizons BA6 et BA5 notamment.

Les autres minéraux reconnus sont de la *gibbsite* (4,85 Å) en faible part dans les horizons médians et superficiels, des *feldspaths potassiques* (3,26 Å) et/ou *plagioclases* (3,20-3,22 Å); la présence de *goéthite* (4,18-2,7 Å) et/ou *hématite* (2,5-2,7 Å) est probable, en faible quantité, dans les 3 horizons supérieurs. Le quartz est absent de la fraction argileuse de ce sol.

### 2.2.1.2 L'évolution verticale

Les résultats sont présentés sous forme semi-quantitative (Tab.IV.1a), en se basant sur les aires relatives des pics observés.

Dans l'ensemble des échantillons analysés sont présents : la kaolinite, les argiles micacées, les interstratifiés - essentiellement à 12 Å à Mg-, les minéraux à 14 Å. Leur proportion relative et la nature des minéraux à 14 Å varient dans le profil.

*La kaolinite* domine largement dans tous les horizons et sa proportion relative varie peu : elle constitue 65 à 70 % de la fraction argileuse.

*Les argiles micacées s.s.*, qui constituent environ 20 % de la fraction argileuse dans les horizons profonds, diminuent vers les horizons intermédiaires et ne représentent plus que 10 % dès l'horizon BA4, puis restent en proportion quasi-constante vers le haut du profil.

Corrélativement, les *interstratifiés* IS (10Å-14Å) à 12 Å diminuent de 15-20 % à 5% des horizons profonds vers la surface.

Le pourcentage des minéraux à 14 Å augmente de 6 à 15 % de la base du profil à l'horizon intermédiaire BA3, puis reste constant dans les horizons supérieurs.

Tab. IV.1 : Sol Brun Acide; (1a) : Estimation semi-quantitative des minéraux cristallisés identifiés aux rayons X ; (1b) proportions approchées des différents phyllosilicates à 14 Å (Interstratifiés 10-14Å et 14Å s.s. cumulés) - (fraction < 2 µm).

résultats exprimés en pour cent de la fraction < 2µm : moyenne arrondie à 5 % de analyses semi-quantitatives de 2 diagrammes

1a)

ECHANTILLON	PHYLLOSILICATES				AUTRES MINERAUX		
	.1/1	.2/1			oxy-hydroxydes		silicates
	K 7A	A.M. 10A	Phyllo. 14A	I.S. 12 et autres	Al gibbs.	Fe Goet.	Fedsp.
BA1	70	10-	15+	5.-10	(+)	(+)	—
BA2	70	10-	15-	5.-10	+	(+)	—
BA3	70	5+	15	10	(5%)+	(+)	—
BA4	70	10-	10+	10	(5%)+	—	+
BA5	65	15	5.-10	15-	—	—	+
BA6	65	20	5.?	10+	—	—	—

1b)

ECHANTILLON	Phyl1/1	Phyllosilicates 2/1 s.l. (I.S. et mx à 14A.)				
	K	10A	14A			
		AM s.l.	Vs.s. s.l.	Int.N.G. VAIOH	Int.G s.l.	Sm S.l.
BA1	70	10	2	0,5	13	5
BA2	70	12	3	4	8	3
BA3	69	11,5	4,5	6,5	5	3
BA4	71	13	2	6	6	1,5
BA5	65	21	4,5	6	2	2
BA6	65	24	4	4	1	2

Corrélativement, on observe une *évolution qualitative importante des minéraux à 14 Å* (Fig. IV.8, Tab.IV.1b).

Dans les *horizons profonds* (BA5 et BA6), les vermiculites au sens strict et les vermiculites hydroxyalumineuses sont les espèces majoritaires et ce, en proportion équivalente. On peut de plus penser que les VAlOH sont assez pauvres en cales puisque la fermeture à 10 Å est pratiquement effective à 200-350°C.

L'évolution *vers les horizons supérieurs* (BA4 à BA1) est nette : dans ces horizons supérieurs, les minéraux à comportement intergrade constituent alors l'essentiel des minéraux à 14 Å. Cette augmentation des minéraux intergrades dès l'horizon BA4 est due à l'apparition en quantité non négligeable (5 %) de minéraux intergrades gonflants. Vers la surface, la quantité d'intergrades reste stable (12 à 13 %) mais les proportions relatives intergrades gonflants - intergrades non gonflants (i.e VAlOH) évoluent : dans les *horizons médians*, intergrades non gonflants (VAlOH) et intergrades gonflants sont en proportions identiques; *dans les horizons de surface*, les intergrades gonflants deviennent majoritaires parmi les minéraux à 14 Å et constituent environ 10 % de la fraction < 2 µm.

Il est enfin probable qu'une faible part des minéraux à 14 Å soit constituée de chlorites dans les 4 horizons supérieurs : fermeture non complète à 450°C (pics entre 15 et 10 Å).

La présence de gibbsite est probable pour ces mêmes 4 horizons supérieurs.

### 2.3.1.3 Origine et genèse des minéraux argileux de ce sol brun acide

Une telle abondance de *kaolinite* (65 à 70 % de la fraction < 2 µm) traduit un stade avancé de l'altération des feldspaths et ce dès la base du profil. Elle explique la faible capacité d'échange de ces sols (6 à 25 meq/100g sol, soit 38 à 97 meq/100g d'argile) augmentée par la présence de vermiculites.

*Les argiles micacées* (20 à 10 %) sont essentiellement constituées de séricite provenant probablement de l'altération des feldspaths. Des micas type biotite et muscovite héritées de la roche-mère peuvent venir grossir la part des argiles micacées.

La *Gibbsite* en faible quantité (5%) dans les horizons supérieurs BA4 à BA1, traduit probablement un stade plus poussé de l'altération des plagioclases (avec lixiviation Si, Na, Ca); cependant on peut envisager une formation de gibbsite à partir de l'Al interfoliaire (Barnishel et Rich, 1963: études expérimentales à partir de Montmorillonite à intergrade-Al en conditions acides); la gibbsite serait alors formée après un stade intermédiaire mettant en jeu des interfoliaires OHAl dans des conditions acides.

*Goethite et/ou Hématite*, présentes en faible quantité, sont des témoins de la relative richesse en Fer du milieu.

Le *quartz* est absent de la fraction argileuse, alors qu'il domine parmi les fractions grossières; ce qui traduit l'absence de fragmentation et dissolution des limons et sables quartzeux pour fournir des particules quartzueuses de taille < 2 µm.

#### *Les interstratifiés 10-14 Å et les minéraux à 14 Å :*

- *vermiculites s.s. et vermiculites hydroxyalumineuses*

L'hypothèse la plus plausible dans ce sol brun Acide est que leur origine s'inscrit dans la séquence évolutive classique de type : AM ---> I.S. AM-Vss ---> Vs.s.----> VAlOH.; les minéraux à 10 Å évoluant vers des vermiculites s.s. (dégradation des micas ) qui elles même se transforment en intergrades de type vermiculites HAl par processus d'"*aluminisation*"; les interstratifiés "10 Å-14 Å" étant alors des édifices de transition.

Cette évolution minéralogique, caractéristique des milieux acides et aérés, correspond au processus de "*podzolisation ménagée*" (Pedro, Jamagne, Begon, 1978), processus typique des Sols Bruns Acides et des Sols Bruns Ocreux (Aurousseau, 1976).

- *Les minéraux intergrades gonflants : leur nature?*

\* Absents des horizons profonds, ils apparaissent dès les horizons intermédiaires, et deviennent abondants dans les volumes superficiels. Ils résulteraient donc :

- soit d'une évolution verticale (ex. évolution plus poussée donnant des I.G. à partir de minéraux déjà présents dans les horizons inférieurs),

- soit d'une contamination par les sols andiques amont.

\* Ils apparaissent sous forme interstratifiée :

- avec d'autres minéraux à 14 Å : soit des vermiculites VAlOH, soit des smectites s.s. ; ce qui ferait

envisager l'hypothèse éventuelle d'une filiation de type :

AM--> Vss--> VAlOH-->I.G. ---> Sm.

- avec des minéraux à 10 Å dans horizons supérieurs. (12 Å à Mg; 14 Å à E.G.; 12 Å au K).

\* La séquence verticale observée est :

- dans les horizons inférieurs. : Vss-Int VAlOH
- dans les horizons BA4, BA3,BA2 : VAlOH-IntG
- dans l'horizon BA1 : IntG (Sm)

Globalement les intergrades gonflants augmentent alors que les VAlOH diminuent.

L'origine de ces minéraux intergrades gonflants pose problème. Plusieurs hypothèses sont envisageables quant à leur nature, en particulier celle des "smectites de transformation", ou celles de smectites à cales interfoliaires de nature différente (cales organiques notamment).

Pour aller plus loin dans la caractérisation de ces intergrades gonflants, il faudrait faire des études supplémentaires notamment : localiser l'origine de la charge (test Hofman-Klemen; test KEG), recueillir des informations sur la nature et la quantité des cales (analyses physicochimiques, microanalyses...)

### 2.2.2. Les sols andiques

Tous les horizons de ces profils à caractères andiques : andosol et rankers andiques ont été examinés par diffraction des R.X. sur dépôts orientés de la fraction inférieure à 2 µm (Fig. IV.9 et Fig.IV.10). Des analyses ont par ailleurs été effectuées sur poudre de terre totale inférieure à 2 mm.

#### 2.3.2.1 Identification et évolution des minéraux cristallisés ( fraction < 2 µm)

Le premier fait remarquable de cette fraction argileuse est sa *faible cristallinité* (faible intensité et largeur importante des pics, fond continu élevé (Fig.IV.9 et Fig.IV.10). Dans l'andosol, la définition des figures de réflexion est cependant améliorée pour les horizons profonds (Fig.IV.9); d'autre part, la cristallinité semble meilleure pour les échantillons du ranker andique (Fig. IV.10) par rapport à ceux du profil d'andosol. Cette faible définition des pics rend délicate toute estimation semi-quantitative. Les résultats d'analyse semi-quantitative présentés (Tab. IV.2) sont donc à prendre avec précaution et sont donnés simplement à titre indicatif.

#### 1) Les Phyllosilicates 1/1

Ils dominent parmi les minéraux cristallisés de cette fraction argileuse.

Dans la majeure partie de l'andosol, horizons supérieurs AN1 à AN4, il s'agit de *métahalloysite* (dite encore halloysite à 7 Å) - caractérisée par : un pic à 7,2 - 7,3 Å, large et dissymétrique vers les petits angles; un pic axé sur 3,56 Å; une bande large et dissymétrique entre 4 et 4,4 Å qui la distingue de la kaolinite sur préparation orientée; un dôme de 2,56 à 2,3 Å avec pics éventuels à 2,56 - 2,5 - 2,32 Å (Siefferman, 1973) - (Fig.IV.9). Elle constitue dans ces horizons plus de 50 % des phyllites, au moins 30 % de la fraction < 2 µm.

Dans les horizons profonds AN5 et AN6 de l'andosol, apparaît de l'*halloysite*, largement dominante par rapport à la métahalloysite. Elle est caractérisée par : un pic à 10 Å s'étendant jusqu'à 7,4-7,5 Å du fait de sa partielle déshydratation, déplacé à 11 Å à l'E.G., et se rabattant à 7,5 Å à 100° ou sous vide; un pic large et très asymétrique de 4,4 à 4 Å; un pic large de 3,2 à 3,45 Å; une bande de 2,55 à 2,5 Å; une bande de 2,25 à 2,45 Å culminant à 2,36 Å (Fig. IV.11).

Dans ces horizons profonds, halloysite et métahalloysite sont les seuls phyllosilicates reconnus ; l'halloysite constituerait plus de 60 % de la fraction < 2 µm et la métahalloysite 20 à 25 % de cette même fraction.

Notons qu'un traitement supplémentaire à la formamide serait nécessaire pour confirmer ou infirmer la présence de métahalloysite (et non d'halloysite) des horizons supérieurs (Churchman et al., 1984).

Dans les échantillons des Rankers Andiques, les phyllosilicates 1/1 semblent mieux cristallisés (Fig.IV.10); il s'agit vraisemblablement de *kaolinite désordonnée* (pic à 7,2 et 3,56 Å aigus, paire de pics à 2,56-2,5 Å, seconde paire de pics à 2,37-2,33 Å), bien que la bande entre 4,4 et 4 Å suggère la présence de métahalloysite.

Fig.IV.9 : Diagramme de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 $\mu$ m pour les horizons AN6 à AN1 de l'Andosol - Traitement Mg.

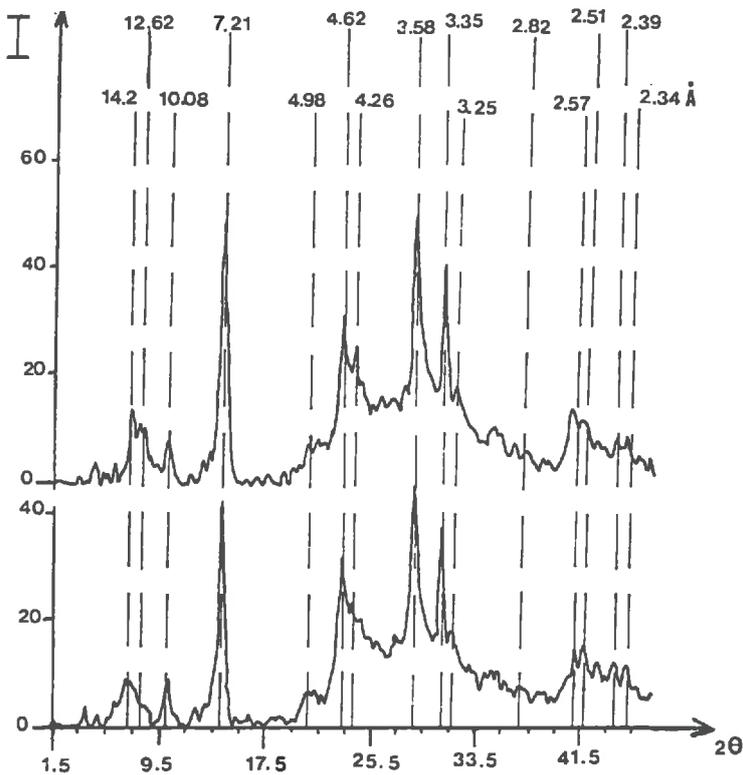
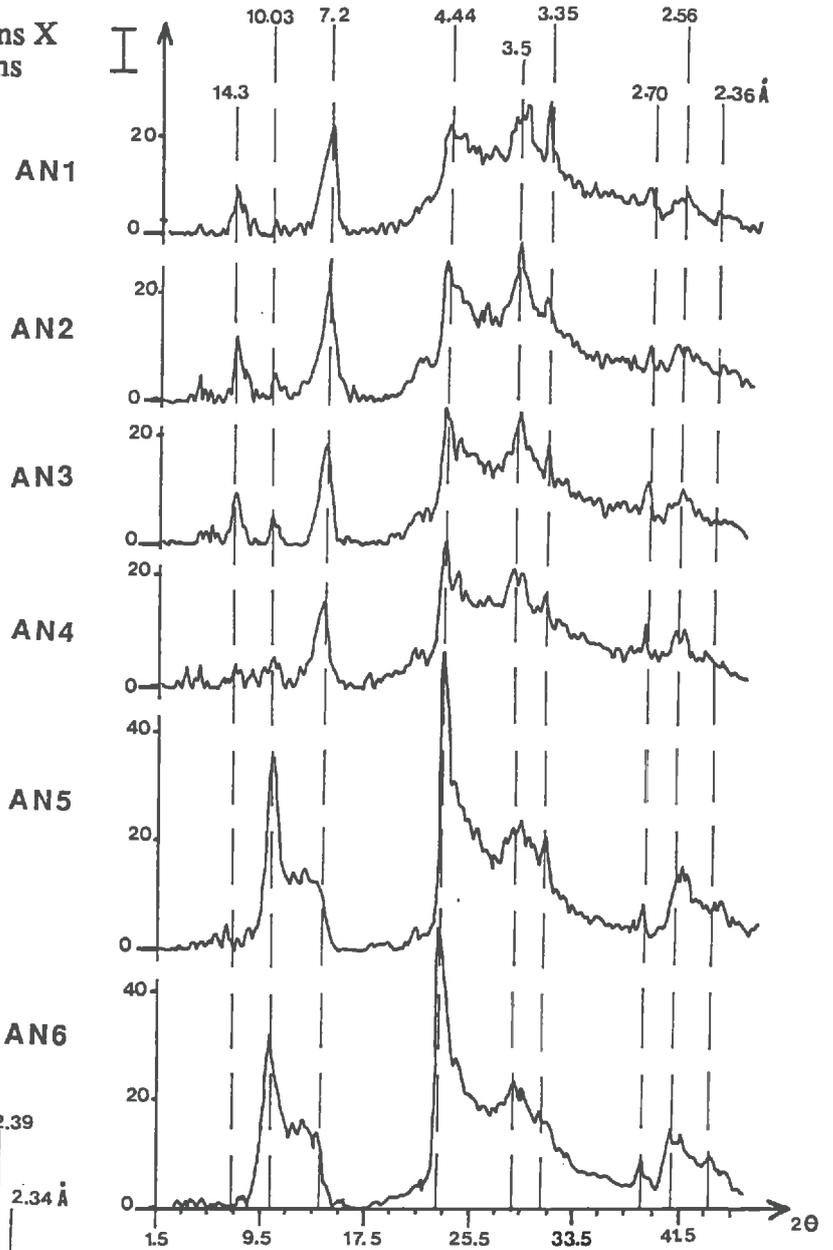
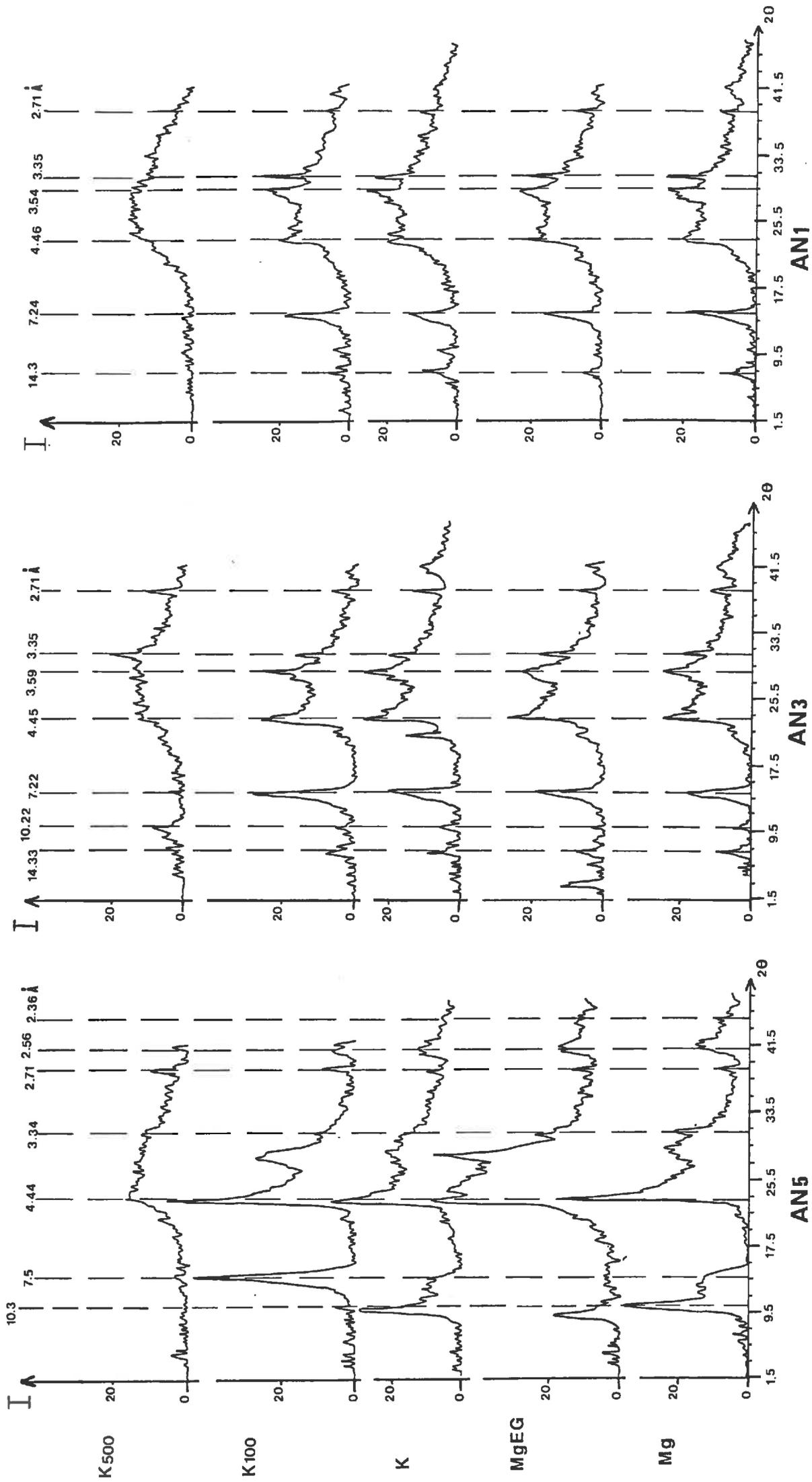


Fig.IV.10 : Diagramme de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 $\mu$ m pour les horizons K1 et K2 du Ranker Andique - Traitement Mg.



**Fig.IV.11 :** Diagramme de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à  $2\mu\text{m}$  pour les horizons AN5, AN3, AN1 de l'Andosol à différents traitements.

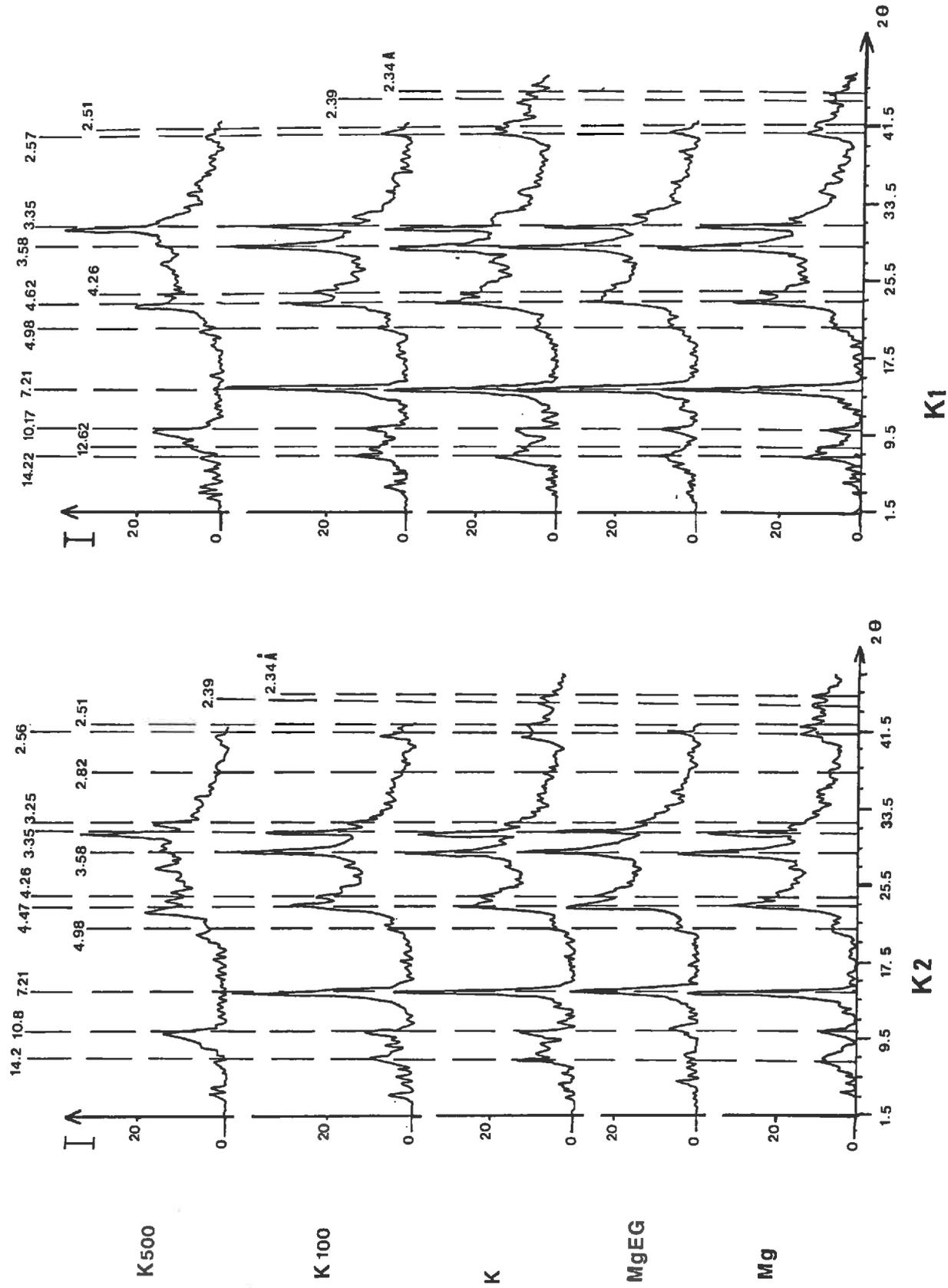


Fig.IV.12 : Diagramme de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à  $2\mu\text{m}$  pour les horizons K1 et K2 du Ranker Andique à différents traitements.

Tab. IV.2 : Sols Andiques ; Estimation semi-quantitative des minéraux cristallisés identifiés aux rayons X; fraction < 2  $\mu\text{m}$  .

Somme des phyllosilicates rapportée à 100

ECHANTILLON	Phyllosilicates 1/1			Phyllosilicates 2/1			Oxydes	Silicates
	K désor.	MH 7A	H 10A	A.M. 10A	Phyllo. 14A	LS. 12A	Fe Hé/Go	Q
<b>ANDOSOL MONTARQUIE</b>								
AN1	0	65	0	10	25	0	+	+
AN2	0	55	0	10	25	10	+	+
AN3	0	55	0	20	30	0	+	+
AN4	0	60	0	20	20	0	+	+
AN5	0	30	70	0	0	0	+	
AN6	0	30	70	0	0	0	+	
<b>RANKER ANDIQUE ROUX</b>								
K1	60	0	0	10	20	10	0	+
K2	70	0	0	10	10	10	0	+

## 2) les minéraux 2/1

Absents des horizons profonds de l'Andosol, ils existent en quantité non négligeable dans les horizons supérieurs (AN4 à AN1) de ce même profil, ainsi que dans les horizons des Rankers Andiques, sous forme de minéraux à 14 Å, d'argiles micacées à 10 Å, et d'interstratifiés AM-Mx14 à 12 Å. Leur nature, et à fortiori leur abondance relative, sont délicates à déterminer du fait de la faible intensité des pics.

a) Les minéraux à 14 Å sont dominants parmi les minéraux 2/1 et constitueraient 10 à 15% de la fraction < 2 µm. La majeure partie des pics de 14 Å reste stable à l'E.G. et au K et présente une fermeture progressive vers 10 Å au chauffage (Fig IV.12 par ex). Il s'agirait de minéraux à comportement intergrade de type vermiculite hydroxy-alumineuse ("VAIOH"). Il est possible qu'existe une faible part de chlorite, vermiculite s.s. voire même de minéraux à comportement intergrade gonflant, mais la faible définition des diagrammes rend difficile toute identification et ne permet pas de trancher.

b) Les argiles micacées : Identifiées par leurs pics à 10-10,2 Å et surtout 4,98 Å, 4,76 Å, 3,35 Å dans les horizons AN1 à AN4 de l'andosol et dans le profil ranker andique, elles ne présentent que 5 à 10% de la fraction argileuse. Elles seraient plutôt de nature dioctaédrique type Illite et/ou Muscovite (environ même intensité des pics à 5 et 10 Å).

c) les interstratifiés 10-14 Å : Leur présence semble attestée dans les horizons supérieurs de l'Andosol et du Ranker Andique par des pics à 12,5-13 Å; leur nature est incertaine.

## 3) Les autres minéraux : silicates primaires et oxyhydroxydes

### a) Silicates primaires

Le quartz apparaîtrait en quantité non négligeable dans les horizons supérieurs de l'andosol (Fig.IV.9). Or il n'a pas été observé en microscopie...

Il est présent en quantité notable dans les échantillons du Ranker Andique (30 % de la fraction < 2 µm) (Fig. IV.10). Il a été aussi observé dans les fractions grossières au microscope optique et sa présence en quantité relativement importante est aussi attestée dans les diagrammes de R.X effectués sur poudre de sol < 2 mm.

On note l'absence d'autres silicates primaires dans cette fraction < 2 µm, excepté des traces de feldspaths plagioclases dans les rankers andiques.

Sur les diagrammes de poudre de sol < 2 mm, les silicates primaires identifiés sont essentiellement des feldspaths plagioclases et alcalins, des pyroxènes, de l'olivine et des micas. Dans l'Andosol, ces minéraux sont nettement plus abondants dans les horizons AN1 à AN4 par rapport aux horizons profonds, ce qui confirme le "rajeunissement" des premiers par rapport aux seconds.

### b) Les oxyhydroxydes de fer

L'hématite est reconnue dans la fraction argileuse pour l'ensemble du profil d'andosol (15-20% de la fraction argileuse). Elle contribue probablement à la couleur rougeâtre du sol.

Sur les diagrammes de poudre de sol < 2 mm, les oxyhydroxydes de fer et de titane sont très abondants dans tous les horizons de l'Andosol, comme le laissait présager les résultats des analyses totales. On observe par ordre d'abondance décroissant : l'hématite ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dominante, très bien cristallisée (pics très aigus et très étroits), qui diminue vers la surface; puis les opaques : l'anatase ( $\text{TiO}_2$ ), l'ilménite ( $\text{FeTiO}_3$ ) et la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Les oxyhydroxydes cristallisés de fer et de titane sont absents de la fraction argileuse des horizons de rankers andiques; dans la fraction < 2 mm, la présence l'ilménite et la magnétite est probable mais en très faible quantité.

On n'observe pas d'oxyhydroxydes d'aluminium.

## 4) "Les Amorphes"

Notons simplement que la large bosse de diffraction centrée sur 3,5-4 Å présente sur l'ensemble des diffractogrammes de ces sols sur basalte a été souvent interprétée comme témoin de la présence de constituants amorphes (gels et/ou allophanes) (Siefferman, 1973; Garcia Rodega et al., 1987).

### 2.3.2.2 Origine et évolution des minéraux

#### 1) Les Silicates

- Les pyroxène, plagioclase, olivine sont bien évidemment hérités de la roche mère basaltique.
- Le quartz : quant à lui pourrait avoir plusieurs origines :
  - origine intrabasaltique s.s. : mais les basaltes sont sous-saturés en silice (Colin, 1971); cette hypothèse est donc peu probable.
  - Il pourrait être issu d'une contamination par le socle granitique et serait ainsi d'origine extra-basaltique : soit sous forme d'éléments arrachés au socle lors de l'éruption, de même que les argiles micacées auxquelles ce quartz est fréquemment associé (Moinereau et Roger, 1975); soit sous forme d'apports éoliens actuels ou anciens à partir des surfaces de granite affleurant situées à des courtes distances dans la région : hypothèse qui pourrait en partie expliquer son abondance plus grande dans les horizons supérieurs de l'Andosol et sa présence sur des roches non quartzifères (Jackson et al., 1971).
  - L'hypothèse de cristallisation secondaire signalée par Sherman et al. (1964) et Wada (1985), éventuellement sous forme de cristallites dans les verres volcaniques (Shoji et al., 1981) semble ici à rejeter au moins comme source majeure du quartz.

#### 2) les oxyhydroxydes de Fer et de Titane

Anatase et minéraux opaques (magnétite, ilménite) sont probablement hérités de la roche mère. Quant à l'hématite très abondante dans l'Andosol, elle est très probablement également tout simplement héritée des substrats-volcaniques (basaltes ou plus vraisemblablement tuffo-lave rouge [dans laquelle la présence d'hématite serait liée à un processus d'oxydation brutale lors de l'éjection des laves dans l'atmosphère (Moinereau et Roger, 1975)]. Dans ce dernier cas, la rareté des oxydes de fer cristallisés néoformés (on a noté l'absence de goéthite) dans ces sols riches en fer pourrait être attribuée aux effets inhibiteurs de la matière organique (Schwertmann, 1966).

On ne peut cependant totalement exclure l'hypothèse d'une néoformation de l'hématite à partir de l'altération des minéraux primaires ferro-magnésiens (olivine notamment).

### 3. les minéraux argileux (phyllosilicates)

#### a) les minéraux 1/1

Les minéraux de la famille des kaolinites sont les phyllosilicates prédominants dans ces sols.

Plusieurs hypothèses ont été envisagées quant à leur formation :

- Soit à partir de l'alumine de complexe allophanique et de la silice en solution (Siefferman et Millot, 1969; Siefferman, 1973) : dissociation des complexes allophaniques lors de la saison sèche et formations d'halloysite à partir de l'alumine libérée et de la silice en solution (suffisamment abondante du fait de la dessiccation et de la présence de minéraux primaires). Cette hypothèse paraît peu probable au moins comme processus actuel dans ce sol pauvre en complexe allophanique.
- Soit à partir de l'alumine et de la silice des minéraux primaires :
  - verres basaltiques à structure sphérolaire (Trichet, 1970; Dixon et Mc Kee, 1974) notamment pour la forme glomérulaire de l'halloysite (Moinereau 1977);
  - plagioclases (Sherman et Matsusaka, 1965; Moinereau et Roger, 1975).

L'altération en minéraux de la "famille" de la kaolinite est conditionnée principalement par la fourchette déterminée de silice en solution. La nature du minéral kaolinique formé serait quant à elle dictée par la concentration totale en cations alcalins et alcalinoterreux présents : la néoformation d'halloysite, de métahalloysite et de kaolinite désordonnée plutôt que de kaolinite bien cristallisée s'expliquerait par une concentration en cations plus élevée du milieu (Millot, 1964; Siefferman, 1973; Siefferman et Millot, 1969).

Cette hypothèse qui pourrait expliquer en partie la présence d'halloysite dans les horizons profonds AN6 et AN5 plus saturés que les horizons supérieurs de l'Andosol n'est pas vérifiée dans le profil de Ranker Andique moins désaturé et comportant cependant des minéraux 1/1 mieux cristallisés.

#### Relation halloysite - métahalloysite

Selon de nombreux auteurs (Siefferman, 1973; Mizota et al., 1988), les métahalloysites dériveraient génétiquement des halloysites par déshydratation naturelle.

Ce qui pourrait expliquer l'augmentation de métahalloysite et la diminution d'halloysite vers les horizons superficiels. Ce phénomène que nous avons constaté est fréquemment signalé dans les sols sur

matériaux basaltiques (Moinereau et Roger, 1975; Siefferman, 1973; Wilson et Tait, 1977). Cependant la métahalloysite pourrait également se néoformer directement sans passer par le stade halloysite en condition de forte désaturation (Siefferman, 1973).

b) les minéraux 2/1

° Pour les minéraux à 10 Å (argiles micacées et micas), on ne peut exclure l'hypothèse de contamination par le socle granitique (Moinereau, 1977).

° Les minéraux 2/1 Vss - VAlOH - Chlorite

Ils ont été fréquemment signalés dans les sols développés sur basalte aussi bien en milieu tropical (Quantin, 1972; Siefferman, 1973; Shoji et Fujiwara, 1984; Shoji et al, 1988) que en milieu tempéré (Hétier et Tardy, 1970; Lulli et al, 1983; Moinereau et Roger, 1975; Garcia et al, 1987).

Plusieurs hypothèses ont été proposées quant à leur origine :

\* altération de minéraux primaires mafiques : pyroxène, hornblende, mica, olivine (Kawasaki et Aomine, 1966; Mizota, 1976; Wada, 1980);

\* altération de matériel argileux et/ou de verres volcaniques (Masui et Shoji, 1967; Shoji et al., 1981, 1982; Yamada et Shoji, 1983; Shoji et Fujiwara, 1984; Wada, 1985)

\* certains auteurs proposent un stade intermédiaire de montmorillonite qui serait par la suite "aluminisée" :

pyroxène, olivine ---> montmorillonite ---> vermiculite ---> chlorite (Siefferman, 1973), selon une séquence évoluant au fur et à mesure que l'aluminium serait moins fortement lié à la silice et à la matière organique et que les gels seraient plus alumineux

allophanes --> montmorillonite --> vermiculite --> chlorite (Masui et Shoji, 1967).

Nous devrions alors trouver des stades Montmorillonites-Vermiculites ce qui ne semble pas être le cas.

\* L'aluminisation de minéraux micacées, eux même hérités ou néoformés, constituant ou non un stade intermédiaire, est l'hypothèse la plus fréquemment envisagée; plusieurs scénarios sont proposés :

a) Feldspaths --> séricite --> vermiculite --> VAlOH (Tardy, 1969); cette hypothèse semble ici peu probable: la séricite n'est observée qu'à l'état de trace.

b) verre volcanique --> oxyhydroxydes amorphes d'Al, Fe, Si

↓

verre enrichi en K ---> Illite --> I.S. --> Minéraux 2/1 HAl (Shoji et al., 1981)

---> Quartz

c) Micas (illites) --> interstratifiés Micas VA/OH

↓

---> VAlOH -CAI (Moinereau et Roger, 1975; Seddoh et Pedro, 1974).

Cette dernière hypothèse (c) semble la plus plausible bien que l'hypothèse (b) ne puisse être totalement rejetée. Les minéraux intergrades VAlOH résulteraient donc du processus classique de vermiculisation et d'aluminisation libre. On expliquerait aussi la présence d'interstratifiés AM-VAlOH. Le stade final serait probablement atteint sous forme d'interstratifiés VAlOH-chlorite.

° Les smectites à comportement intergrade

Observées en faible quantité dans le Ranker Andique, leur nature demanderait à être précisée.

De tels minéraux à comportement intergrade ont été signalés sur roches volcaniques (Shoji et al., 1982; Moinereau, 1977). Moinereau (1977) les identifie comme Beidellite qui évoluerait par absorption de cations hydroxylés (d'Al notamment) et de complexes organiques vers des formes d'intergrade gonflant. Cette hypothèse pourrait expliquer la présence d'interstratifiés Sm-IntG notée dans les profils Ranker Andique.

Quant aux smectites elles-mêmes, elles peuvent avoir 2 origines : soit altération de minéraux ferromagnésiens (Olivine essentiellement) (Iddings, 1982; Siefferman, 1973); soit altération de verres primaires hydratés (Trichet, 1969).

2.3.2.3 Conclusions

Dans l'Andosol, les variations minéralogiques des horizons profonds (AN5, AN6) par rapport à la partie supérieure du profil sont marquées par une meilleure cristallinité, l'apparition brutale d'halloysite, la diminution des minéraux silicatés primaires altérables, la disparition des argiles micacées et des phyllosilicates à 14 Å, la diminution des produits amorphes (voir analyses de dissolutions sélectives). Elles suggèrent une discontinuité (lithologique et/ou de dépôts) entre les deux parties du sol, ainsi qu'un temps d'altération plus long dans les deux horizons profonds par rapport aux volumes sus-jacents. La cristallisation plus poussée de ces horizons inférieurs semble confirmer l'hypothèse de "rajeunissement" du

sol superficiel.

Les horizons K1, K2 du Ranker Andique se différencient des horizons supérieurs de l'Andosol par une meilleure cristallinité des minéraux 1/1 notamment dans la fraction < 2 µm, une plus grande quantité de minéraux primaires altérables notamment de quartz, et une quantité nettement plus faible d'oxyhydroxydes de fer et de titane dans la fraction < 2 mm.

Deux origines apparaissent pour les minéraux argileux (Moinereau et Roger, 1975):

- une voie par néogenèse donnant surtout des minéraux 1/1 (halloysite, métahalloysite) dérivés des verres et/ou des plagioclases, et éventuellement des argiles 2/1 gonflantes à comportement intergrade;
- une voie par héritage et transformation par aluminisation donnant la séquence micas --> vermiculite --> VAlOH --> Chlorite-Al.

Les minéraux cristallisés rencontrés dans ce profil sont tout à fait comparables à ceux des autres sols développés sur basaltes en pays tempérés (Moinereau, 1977; Hétier, 1975; Lulli et al., 1983; Garcia et al., 1987), voire aux andosols et sols ferrallitiques développés sur basalte en milieu tropical (Mizota et al., 1988; Siefferman, 1973). On note l'absence de gibbsite et de kaolinite s.s.

## 2.3. Etudes des formes de l'aluminium, du fer et du silicium par la méthode des extractions sélectives

### 2.3.1 Méthode

Pour déterminer les différents états des constituants du complexe d'altération des sols andiques notamment, et pour distinguer et évaluer quantitativement les formes des éléments constitutifs Al, Fe, Si, les méthodes d'extractions sélectives sont les plus fréquemment utilisées (Wada, 1977; Jeanroy, 1983). Ces méthodes s'appuient sur l'utilisation de réactifs adaptés à une dissolution la plus sélective possible des différentes phases alumineuses, ferrifères ou siliceuses caractéristiques du sol. Par différence, il est possible de compartimenter et de quantifier les différents états ainsi sélectionnés.

#### 2.3.1.1. Réactifs utilisés et leur action; définitions de différents compartiments de l'aluminium, du fer et du silicium

Les formes de l'aluminium, du fer et du silicium ont été analysés et quantifiés à l'aide de l'analyse totale (noté "T") et sur les extraits obtenus avec quatre réactifs de dissolution couramment utilisés en science du sol :

- le citrate-bicarbonate-dithionite (Mehra-Jackson, 1960) : noté "d";
- l'oxalate (Tamm, 1922 adapté par Schwertmann, 1964) : noté "o";
- le pyrophosphate (Mac Keague et al., 1971) : noté "p";
- le tétraborate (Brückert et Metche, 1972; Brückert et Souchier, 1975) : noté "t"

Ces analyses ont été effectuées sur des prises indépendantes d'échantillons de sol séché à l'air, tamisé à 2 mm et broyé à 200 µm, selon les protocoles décrits par Jeanroy (1983).

Le Tableau IV.3, construit d'après Wada (1977) et Jeanroy (1983) résume les caractéristiques de dissolution des réactifs employés.

A partir des caractéristiques d'extraction de ces différents réactifs, plusieurs compartiments peuvent être distingués pour chacun des éléments Al, Fe, Si :

Ainsi pour le fer, on distingue :

- le fer des *silicates* =  $Fe_T - Fe_d$
- le fer des *oxyhydroxydes bien cristallisés* =  $Fe_d - Fe_o$
- le fer "*amorphe*" extrait à l'oxalate ( $Fe_o$ ) qui peut être lui-même subdivisé en 3 sous-compartiments :
  - le fer des oxyhydroxydes non ou mal cristallisés ou "*fer amorphe minéral*" =  $Fe_o - Fe_p$
  - le fer des *complexes organiques "peu mobiles"* =  $Fe_p - Fe_t$
  - le fer des *complexes organiques "mobiles"* =  $Fe_t$

	Complexes organominéraux		Oxyhydroxydes		Silicates	
	mobiles	peu mobiles	non cristallisés "amorphes"	cristallisés	aluminosilicates paracristallins et amorphes Al.like Allo Imo	cristallisés
tetraborate	Fe Al Si					
pyrophosphate	Fe Al Si	↑ ↑	↑ ↑		↑ ↑	
oxalate	Fe Al Si	↑ ↑	↑ ↑		↑ ↑	
C.B.D.	Fe Al Si		↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	
Analyse totale	Fe Al Si					↑ ↑ ↑

Tab. IV.3 : Action comparée des réactifs utilisés sur les formes de l'aluminium, du fer et du silicium dans les sols.

Pour l'aluminium, on distingue :

- l'aluminium des *aluminosilicates cristallisés (et des oxyhydroxydes cristallisés)* =  $Al_T - Al_O$ ;
- l'aluminium "amorphe", extrait à l'oxalate ( $Al_O$ ) qui peut être, comme le fer, subdivisé en 3 sous-compartiments :
  - l'aluminium "amorphe" minéral =  $Al_O - Al_P$ , c'est à dire Al des oxyhydroxydes non cristallisés et Al des "allophanes s.l.". (ou "aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance");
  - l'aluminium des complexes organiques "peu mobiles" =  $Al_P - Al_t$ ;
  - l'aluminium des complexes organiques "mobiles" =  $Al_t$ ;

Pour le silicium, on distingue :

- le silicium des *silicates cristallisés* =  $Si_T - Si_O$
- le silicium des "allophanes s.l." =  $Si_O$

### 2.3.1.2. Estimation du pourcentage d'"allophanes s.l." ("aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance")

Les différents types d'aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance présentent des rapports atomiques Al/Si caractéristiques de leur nature (Tableau IV.4):

Rapports atomiques		Minéraux
$\frac{Si}{Al}$	$\frac{Al}{Al + Si}$	
$\infty$	0	Opales
10.0 à 9.0	0.01 à 0.10	Opales alumineuses
1.2 à 0.4	0.45 à 0.70	Allophanes
0.5	0.666	Imogolites
0.25	20.80	Allophane-like (1)

(1) Ce nom est conservé de Wada (1982). Les « allophane-like » pourraient être des constituants organominéraux plutôt que des minéraux s.s.

Tab. IV.4 : Rapport Si/Al des "allophanes s.l." dits plutôt "Aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance" (Herbillon, 1983).

- rapport atomique Al/Si de l'ordre de 2 pour l'imogolite dont la formule cristallographique la meilleure serait  $1.1 SiO_2 Al_2O_3 \cdot 2.3-2.8 H_2O$  (Wada, 1985);
- rapport atomique Al/Si de 1 à 2 pour les allophanes s.s. (Wada, 1985) (encore nommés "allophanes halloysitiques" [Parfitt et al., 1980, Parfitt et Wilson, 1985], de formule approchée  $2SiO_2, Al_2O_3, 3H_2O$ )
- rapport atomique Al/Si d'environ 4 pour les allophanes-like qui pourraient être des constituants organominéraux plutôt que des minéraux sensu stricto (Herbillon, 1983).

Ces aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance ou "allophanes s.l." sont dissous par traitement à l'oxalate. Pour estimer leur quantité, le principe est le suivant (Parfitt et Wilson, 1985; Parfitt et al, 1983; Lulli et al, 1983) :

- 1) A partir du rapport atomique : " $Al_O/Si_O$ " ou plutôt, dans le cas des sols riches en matière

organique, à partir du rapport atomique " $(Al_O - Al_P)/Si_O$ ", on déduit la nature du type d'alumino-silicate à organisation cristalline à courte distance qui est majoritaire dans l'échantillon de sol.

2) Puis, sur la base de la formule structurale de l'aluminosilicate paracristallin prédominant dans le sol, on calcule la quantité approximative d'allophanes s.l. (allophane et/ou imogolite) du sol : soit de préférence à partir de la teneur en Si extrait à l'oxalate ( $Si_O$ ), soit à partir de la teneur en Al extrait à l'oxalate corrigée si possible par la teneur en Al extraite au pyrophosphate dans les sols organiques ( $Al_O - Al_P$ ). La meilleure estimation est celle effectuée à partir de  $Si_O$ .

Ainsi, si le rapport moléculaire Al/Si déterminé est plus proche de 2, ce qui est le cas des échantillons de sols andiques étudiés (Tab. IV.5c), la quantité d'allophanes s.l. sera calculée sur la base de formule structurale de l'imogolite "idéale" :  $SiO_2 Al_2O_3 2H_2O$  :

- soit à partir des valeurs  $Si_O$  : % allophanes s.l. =  $100.Si_O / 14,1$  avec  $Si_O$  en %;
  - soit à partir des valeurs d'Al extraits à l'oxalate corrigées par l'Al des complexes organiques : % allophanes =  $100.Al_O / 27,2$  ou mieux % allophanes =  $100 (Al_O - Al_P) / 27,2$ , avec  $Al_O$  et  $Al_O - Al_P$  en %.
- Cette estimation reste très aléatoire, notamment lorsque le rapport atomique  $(Al_O - Al_P)/Si$  excède 2.

Les quantités d'allophanes déterminées selon les deux méthodes sont figurées dans le tableau IV.5c

### 2.3.2. Résultats

Les résultats (tableaux IV.5) sont exprimés *en élément* et non en oxydes : l'existence de plusieurs oxydes de formules différentes, de divers minéraux alumineux et ferrifères, et surtout l'existence de composés amorphes rendent préférable l'utilisation de la forme brute en élément, la seule qui corresponde à un dosage véritable. Certaines quantités seront rapportées aux quantités d'argile bien que celles-ci soient très dépendantes du protocole employé (§ 1).

Le tableau IV.5b présente des *rapports* qui permettent de comparer l'effet de certains réactifs; ces rapports ont valeur de diagnostic. Ainsi pour le fer :  $Fe_L/Fe_T$  exprime la quantité de fer libre ;  $Fe_O/Fe_L$  exprime le degré de désordre du fer libre;  $Fe_P/Fe_O$  rend compte de l'influence de la M.O sur la présence des oxydes mal cristallisés ou amorphes;  $Fe_V/Fe_P$  rend compte de l'influence de la M.O sur la nature des complexes organiques du fer; Il en est de même pour l'aluminium :  $Al_O/Al_T$  rend compte de la quantité relative des formes d'aluminium mal ou non cristallisé;  $Al_P/Al_O$  et  $Al_V/Al_P$  ont la même signification que pour le fer.

La figure IV.13 présente les courbes d'évolution verticale des formes amorphes de l'aluminium et du fer pour 100 g de sol. La figure IV.14 illustre pour l'aluminium et le fer, les courbes d'évolution verticale des différents extraits délimitant des différents compartiments en % de l'élément total (T); l'intérêt de ce mode de présentation en distribution relative est d'annuler les effets de dilution ou d'accumulation relative (dues à des teneurs variables en M.O. par exemple).

#### 2.3.2.1 Dans les Sols Andiques

Parmi les compartiments de l'Al, de Fe et de Si, les formes cristallisées sont majoritaires. Mais dans ces sols, les formes "amorphes", extraites à l'oxalate, sont relativement abondantes (Fig. IV.13 et IV.14). Pour les horizons supérieurs (AN1 à AN4) de l'Andosol et du ranker andique:

- \* l'aluminium amorphe représente 15 à 23 % de l'Al total;
- \* le fer "amorphe" représente 12 à 24% du fer total.

Les "allophanes s.l.", calculés à partir de  $Si_O$ , sont peu abondants : ils constituent 1 à 3 % de la fraction < 2 mm ce qui correspond tout de même à des valeurs de 2,5 à 13 % de la fraction < 2  $\mu m$ . Les maxima se trouvent dans les volumes intermédiaires (AN3, AN4) de l'Andosol. et dans les volumes du ranker andique.

#### 1) Dans l'Andosol

Les analyses totales ont montré que les teneurs en fer total et en aluminium total étaient comparables dans ce sol (§ 2.1). Il en est de même pour les formes Al et Fe extraites à l'oxalate; les formes "amorphes" du fer et de l'Al suivent globalement la même évolution au sein du profil (Fig. IV.13). Deux groupes d'horizons peuvent être distingués (Fig. IV.14):

- les horizons profonds (AN5 et AN6), qui présentent de faibles teneurs en  $Al_O$  et  $Fe_O$  : 6 %  $Al_O/Al_T$  et 3 % de  $Fe_O/Fe_T$ ;
- l'ensemble des horizons sus-jacents qui présentent des teneurs en  $Al_O$  et  $Fe_O$  nettement plus élevées : 15 à 20 % de  $Al_O/Al_T$  et 12 à 24 % de  $Fe_O/Fe_T$ .

Tab. IV.5a : aluminium, fer, et silicium Totaux (T) et extraits par le CBD (d), l'oxalate (o), le pyrophosphate (p) et le tétraborate (t) - en g pour 100 g de sol < 2 mm.

ECHANTILLON	Profondeur cm	Formes de Al en % du sol < 2 mm					Formes de Fe en % du sol < 2 mm					Formes de Si en % du sol < 2 mm				
		AIT	Ald	Alo	Alp	Alt	FeT	Fed	Feo	Fep	Fet	SiT	Sid	Sio	Sip	Sit
<b>ANDOSOL MONTARQUIE</b>																
AN1	0-12	7,84	1,43	1,56	1,10	0,32	10,08	5,03	2,41	1,41	0,08	10,71	0,11	0,15	0,21	0,00
AN2	12-22	8,77	1,68	1,67	1,22	0,30	11,77	5,35	2,74	1,68	0,11	11,45	0,12	0,15	0,23	0,00
AN3	22-41	10,64	2,14	2,16	1,40	0,25	13,82	5,72	2,32	1,69	0,04	13,05	0,16	0,33	0,34	0,00
AN4	41-59	11,73	1,44	1,73	0,81	0,13	14,75	5,26	1,81	0,82	0,01	14,47	0,13	0,39	0,19	0,00
AN5	59-106	13,34	0,56	0,77	0,21	0,05	16,41	4,29	0,50	0,06	0,00	14,08	0,07	0,11	0,07	0,00
AN6	106-120	12,35	0,63	0,80	0,29	0,04	16,21	4,30	0,55	0,08	0,00	13,30	0,10	0,22	0,17	0,00
<b>RANKER ANDIQUE ROUX</b>																
K2	0-20	7,79	1,14	1,77	0,76	0,18	5,83	2,42	1,16	0,35	0,01	17,17	0,11	0,39	0,15	0,00
K1	0-20	8,44	1,39	1,79	0,98	0,27	4,95	2,39	1,07	0,39	0,02	18,70	0,11	0,43	0,18	0,00
<b>SOL BRUN ACIDE ROUX</b>																
BA1	0-8	10,11	0,33	0,33	0,22	0,08	3,72	1,44	0,41	0,26	0,01	23,88	0,05	0,05	0,08	0,00
BA2	8-29	9,52	0,35	0,35	0,22	0,09	3,21	1,41	0,38	0,22	0,01	26,48	0,05	0,05	0,08	0,00
BA3	29-73	10,42	0,57	0,58	0,38	0,10	4,11	1,80	0,69	0,37	0,01	26,73	0,06	0,16	0,12	0,00
BA4	73-116	9,04	0,36	0,34	0,26	0,08	2,58	1,27	0,53	0,32	0,01	29,57	0,04	0,06	0,08	0,00
BA5	116-132	8,91	0,13	0,14	0,10	0,05	1,51	0,57	0,29	0,17	0,00	32,01	0,02	0,02	0,02	0,00
BA6	132-165	7,54	0,11	0,11	0,08	0,03	1,21	0,62	0,34	0,25	0,00	32,52	0,02	0,02	0,02	0,00

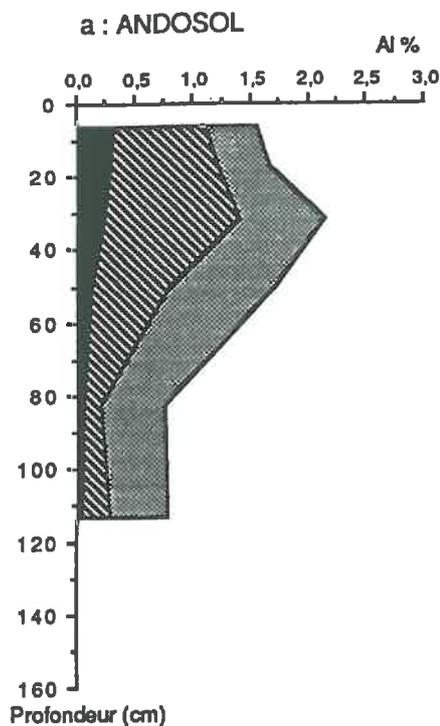
Tab. IV.5b : Rapports caractéristiques pour l'aluminium, le fer et le silicium

ECHANTILLON	Pour l'Aluminium			Pour le Fer				Pour Si	
	Alo/AlT	Alp/Alo	AlT/Alp	Fed/FeT	Feo/Fed	Feo/FeT	Fep/Feo	Fet/Fep	Sio/SiT
<b>ANDOSOL MONTARQUIE</b>									
AN1	0,20	0,70	0,29	0,50	0,48	0,24	0,59	0,06	0,01
AN2	0,19	0,73	0,25	0,45	0,51	0,23	0,61	0,07	0,01
AN3	0,20	0,65	0,18	0,41	0,41	0,17	0,73	0,02	0,03
AN4	0,15	0,47	0,16	0,36	0,34	0,12	0,45	0,01	0,03
AN5	0,06	0,27	0,24	0,26	0,12	0,03	0,11	0,05	0,01
AN6	0,06	0,36	0,15	0,27	0,13	0,03	0,15	0,04	0,02
<b>RANKER ANDIQUE ROUX</b>									
K2	0,23	0,43	0,24	0,42	0,48	0,20	0,30	0,03	0,02
K1	0,21	0,55	0,28	0,48	0,45	0,22	0,36	0,04	0,02
<b>SOL BRUN ACIDE ROUX</b>									
BA1	0,03	0,68	0,37	0,39	0,29	0,11	0,63	0,05	0,00
BA2	0,04	0,63	0,39	0,44	0,27	0,12	0,59	0,05	0,00
BA3	0,06	0,66	0,27	0,44	0,39	0,17	0,53	0,02	0,01
BA4	0,04	0,76	0,32	0,49	0,42	0,21	0,61	0,03	0,00
BA5	0,02	0,70	0,48	0,37	0,50	0,19	0,60	0,03	0,00
BA6	0,02	0,73	0,39	0,51	0,54	0,28	0,72	0,01	0,00

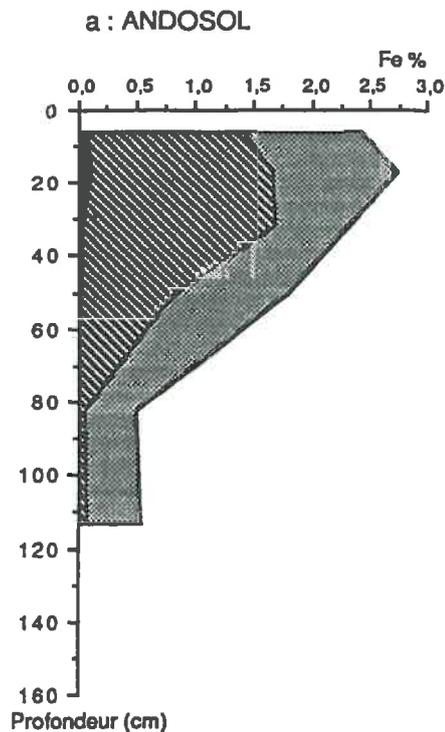
Tab. IV.5c : Rapports atomiques des extraits Al et Si à l'oxalate et Calculs des teneurs en allophanes S.L.

ECHANTILLON	Rapports atomiques		Teneurs en Allophanes s.l., en % du sol < 2mm, calculées			Selon Fey et Leroux, 1977 avec Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (o-p).
	(Alo-Alp)/Sio	Alo/Sio	A partir de la composition de l'imogolite SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2H <sub>2</sub> O			
			Allo=Al(o-p)/27,2	Allo=SiO/14,1	Allo=AlO/27,2	
			.(1a)	.(1b)	.(1c)	
<b>ANDOSOL MONTARQUIE</b>						
AN1	3,26	10,97	1,70	1,05	5,74	1,50
AN2	3,10	11,62	1,64	1,06	6,14	1,50
AN3	2,39	6,84	2,77	2,33	7,94	2,70
AN4	2,46	4,63	3,38	2,77	6,38	3,30
AN5	5,49	7,51	2,07	0,76	2,82	1,80
AN6	2,39	3,75	1,88	1,57	2,94	1,80
<b>RANKER ANDIQUE ROUX</b>						
K2	2,69	4,71	3,71	2,77	6,50	3,50
K1	1,94	4,31	2,96	3,06	6,57	3,00
<b>SOL BRUN ACIDE ROUX</b>						
BA1	2,31	7,26	0,38	0,33	1,20	0,40
BA2	2,79	7,54	0,48	0,35	1,30	0,40
BA3	1,28	3,81	0,71	1,12	2,12	0,80
BA4	1,52	6,37	0,30	0,39	1,25	0,30
BA5	2,14	7,21	0,15	0,14	0,51	0,15
BA6	1,70	6,18	0,11	0,14	0,42	0,12

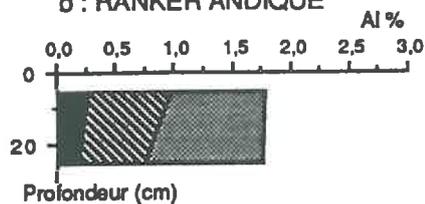
# 1 - FORMES AMORPHES DE L'ALUMINIUM



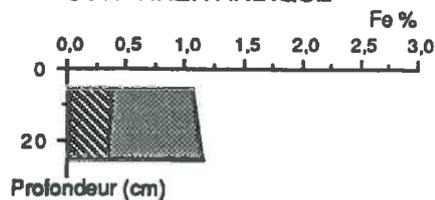
# 2 - FORMES AMORPHES DU FER



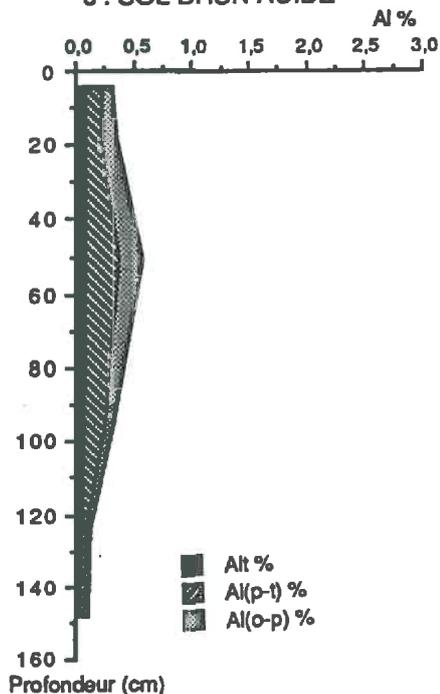
## b : RANKER ANDIQUE



## b : RANKER ANDIQUE



## c : SOL BRUN ACIDE



## c : SOL BRUN ACIDE

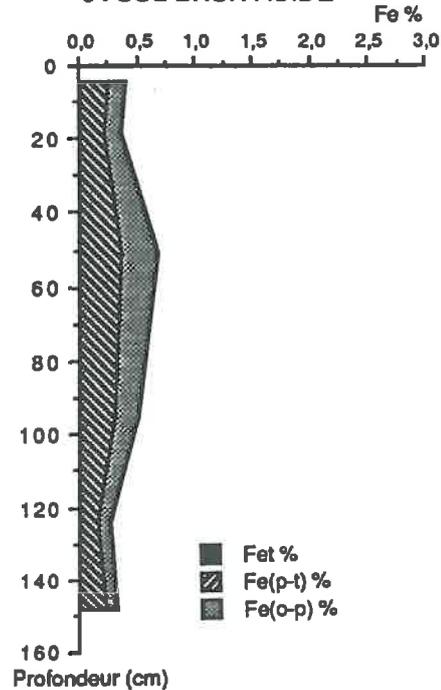


Fig.IV.13.: Evolutions verticales des formes de Al (1) et Fe "amorphes" (2) (actifs) - en g pour 100 g de sol < 2 mm., pour l'Andosol (a), le Ranker andique (b) et le Sol Brun Acide (c)

("o" : extrait oxalate, "p" : extrait pyrophosphate; "t" extrait tétraborate).

1 - FORMES DE L'ALUMINIUM

2 - FORMES DU FER

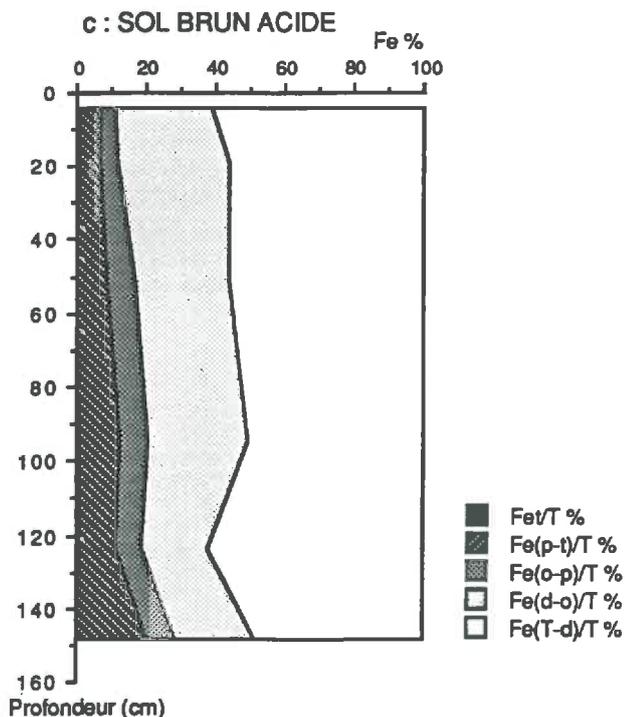
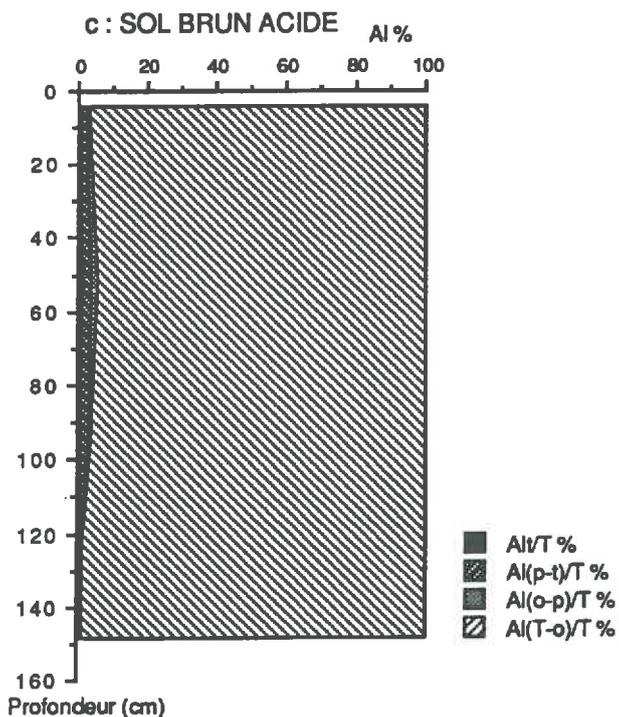
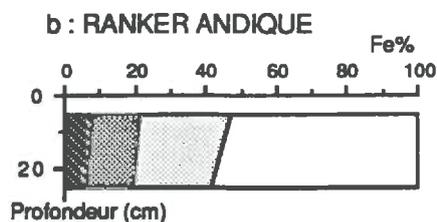
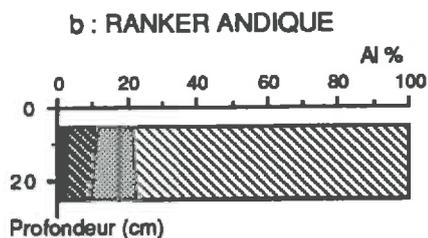
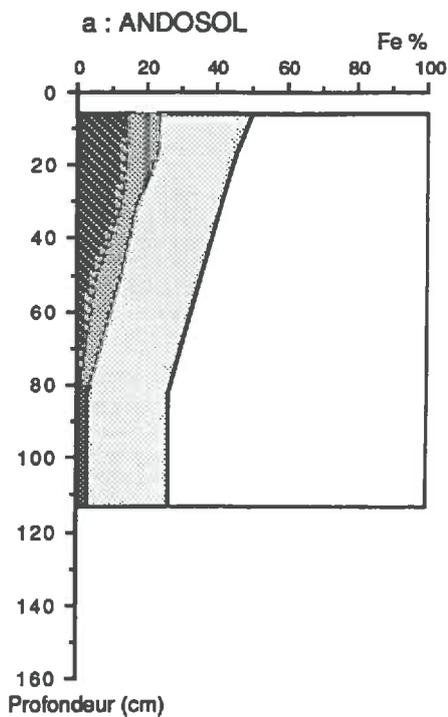
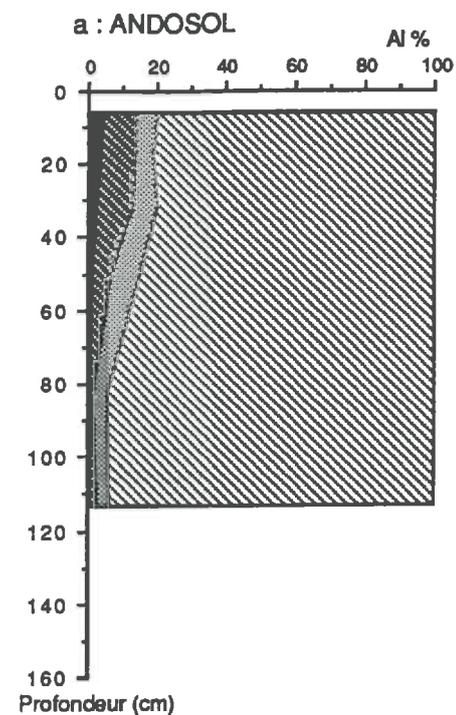


Fig.IV.14 . : Evolutions verticales des différents extraits de Al (1) et Fe (2), respectivement en % de Al<sub>T</sub> et de Fe<sub>T</sub>, pour l'Andosol (a), le Ranker andique (b) et le Sol Brun Acide (c).

("T" : analyse totale; "d" : extrait cbd; "o" : extrait oxalate, "p" : extrait pyrophosphate; "t" extrait tétraborate).

Dans les 3 horizons supérieurs, l'Al et le Fer amorphe sont essentiellement sous forme complexée avec la matière organique (rapports  $Al_p/Al_o \geq 0,65$ ; rapports  $Fe_p/Fe_o \geq 0,6$ ), et parmi ces formes complexées, les formes "complexes mobiles" sont minoritaires (rapports :  $Al_t/Al_p \leq 0,3$ ;  $Fe_t/Fe_p \leq 0,07$ ). (Fig.IV.14a; Tab.IV.5b).

Les formes complexées organiques de l'aluminium et du fer présentent un maximum dans l'horizon médian AN3. Cependant, si il existe une certaine migration de ces complexes celle-ci est faible : rapporté à l'élément total, on n'observe plus de maximum ni pour les formes complexées de l'aluminium, ni pour les formes complexées du fer; de plus, les faibles rapports  $Fe_t/Fe_p$  et  $Al_t/Al_p$  ainsi que le fait que les valeurs maximales de ces rapports se situent en surface confirment la faible mobilité de ces complexes organiques (à l'opposé des sols podzoliques).

*Suivi de l'évolution verticale des formes du fer et de l'aluminium :*

La discontinuité nette entre les volumes profonds et les volumes supérieurs se matérialise par une distribution relative différente du fer et de l'aluminium, notamment des formes silicates et des formes amorphes.

**\* Pour le fer**

° Dans les volumes profonds, les silicates ferromagnésiens manifestent une faible transformation : seulement 26 % du fer total est sous forme libre avec une importante contribution du fer des oxydes bien cristallisés (23 % du fer total) et une très faible part de fer amorphe (3 % du fer total) essentiellement sous forme minérale (Fig.IV.14.b).

° Dans le volume médian sus-jacent (AN4), l'altération est plus intense, et conduit à l'individualisation d'une plus grande part de fer amorphe minéral (7 % de  $Fe_T$ ) et de fer de complexes organiques (5 % de  $Fe_T$ ); cette altération se poursuit vers la surface : 10 % du fer total est alors sous forme de fer amorphe minéral, et 13 % sous forme de complexes organiques

° Depuis l'horizon médian AN4 à la surface, les modifications concernent, outre le fer des silicates, les parts de fer amorphe minéral et celui des complexes organiques; les formes complexées sont de type peu mobiles; et les complexes mobiles sont quasi-absents (moins de 1 % du fer total). Le fer libéré ne participe pas à la formation d'oxydes bien cristallisés : leur proportion reste quasiment stable dans l'ensemble du profil : 23 à 25 % du fer total.

**\* Pour l'aluminium**

° Dans les volumes profonds, l'aluminium amorphe ne constitue que 6 % de l'Aluminium total.

° Dès le volume médian sus-jacent (AN4) l'altération est plus importante : 15 % de l'Al total est sous forme amorphe et ceci est dû à la fois à l'augmentation de l'Al amorphe minéral (8 % de  $Al_T$ ) et de l'Al des complexes organiques (7 % de  $Al_T$ ).

L'altération continue à progresser vers la surface : 20 % de l'Aluminium total est sous forme amorphe dès le volume AN3 et ceci est dû notamment à l'augmentation rapide des formes complexées qui constituent alors 13 à 14 % de l'Al total et 70 % de l'Al amorphe. Celles-ci sont essentiellement sous forme stable (voir  $Al_t/Al_p$ ), mais dans les volumes supérieurs se forment des formes chélatées ( $Al_t$  plus important) tandis que les formes amorphes minéral diminuent. Ceci peut s'expliquer de la manière suivante : dans les volumes de surface, les complexes organominéraux sont stabilisés par leur forte charge en Al; puis il y aurait destruction des complexes par minéralisation des acides humiques avec libération de l'Al qui sert alors à former allophanes et imogolite dans les volumes médians AN3 et AN4.

2) Dans le Ranker Andique

Comparé aux horizons supérieurs (AN4 à AN1) de l'Andosol, la différence essentielle concerne la teneur en fer "amorphe" exprimée en % du sol inférieur à 2 mm (Fig.IV.13b), qui est 2,5 fois moins élevée dans les horizons K1, K2 du Ranker; les quantités d'Al et Si amorphes étant par ailleurs comparables. Cette différence est attribuable à la teneur en fer total plus élevée dans l'Andosol : rapportée au fer total, la proportion de "fer amorphe" est en effet comparable dans les 2 sols :  $Fe_o/Fe_T=20\%$  dans les 2 horizons du ranker comme pour les horizons supérieurs de l'andosol (Fig.IV.14).

Parmi les formes amorphes, les formes "Al et Fe complexées par la matière organique" ( $\leq 55\%$  pour Al,  $\leq 36\%$  pour Fe) sont moins importantes que pour les horizons de l'Andosol à égale teneur en M.O.. C'est là l'effet du pH plus élevé, d'une matière organique moins acidifiante, dans le ranker andique par rapport à l'andosol.

2.3.2.2 Dans le Sol Brun Acide

Les formes "amorphes" sont très peu abondantes comparées aux sols andiques (Fig.IV.13c). Elles

sont du même ordre que celles citées par Jeanroy (1983) pour des sols bruns acides. Ce qui frappe par rapport aux profils andiques, c'est la faible quantité d'aluminium amorphe : celui-ci constitue moins de 6 % de l'Al total (Fig. IV.14c). Les formes du fer rapportées au fer total sont globalement comparables à celle des profils andiques.

C'est l'horizon médian microagrégé BA3 qui présente les maxima de formes amorphes pour Al, Fe, et Si.

Dans ce sol brun acide, on observe une augmentation des formes libres du fer rapporté au fer total ( $Fe_D/Fe_T$ ) vers la profondeur (Fig.IV.14c), ce qui à priori indiquerait une migration des formes libres du fer jusqu'à BA6, soit jusqu'à plus de 160 cm.

### 2.3.3. Conclusion

#### ° Comparaisons des quantités de formes Fe, Al, Si amorphes (o) dans les sols andiques et dans le sol brun acide

\* Les quantités de formes amorphes pour chacun des éléments Al, Fe et Si exprimées en % du sol total, sont largement supérieures dans les sols andiques par rapport à celles du sol brun acide (Fig.IV 13). Dans les volumes supérieurs et médians, elles sont :

- en moyenne multipliées par 4 pour chacun des 3 éléments (multipliées par 4,5 pour l'aluminium, par 4 pour le silicium et au minimum par 1,5 pour le fer, en moyenne)
- au minimum par 2,7 pour Al, par 1,5 pour Fe; tandis que pour Si, les valeurs peuvent être comparables.

Même les volumes profonds de l'Andosol pour lesquels on a noté une nette diminution des teneurs en éléments amorphes par rapport aux autres volumes des sols andiques, présentent des valeurs comparables aux valeurs maxima du sol brun acide.

\* Le fait de rapporter les quantités de chaque élément amorphe à l'élément total, permet d'annuler les effets d'hétérogénéité des matériaux (notamment les différences importantes concernant  $Si_T$  et le  $Fe_T$ ). Il apparaît alors (Fig.IV.14) que :

- Les valeurs de fer amorphe rapportée au fer total ( $Fe_D/Fe_T$ ) sont du même ordre de grandeur dans les sols andiques et le sol brun acide dans les ensembles supérieurs; l'allure de la variation  $Fe_D/Fe_T$  du bas vers le haut est inversée dans les 2 types de sol : 24 à 12 % dans l'Andosol depuis la surface vers la profondeur et 11 à 21 % dans le sol brun acide depuis la surface vers la profondeur.

- Ce sont les proportions relatives de l'Al amorphe ( $Al_D/Al_T$ ) qui différencient de manière importante les deux types de sol. Pour les ensembles supérieurs :

- en moyenne 20 % de l'Aluminium total est sous forme amorphe dans les volumes supérieurs des sols andiques contre seulement 4 % dans le sol brun acide (soit un rapport moyen de 5, le rapport minimum étant de 2,75);

- en moyenne 2 % du Silicium total est sous forme amorphe dans les sols andiques contre 0,3% dans le sol brun acide (soit un rapport moyen de 7 et un rapport minimum de 2).

#### ° Comparaison par rapport aux données bibliographiques existant pour les sols du Massif Central (Hétier, 1975; Moinereau, 1977)

On doit noter que les résultats présentés ici n'autorisent pas de comparaison avec ceux obtenus par Hétier (1975) et Moinereau (1977). Les méthodes d'extraction utilisées ne sont en effet pas les mêmes.

Moinereau utilise un traitement oxalate-dithionite + NaOH pour doser les formes amorphes. On peut critiquer ce choix dans la mesure où ce traitement attaque une part non négligeable de phyllosilicates et où le dithionite dissout le fer libre.

Hétier (1975) utilise l'oxalate-dithionite sans traitement complémentaire à la soude; il constate que l'oxalate employé seul serait probablement plus approprié.

#### ° Résultats de dissolution sélective et Classification

Les résultats obtenus ici autorisent en revanche quelques remarques ayant trait à la genèse et à la classification des sols andiques

La faible quantité d'allophanes (maximum de 2,8 % du sol < 2 mm) distingue les sols andiques étudiés des andosols les plus typiques dits "à allophanes" dans lesquels le pourcentage d'allophanes peut atteindre 20 %. "Ranker andique" et "Andosol" peuvent être qualifiés d'"andosols non allophaniques"

(appellation suggérée par l'école japonaise).

Les quantités d'Al et Fe amorphes très faibles dans les volumes inférieurs, augmentent cependant nettement dans les volumes sus-jacents où le critère  $Al_0 + 1/2 Fe_0 \geq 2\%$  caractérisant les sols à propriétés andiques (R.P.F., 1990; ICOMAND, 1987) est respecté.

La majorité des formes de fer et d'Aluminium amorphe est complexée par la matière organique, ce qui traduit une certaine tendance podzolique. Cependant les faibles rapports :  $Fe_f/Fe_p$  au maximum égal à 0,07 et,  $Al_f/Al_p$  au maximum égal à 0,3 dans les volumes superficiels indique une proportion négligeable de formes complexées mobiles vraiment caractéristiques des sols podzoliques (Brückert, 1979). Ce sont au contraire les formes complexées "stables" très peu mobiles qui dominent. D'autre part, le critère  $(Fe+Al)_p/(Fe+Al)_d > 0,5$  diagnostique des sols podzoliques (Soil Survey Staff, 1975) n'est pas respecté.

En résumé, l'"Andosol" ici étudié peut être considéré comme "à tendance crypto-podzolique".

### 3. Données physico-chimiques

#### 3.1. $pH_{H_2O}$ , $pH_{KCl}$

##### 3.1.1 Variation des valeurs du pH selon le mode de préparation de l'échantillon (Fig. IV.15 et Fig.IV.16)

Pour les sols andiques comme pour le sol brun acide, il existe des différences significatives entre les valeurs du  $pH_{H_2O}$  selon que le sol a été préalablement séché à l'air ou conservé humide, et ce toujours dans le même sens : le  $pH_{H_2O}$  sur sol conservé humide est inférieur au  $pH_{H_2O}$  mesuré sur sol séché à l'air de 0,45 unité pH en moyenne. L'écart varie le plus souvent de 0,3 à 0,7 unité.

Pour le  $pH_{KCl}$ , la différence des valeurs selon le mode de préparation de l'échantillon reste dans le même sens, mais n'est pas significative, excepté dans les volumes profonds de l'andosol (écart de 0,6 à 0,8 unité) et en moindre partie dans le ranker andique (écart faible de 0,3).

Les valeurs  $\Delta pH_{H_2O} - pH_{KCl}$  sont par suite généralement plus faibles sur sol humide que sur sol séché à l'air.

Dans la bibliographie, il y a peu de mention sur ces problèmes de modifications du pH selon l'état d'humidité préalable de l'échantillon. Il est fort probable que la dessiccation des échantillons modifie de manière irréversible les équilibres existant à l'état d'humidité naturelle, notamment en affectant les liaisons entre surfaces minérales et surfaces organiques (Flach et al., 1980).

##### 3.1.2 Les valeurs du pH et leur évolution verticale dans les sols andiques et le sol brun acide

La valeur de pH sur sol conservé humide constitue probablement un meilleur indice de la réaction du sol au champ que celle mesurée sur sol sec. Aussi considérerons nous plutôt les valeurs sur sol conservé frais (Fig. IV.15). Cependant, classiquement, les valeurs sont mesurées sur sol séché à l'air et ces dernières sont utiles pour les comparaisons avec la bibliographie.

Dans l'Andosol, le  $pH_{H_2O}$  est inférieur à 5 dans l'ensemble du profil. Il est très acide (pH 4 à 4,3) dans les volumes superficiels plus riches en matière organique.

La valeur  $\Delta (pH_{H_2O} - pH_{KCl})$  est négligeable dans les volumes supérieurs AN1 à AN4; elle augmente brusquement à 1,5 dans les volumes profonds (AN5, AN6) qui présentent une forte acidité d'échange (§ 3.2.2). Ces volumes profonds manifestent ainsi une forte acidité d'échange corrélativement à l'augmentation des phyllosilicates en l'occurrence de l'hallowysite. Les valeurs  $\Delta (pH_{H_2O} - pH_{KCl})$  négligeables dans les volumes supérieurs pourraient être attribuées à la présence de constituants à surface à charge variable dont le pH d'équilibre en phase aqueuse est proche du ZPC (Espiau, 1986), puisque l'acidité d'échange peut y être élevée (§ 3.2.2).

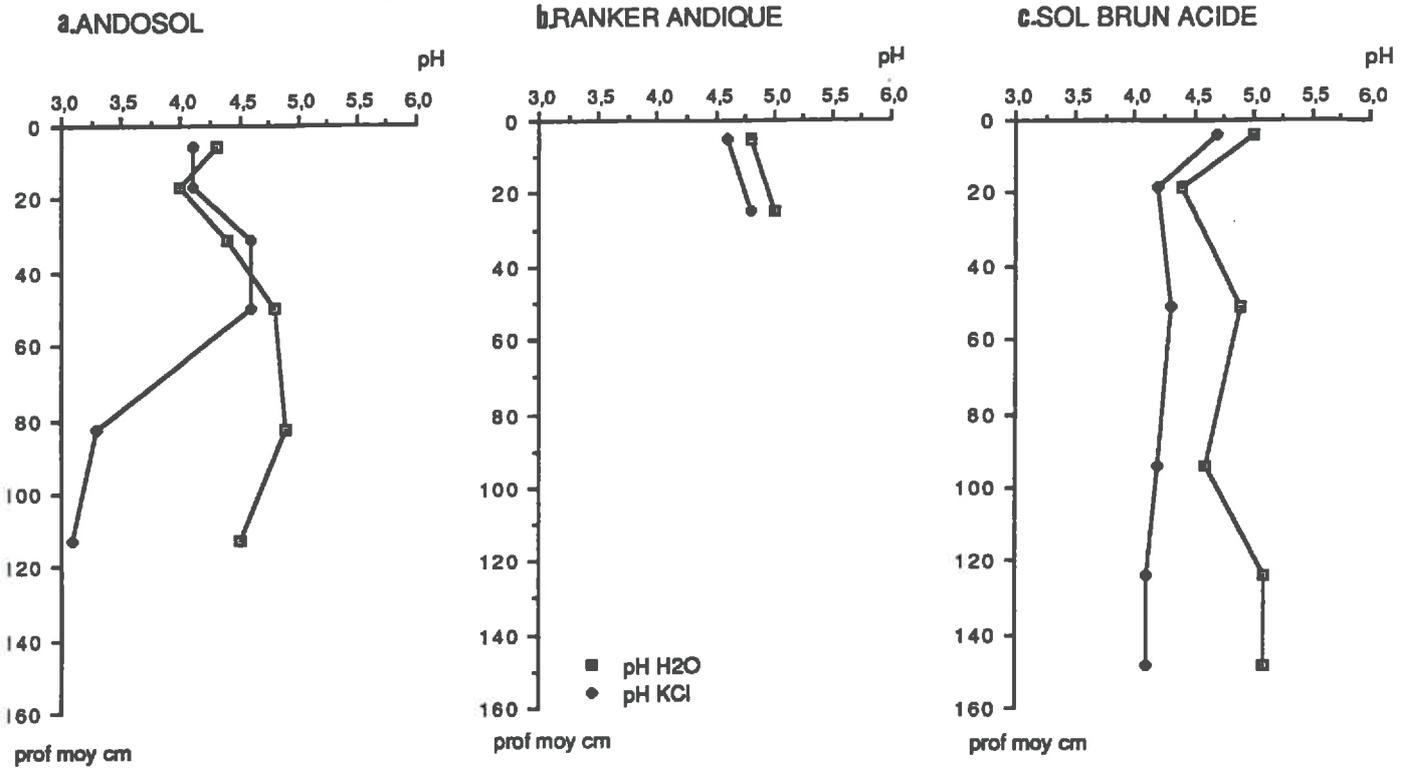


Fig. IV.15.: Evolution verticale des valeurs du pH eau et du pH KCl sur sol conservé frais pour l'andosol (a), le ranker andique (b) et le sol brun acide (c)

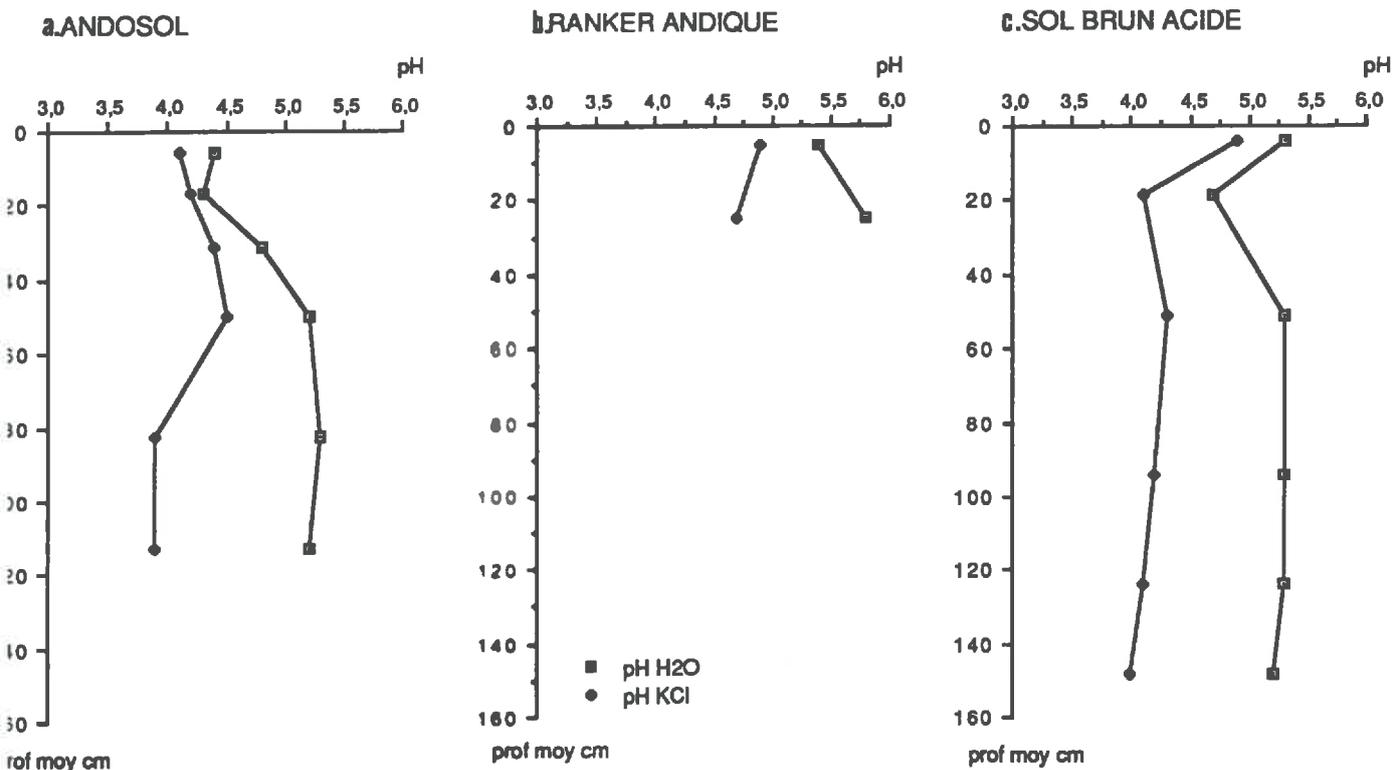


Fig. IV.16.: Evolution verticale des valeurs du pH eau et du pH KCl sur sol séché à l'air pour l'andosol (a), le ranker andique (b) et le sol brun acide (c)

Dans les rankers andiques, le  $pH_{H_2O}$  est moins acide (4,8 et 5) que dans le volume superficiel AN1 de l'andosol. Les valeurs delta ( $pH_{H_2O} - pH_{KCl}$ ) restent très faibles (0,2) en accord avec la faible acidité d'échange (§ 3.2.2).

Dans le sol brun acide, le  $pH_{H_2O}$  présente un minimum de 4,4 dans le volume BA2 de subsurface plus riche en argile granulométrique ; il reste de l'ordre de 5 dans les autres volumes. La valeur delta ( $pH_{H_2O} - pH_{KCl}$ ), négligeable dans les volumes superficiels, augmente dans les volumes intermédiaires et atteint l'unité dans les volumes profonds qui manifestent ainsi une plus forte acidité d'échange (en relation probable avec la plus grande proportion de vermiculites s.s.).

## 3.2 La capacité d'échange et les cations échangeables

### 3.2.1. La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique a été mesurée, sur sol conservé humide, par la méthode au  $CaCl_2$  tamponné : à pH4 ("CEC<sub>4</sub>"), à pH7 ("CEC<sub>7</sub>") et à pH9 ("CEC<sub>9</sub>"), et au pH naturel du sol ("CEC<sub>sol</sub>"). Par ailleurs, la capacité d'échange a été déterminée selon la méthode classique Metson à l'acétate d'ammonium à pH 7, sur sol séché à l'air ("CEC<sub>Metson</sub>"). Ces mesures ont été réalisées pour tous les volumes des sols andiques et du sol brun acide.

#### 3.2.1 1. Variation de la capacité d'échange cationique en fonction du pH

##### Résultats

Dans les sols andiques, la quantité de charges négatives développées lorsque le pH augmente est extrêmement importante dans les horizons des sols andiques (Fig. IV.17a et 17b), notamment pour les volumes supérieurs (AN1 à AN4 entre 0 et 60 cm de profondeur, K1, K2)

La variation de CEC entre pH 4 et pH 7 atteint 42 meq/100g, soit 14 meq/100g par unité pH dans le volume superficiel. Elle diminue vers la profondeur dans l'andosol en même temps que la quantité de matière organique, mais reste de 18 meq/100g, soit 6 meq/100g par unité pH dans l'horizon AN4.

La variation de CEC entre pH 7 et pH 9, est maximale dans les volumes médians (AN3, AN4) : 13 meq/100g par unité pH, et diminue vers la surface (10 meq/100g par unité pH).

Le taux de variation de la CEC entre pH 4 et pH 9 :  $100.(CEC_9 - CEC_4) / CEC_9$ , utilisé comme valeur test dans la R.P.F.(1990), atteint 94 % dans les volumes médians et reste très élevé dans les volumes de surface (AN1, AN2) comme dans les volumes profonds (AN5, AN6). Le taux de variation de la CEC entre pH 4 et pH 7 :  $100.(CEC_7 - CEC_4) / CEC_7$ , est de 85 à 90 % dans les volumes médians AN3 et AN4.

Dans le sol brun acide (Fig.IV 17c), la variation de la capacité d'échange entre pH4 et pH9, exprimée en meq/100g, est 2 fois moins élevée que dans les volumes supérieurs des sols andiques, soulignant une moindre abondance de charges variables. Elle devient quasi-négligeable dans les volumes profonds.

Cependant, les taux de variation restent très importants : 65 à 70 % de la CEC mesurée à pH 7 est attribuable au développement de charges variables entre pH 4 et 7.

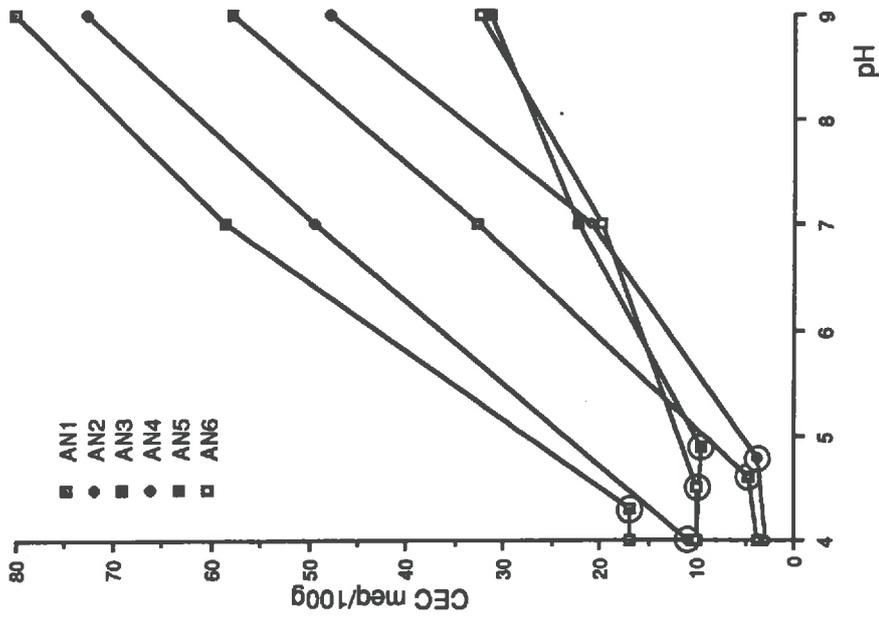
##### Discussion

Dans les sols andiques, le phénomène de variation de la capacité d'échange en fonction du pH a souvent été attribué à la présence d'allophanes et à l'ionisation de leurs groupements  $Al(OH)_3$  ou  $Si(OH)_4$ .

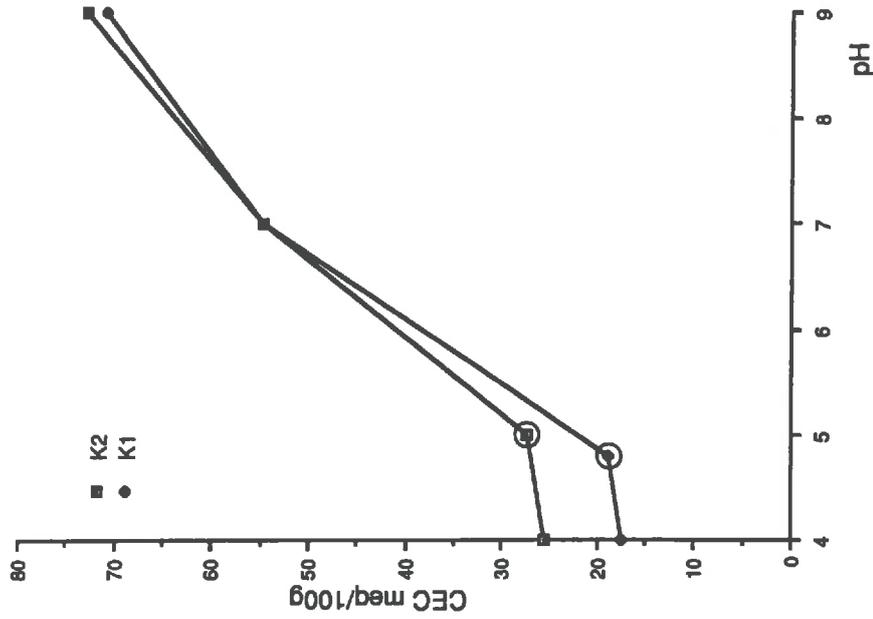
Un taux delta CEC entre pH 4 et pH 9 :  $100.(CEC_9 - CEC_4) / CEC_9$  supérieur ou égal à 40 % est considéré comme critère "allophanique" (RPF, 1990). Or cette propriété est largement respectée pour tous les volumes des sols andiques étudiés mais aussi pour tous les volumes du sol brun acide. Cette valeur n'est donc pas spécifique des allophanes.

La plupart des études sur les caractéristiques de charge variable des andosols n'ont souvent couvert qu'une gamme limitée de valeurs de pH, et/ou des sols qui contenaient des types limités de matériaux échangeurs d'ions, notamment des allophanes s.l; le rôle d'autres constituants a souvent été éclipsé.

a : ANDOSOL



b: RANKER ANDIQUÉ



c : SOL BRUN ACIDE

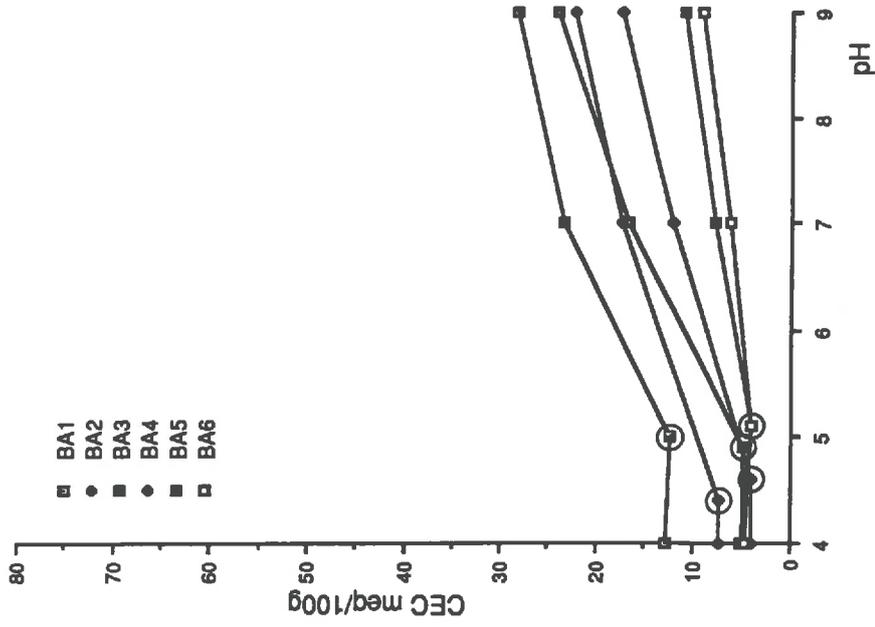


Fig. IV.17. : Variation de la capacité d'échange en fonction du pH : pour les volumes de l'andosol (a), du ranker andique (b) et du sol brun acide (c).

La CEC est mesurée : à pH4 (CEC4), à pH7 (CEC7), à pH9 (CEC9) et au pH du sol (CEC<sub>sol</sub>) ○

Dans les volumes étudiés, parmi les constituants identifiés (§ 2) susceptibles de jouer un rôle sur la variation de CEC, on retiendra :

- pour l'andosol: la matière organique, les complexes Fe,Al-humus, l'halloysite et la métahalloysite, les oxyhydroxydes de fer;
- pour les rankers andiques, la matière organique, les complexes Fe,Al -humus, la kaolinite désordonnée;
- pour le sol brun acide, ce sont probablement les groupements OHAl interfoliaires des phyllosilicates 2/1, et les groupements de bordure de la kaolinite qui jouent le rôle principal.

Pour les sols andiques, la variation de la CEC entre pH7 et pH 4 est assez bien corrélée avec la teneur en matière organique :  $CEC_7 - CEC_4 = 1,074 M.O. + 13,145$  avec  $R = 0,94$  pour les 8 volumes andiques étudiés;

Pour les volumes du sol brun acide, la variation de la CEC entre pH 4 et pH 9 est bien corrélée avec les quantités de formes libres Al et Fe, notamment avec les quantités de fer libre.

Okamura et Wada (1983) et Wada (1985) qui ont effectué des études plus systématiques montrent que l'importance de l'effet du pH et de la concentration de l'électrolyte sur la valeur de la CEC dépend du matériau échangeur d'ion dominant, et diminue dans l'ordre suivant :

- (1) allophanes et imogolite  $SiO_2/Al_2O_3=1$  (Si/Al=0,5) et/ou complexes Al-humus avec ou sans intergrades 2/1-2/1/1
- (2) allophanes à rapport  $SiO_2/Al_2O_3=2$  (Si/Al=1)
- (3) gibbsite, micas, chlorite-vermiculite
- (4) complexes Al-humus et halloysite
- (5) halloysite
- (6) kaolinite et intergrades vermiculite-chlorite
- (7) smectites.

### 3.2.1.2 La capacité d'échange mesurée au pH du sol

#### 1) Valeur CEC4 et Valeur CECsol non significativement différente

Dans les deux types de sol, la valeur de la CEC à pH 4 n'est pas significativement différente de la valeur mesurée au pH naturel du sol. L'écart maximum entre les deux valeurs de CEC est inférieur à 2 meq/100g. On observe donc un palier dans la valeur de la CEC aux faibles pH (entre pH4 et pH4,5-5) (Fig.IV.17).

Ce palier pourrait correspondre à la capacité d'échange "permanente" d'origine plutôt structurale due à des substitutions isomorphes dans la structure des minéraux. C'est l'interprétation que l'on peut donner pour les volumes profonds dépourvus de matière organique. Dans ces volumes profonds, la CEC peut être entièrement attribuée aux colloïdes minéraux. Elle peut être exprimée en meq pour 100 g d'argile : les valeurs de CEC au pH du sol assimilées à la CEC d'origine structurale, sont alors de :

- 40 et 53 meq/100g d'argile dans les volumes profonds de l'andosol; ce sont des valeurs relativement élevées ;
- 20 et 24 meq/100g d'argile, soit 2 fois moins élevée dans les volumes profonds du sol brun acide dans lesquels les argiles présentent donc une moindre "activité de surface"; ces valeurs correspondent assez bien à des échantillons à kaolinite dominante; elles sont un peu plus élevées que la CEC de la kaolinite probablement du fait de la présence des micas et surtout des minéraux à 14 Å mis en évidence aux R.X.

#### 2) Evolution verticale de la CEC au pH du sol

Dans l'Andosol, la CEC au pH du sol est faible : inférieure à 5 meq/100g dans les volumes intermédiaires (AN3, AN4) les plus riches en charges variables, elle augmente jusqu'à 17 meq/100g en surface corrélativement à l'augmentation de la matière organique; elle augmente aussi à 10 meq/100g dans les volumes profonds qui sont plus riches en phyllosilicates cristallisés.

Dans les rankers andiques, la CEC mesurée au pH du sol est assez élevée dans ces volumes superficiels riches en matière organique : 19 meq/100g sur basalte sain et 27 meq/100g sur basalte altéré.

Dans le sol brun acide, la CEC au pH du sol est faible sur la plus grande partie du profil : 4 à 5 meq/100g dans les volumes profonds et intermédiaires; elle augmente légèrement dans les volumes de surface, notamment dans le volume superficiel BA1 (12 meq/100g).

### 3.2.2 Cations échangeables

Nous analyserons les résultats pour les bases échangeables ("S") et l'aluminium échangeable ( $Al^{3+}$ ); les protons échangeables n'ont pas été dosés. La différence entre la valeur de la CEC mesurée au pH du sol et la somme des bases et de l'aluminium échangeables "S+Al" pourrait correspondre à ces protons.

Dans l'Andosol, l'aluminium échangeable est le plus souvent supérieur à 4 meq/100g. Il atteint 7 meq/100g dans les volumes profonds et dans le volume de subsurface. La quantité de bases échangeables est faible : 0,5 à 2,7 méq/100g sur la majeure partie du profil avec un minimum dans les volumes médians. Le volume superficiel présente un maximum de 5 meq/100g (Fig.IV.18). L'Al échangeable est donc largement prépondérant sur les bases ; le *taux d'acidité d'échange*  $100 \cdot Al^{3+}/(S+Al)$  est très élevé : plus de 70 % sur l'ensemble du profil, 80 à 90 % pour les horizons intermédiaires (AN2 à AN4). Seul le volume superficiel AN1 présente un *taux d'acidité d'échange* moindre restant tout de même de 50 %.

Dans les Rankers Andiques, les deux volumes (K1, K2) sont saturés en bases notamment par  $Ca^{2+}$  (60 à 70 % de S) et  $Mg^{2+}$ . L'aluminium échangeable est négligeable (< 0,5 meq/100g).

Le complexe adsorbant du ranker andique présente donc une garniture cationique totalement différente de celle de l'Andosol (Fig.IV.18). A cela, plusieurs explications sont envisageables : le stock de minéraux altérables est important dans ces volumes de ranker andique; cette réserve minérale peut donc fournir les bases, alors qu'elle est très réduite dans l'andosol; on peut aussi penser à des apports d'engrais pour ce ranker sous prairie.

Dans le sol Brun Acide, l'Al échangeable est moins important que dans l'andosol mais reste non négligeable sur la plus grande partie du profil où il varie peu : 1,6 à 2,7 meq/100 (les maxima correspondant au volume BA2 le plus riche en argile granulométrique, et au volume BA4). Le volume superficiel BA1 présente quant à lui une quantité d'Al échangeable négligeable. Ce volume superficiel est quasi saturé en bases (S/M<sup>+</sup> de 95%), notamment par  $Ca^{2+}$  (64 % de S) avec un part non négligeable de  $Mg^{2+}$  (30 % de S). C'est là probablement le résultat d'apport de chaux sur cette parcelle située sous prairie. Les valeurs Al échangeable sont bien corrélées avec les valeurs  $pH_{H_2O}$ .

Le rapport Al/S est supérieur ou égal à 1, au dessous de 30 cm de profondeur (des volumes BA3 à BA6). Le *taux d'acidité d'échange* n'est pas très élevé : 62 % au maximum dans les volumes rouilles; il diminue globalement depuis la profondeur vers la surface de 62 à 40 %. Notons une bonne corrélation avec la distribution des racines qui diminuent brusquement dans le volume BA4 alors que le *taux d'acidité d'échange* devient supérieur à 50 %.

### 3.3 pH NaF

Principe : cette mesure est à la base du test de Fieldes et Perrott (1966); le fluorure de sodium réagit avec les formes hydroxylées (de l'aluminium) en libérant des hydroxydes qui provoquent une élévation du pH, selon le schéma type :



Les valeurs du  $pH_{NaF}$  ont été mesurées à 1 mn, 2 mn et 30 mn sur sol conservé humide (rapport sol-solution : 1g/50ml) (Fig.IV.19b). La vitesse de la réaction donne un indice de la réactivité de la fraction de l'Al considérée. Le  $pH_{NaF}$  mesuré à 2 mn (Fig.IV.19a) est une valeur test dans la classification des Andepts de la Soil Taxonomy, reprise par le R.P.F. (1990).

Les valeurs de  $pH_{NaF}$  à 2 mn sont en moyenne plus élevées dans les sols andiques (9,3 à 10,8) que dans le sol brun acide (8,9 à 9,7); cependant certains volumes présentent des valeurs identiques : cas des volumes intermédiaires (BA3, BA4) du sol brun acide et des horizons profonds (AN5, AN6) ou de l'horizon superficiel (AN1) de l'Andosol.

La valeur du  $pH_{NaF}$  est de plus en plus élevée au cours du temps. L'allure des courbes à 1 mn, 2 mn, 30 mn en fonction de la profondeur reste globalement identique.

Les courbes du  $pH_{NaF}$  en fonction de la profondeur ont globalement la même allure dans l'Andosol et dans le sol Brun Acide : elles présentent un maximum dans les horizons micro-agrégés médians (AN3, BA3) et diminuent selon une même pente vers la surface et la profondeur. Cependant ce ventre est nettement plus accentué dans l'Andosol.

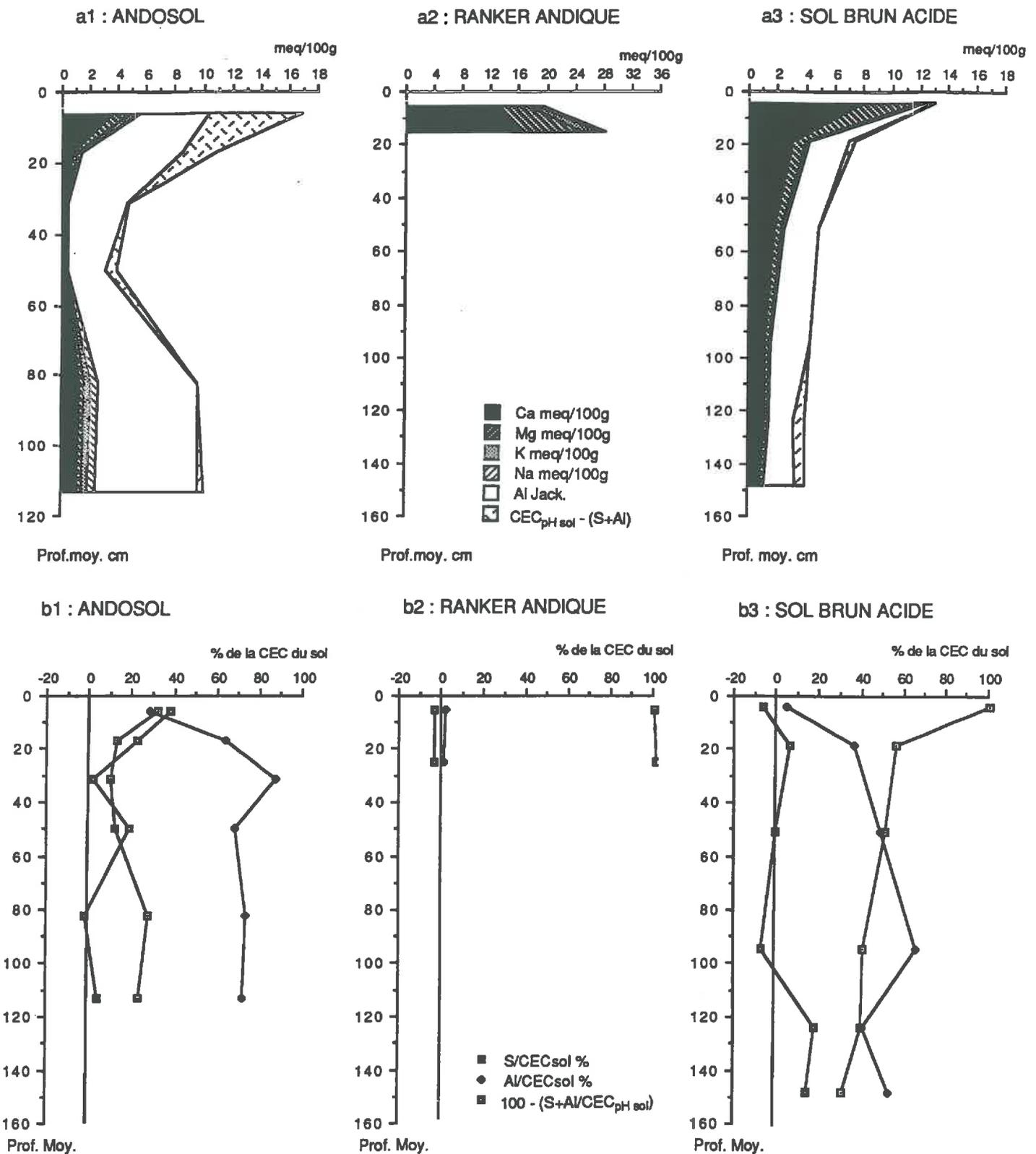
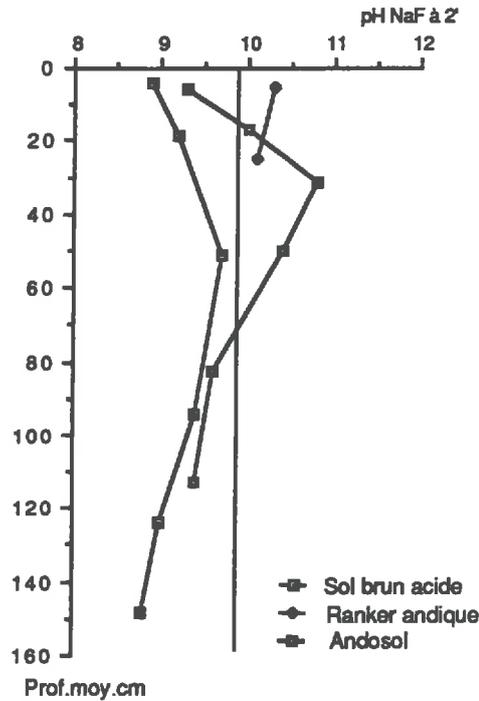


Fig. IV.18. : Evolution verticale (Fig18.a) de la CEC mesurée au pH du sol et des cations échangeables; et évolution verticale (Fig.18b) de la somme des bases échangeables, de l'Aluminium échangeable et de la valeur "CECsol - (S+Al)" en % de la CEC au pH du sol; pour l'andosol (1), le ranker andique (2) et le sol brun acide (3)

a : ANDOSOL, RANKER ANDIQUE ET SOL BRUN ACIDE



b1 : ANDOSOL

b2 : RANKER ANDIQUE

b3 : SOL BRUN ACIDE

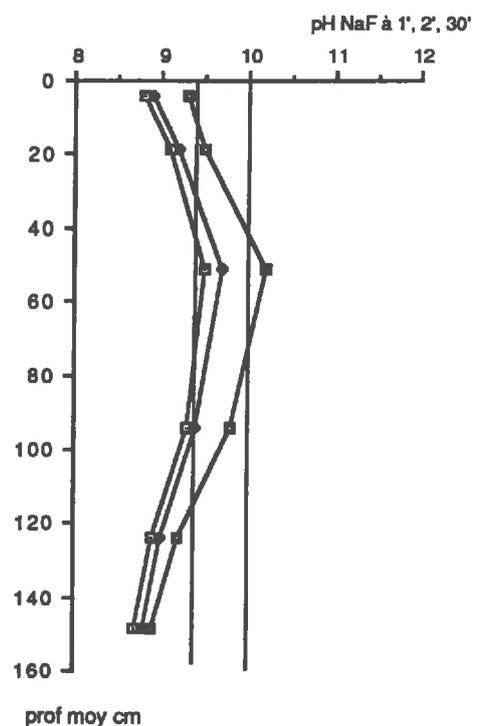
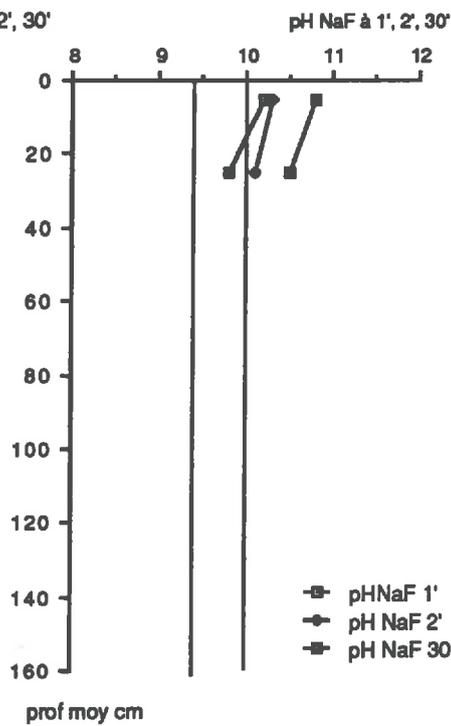
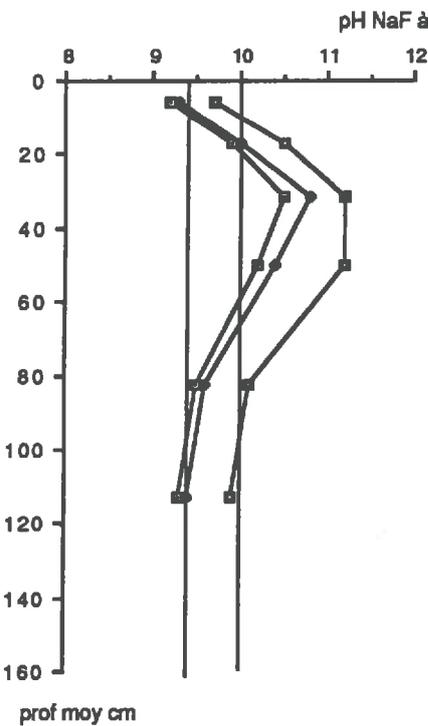


Fig. IV.19.: Evolution verticale des valeurs de pH NaF : (a) à 2 mn avec en superposition les profils verticaux pour l'andosol, le ranker andique et le sol brun acide.; (b) Evolution verticale des valeurs de pH NaF à 1 mn, 2 mn et 30 mn pour les horizons de l'andosol (1), du ranker andique (2) et du sol brun acide (3)

La meilleure corrélation entre la valeur  $pH_{NaF}$  et les "constituants" du sol apparaît avec la quantité d'Aluminium amorphe, extrait à l'oxalate ( $Al_0$ ) (Fig. IV.20) : ce sont les volumes à plus forte quantité d'Al amorphe qui présentent les maxima des valeurs  $pH_{NaF}$ .

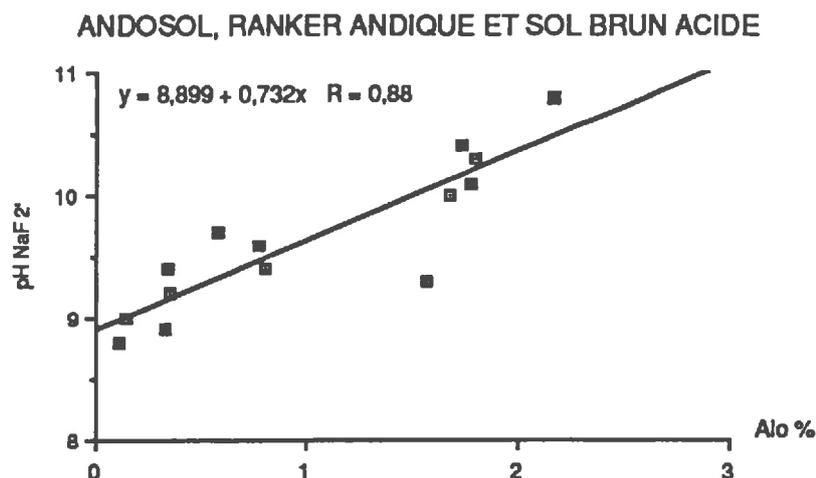


Fig.IV.20: Corrélation entre  $pH_{NaF}$  et Al extrait à l'oxalate.

### 3.4. Capacité de rétention du phosphore (méthode Blackmore)

La capacité de rétention du phosphore (méthode Blackmore<sup>1</sup>) est une des valeurs-test de la classification des andosols dans la R.P.F.(1990). La capacité de rétention du phosphore donne aussi une idée de la capacité d'échange anionique des sols. Les résultats sont exprimés en % de phosphore retenu par rapport au phosphore ajouté (Fig. IV.21).

Dans les sols andiques, la capacité de rétention du phosphore est très élevée : 90 à 97,5% dans les volumes supérieurs sur les 60 premiers centimètres, ce qui correspond à 1 à 1,1 g de  $P_2O_5$  retenu pour 100g de sol; elle est encore de 80 % dans les volumes profonds.

Dans le sol brun acide, la capacité de rétention du phosphore est nettement moins élevée quel que soit le volume considéré : 30 % à 62 %, le maximum se situant dans les volumes médians.

#### Discussion

La capacité de rétention du phosphore est bien corrélée avec la quantité d'Al amorphe ( $Al_0$ ) (Fig.IV.22). Ceci est surtout vrai pour les plus faibles valeurs de rétention du phosphore (80 % max.) et les plus faibles quantités d'Al amorphe (1 % max.) : cas des volumes profonds du sol andique et de l'ensemble des volumes du sol brun acide. Ce même phénomène a été noté pour des andosols d'Espagne décrits par Garcia-Rodeja et al (1987).

Au delà d'une certaine valeur, tout se passe comme si la quantité d'Al "amorphe" n'influçait plus la rétention du phosphore. D'autres facteurs doivent alors intervenir.

Le critère "allophanique" : capacité de rétention du phosphore > 85 %, proposé par le R.P.F.(1990), est largement respecté pour l'andosol et le ranker andique. Il n'est observé pour aucun des volumes du sol brun acide.

<sup>1</sup>Les échantillons de sol conservés humides sont mis en contact avec une solution d'acétate de sodium contenant du phosphore monopotasique  $KH_2PO_4$ , ajustée à  $pH_{4,55-4,6}$ . Après 24 h d'agitation, on dose le phosphore encore présent en solution et on peut déterminer le pourcentage de phosphore retenu par le sol par rapport à la quantité de phosphore ajoutée en solution ("capacité de rétention du phosphore").

ANDOSOL, RANKER ANDIQUE ET SOL BRUN ACIDE

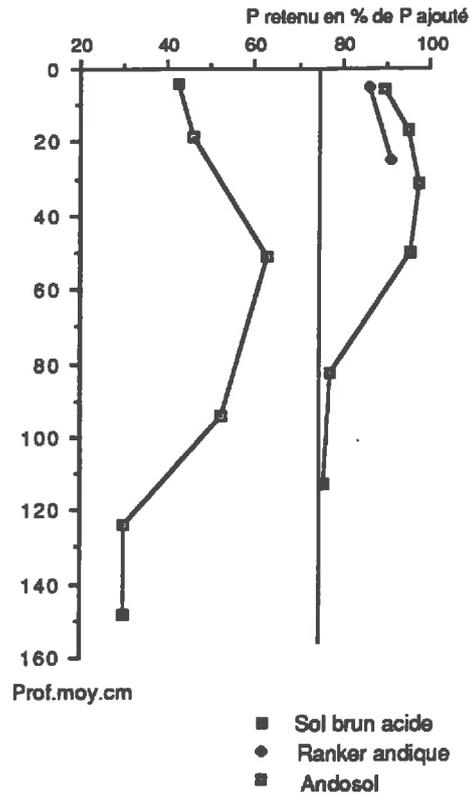
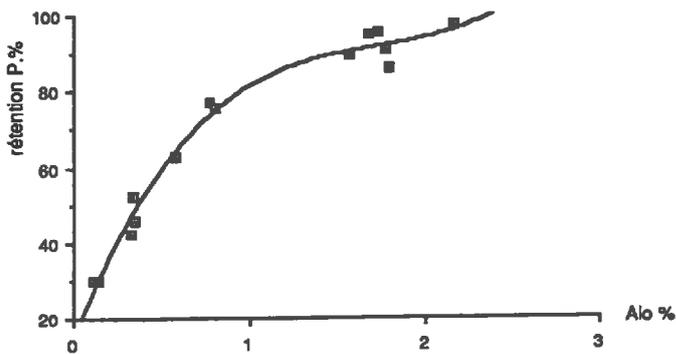


Fig. IV.21. : Capacité de rétention du phosphore (méthode Blackmore) : profils verticaux pour l'andosol, le ranker andique et le sol brun acide.

a : ANDOSOL, RANKER ANDIQUE ET SOL BRUN ACIDE



b : Horizons profonds AN5 et AN6 de l'ANDOSOL et tous les horizons du SOL BRUN ACIDE

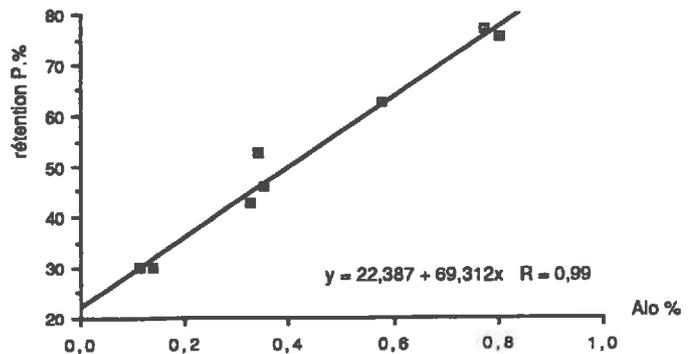


Fig. IV.22.: relation entre rétention du phosphore et Al extrait à l'oxalate.

### 3.5. Mesures physiques

#### 3.5.1 Densité de solide

La densité de solide a été mesurée au pycnomètre à eau haute précision, sur sol sec tamisé à 2 mm et broyé à 200  $\mu\text{m}$  (Fig.IV.23).

Dans les sols andiques, la densité de solide des volumes étudiés s'échelonne de 2,3 à 3. Les valeurs minimales correspondent aux horizons superficiels, les plus riches en humus et en débris organiques. Dans l'andosol, la densité de solide augmente rapidement vers la profondeur : de 2,3 en surface, elle passe à 2,8 dans le volume sous-jacent et atteint 2,96 en AN4 et AN5; ces valeurs élevées manifestent de fortes teneurs en fer, en accord avec les analyses totales.

Dans le sol Brun Acide, la densité de solide augmente rapidement de 2,35 à 2,6 depuis la surface à l'horizon médian BA3, en même temps que diminue le taux de matière organique. Elle se stabilise en profondeur autour de 2,6 à 2,65, valeur proche de la densité du quartz

#### 3.5.2. Densité apparente et proportions relatives des volumes de solide, d'eau et d'air mesurés au champ sur chaque horizon

La densité apparente "D.A.Hz" a été mesurée sur le terrain au densitomètre à membrane, sur plan horizontal pour chaque horizon étudié, sur des volumes de 300  $\text{cm}^3$  en moyenne; les teneurs en eau ont été mesurées au retour au laboratoire (Fig IV.24 et IV.25). C'est simplement pour se caler par rapport aux classifications que les résultats obtenus sont ici évoqués. Ils seront commentés plus précisément en combinaison avec d'autres données dans le chapitre VII.

La R.P.F. (1990) propose le "critère allophanique" : densité apparente  $\leq 0,9$  (sur sol naturel ressuyé à  $P = 1/3$  bar); la Soil Taxonomy considère pour critère des andepts : densité apparente  $< 0,85 \text{ g.cm}^{-3}$  (sur terre tamisée à 2 mm).

Dans l'andosol, la densité apparente sur terre fine est très faible : de 0,4 seulement dans l'horizon superficiel riche en matière organique et à fort chevelu racinaire, elle augmente progressivement jusqu'à 0,8 dans le volume AN4 à 60 cm de profondeur. Les horizons profonds présentent des valeurs plus élevées, quoique encore proches de 1 (D.A.Hz  $\approx 1,1$ ).

Dans le ranker andique, la densité apparente est aussi très faible : D.A.Hz de 0,6. La valeur un peu plus élevée par rapport à l'horizon superficiel de l'andosol, est due à une moindre macroporosité dans les horizons de rankers situés sous prairies.

Les valeurs de densité apparente mesurées ici dans les horizons supérieurs sont inférieures à celles signalées aux mêmes profondeurs pour les andosols de l'Escandorgue (Bonfils et Moinereau, 1971); elles sont du même ordre que celles citées par Quantin (1972) : 0,7 à 0,9 dans des sols ferrallitiques formés sur roches volcaniques.

La faible densité apparente des horizons supérieurs andiques reflète une forte porosité. Les matériaux andiques se distinguent nettement par un faible à très faible volume de solide et un fort volume de pores dans lesquels les proportions d'air et d'eau peuvent varier fortement. Ceci est bien illustré par la figure IV.25 où les résultats sont exprimés par rapport à une constante : le volume de solide  $V_s$ .

Dans le sol Brun Acide, la densité apparente est plus élevée : elle varie de 0,8 à 1,2; les valeurs les plus faibles sont observées dans l'horizon superficiel et l'horizon médian microagrégé. L'horizon de subsurface est en revanche légèrement tassé. Les pourcentages relatifs des volumes de solide, eau et air sont totalement différents de ceux des sols andiques (Fig. IV.25), le volume de pores est beaucoup plus réduit.

Notons une bonne corrélation entre les teneurs en eau pondérale et les valeurs de densité apparente (Fig. IV.26) pour les 14 horizons étudiés.

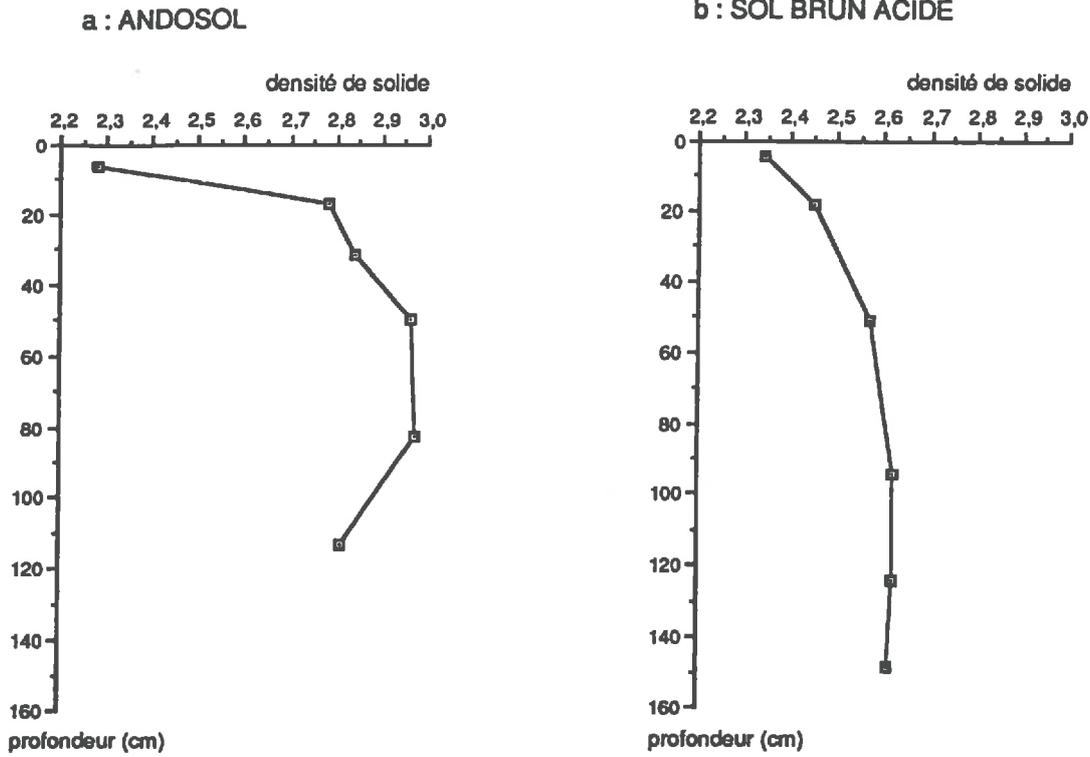


Fig. IV.23.: Evolution verticale de la densité de solide dans l'Andosol (a) et le Sol brun acide (b).

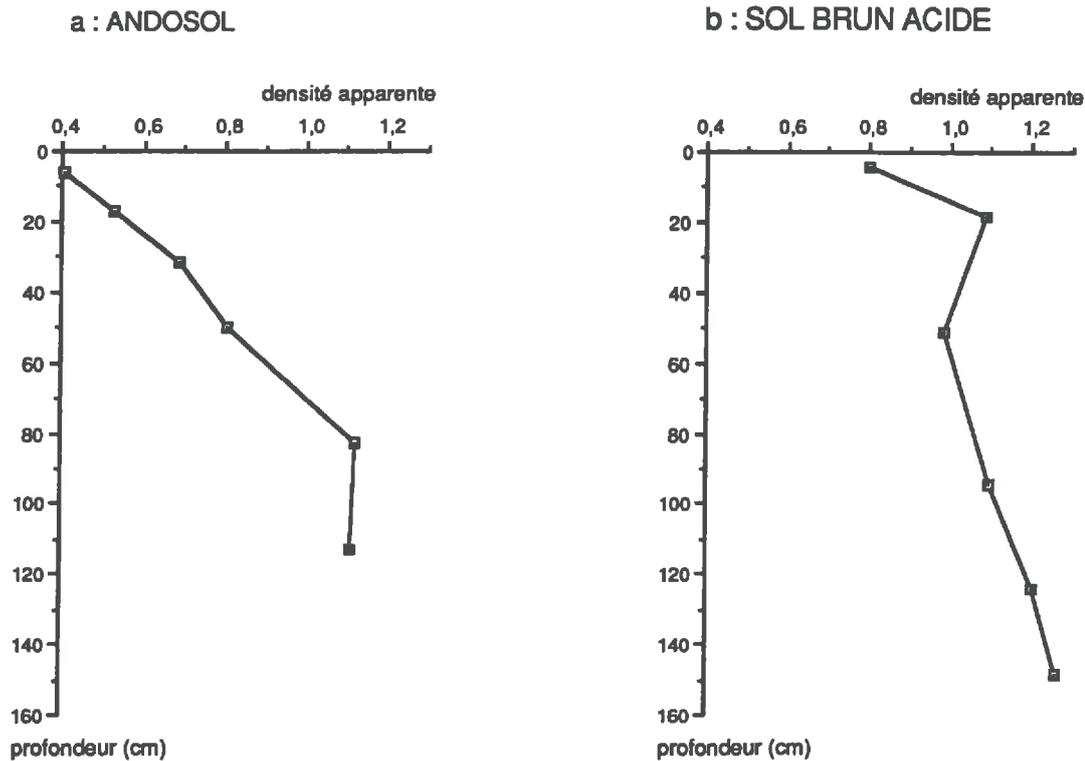


Fig. IV.24.: Evolution verticale de la densité apparente dans l'Andosol (a) et le sol Brun Acide (b)

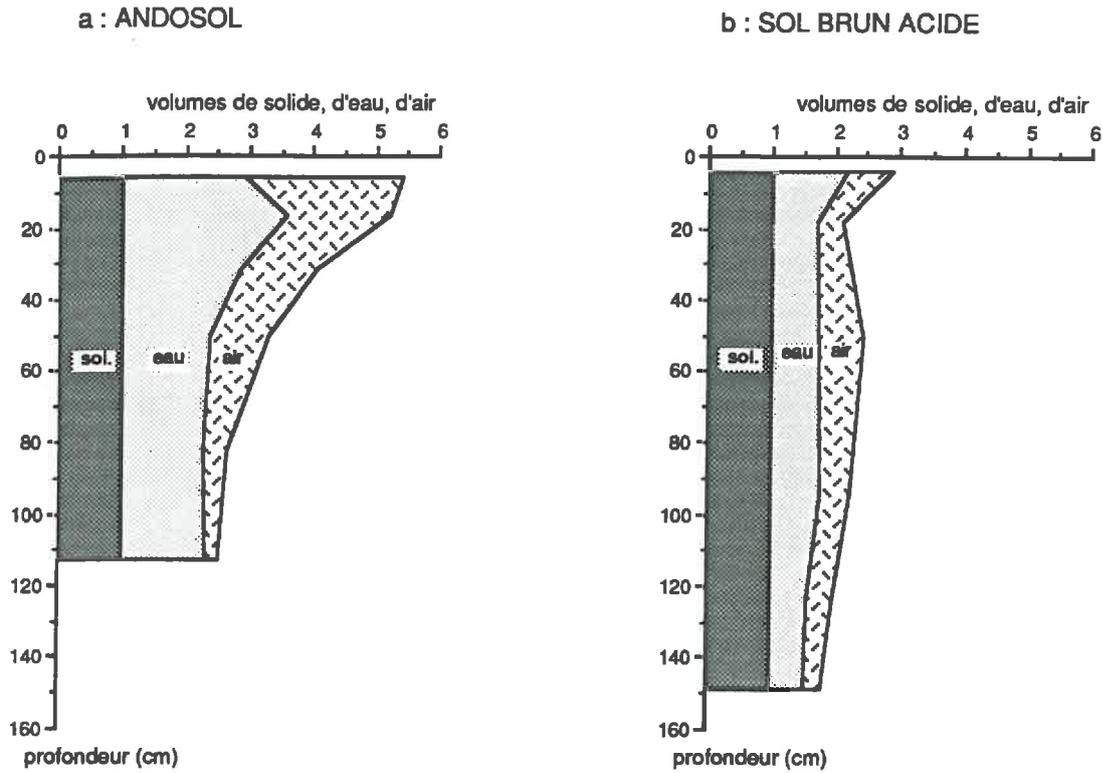


Fig.IV.25: Evolution verticale des proportions relatives des volumes de solide, d'eau et d'air rapportés au volume de solide, au moment des prélèvements au champ pour l'andosol (a) et le sol brun acide (b) - mesures au densitomètre à membrane sur des volumes de 300 cm<sup>3</sup> en moyenne.

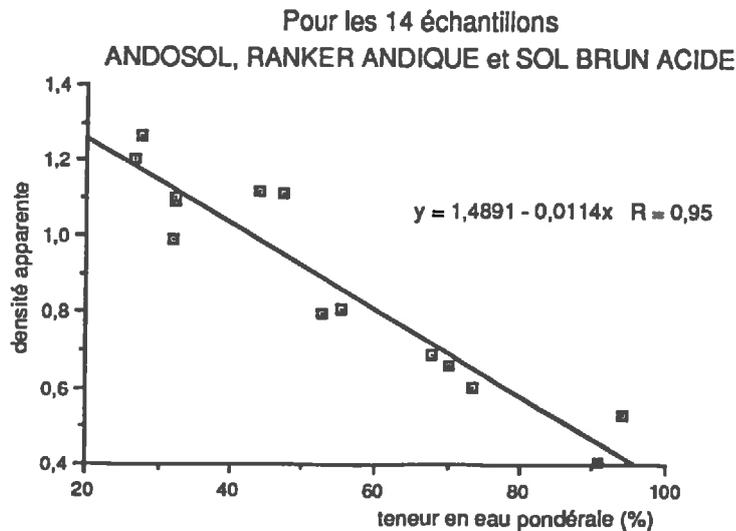


Fig. IV.26.: Corrélation entre la densité apparente et la teneur en eau mesurées au champ (densitomètre à membrane) pour les 14 échantillons étudiés.

## 4. Synthèse et conclusion

### *Andosol et Ranker andique*

"L'andosol Montarquié" comme le "ranker andique" sont caractérisés par l'existence de propriétés dites "andiques" dans la majeure partie du sol. Ils présentent des propriétés physicochimiques particulières et caractéristiques :  $pH_{NaF} > 9,4$ , forte capacité de rétention du phosphore, forte variation de la CEC en fonction du pH,  $\Delta pH(eau-KCl) < 1$ . Ces différentes propriétés ont souvent été attribuées aux "allophanes", elles sont en fait plus reliées à la présence d'Al amorphe.

La granulométrie est à dominance d'argile et limons fins sur le sol conservé humide et elle évolue vers une texture plus sableuse au séchage. Ces sols apparaissent très riches en matière organique sur une profondeur importante. Les dissolutions sélectives et la diffraction des R.X. ont montré que la fraction fine est mal cristallisée, composée de produits amorphes (extraits à l'oxalate) qui sont essentiellement sous forme de complexes Al-Fe humus stables et peu mobiles dans la majeure partie du sol. Ces produits amorphes sont moins abondants dans les horizons profonds. La part des allophanes est très faible. Les phyllosilicates sont présents essentiellement sous forme de minéraux 1/1 de type halloysite à 10 Å dans les horizons profonds, de métahalloysite dans les horizons supérieurs de l'andosol, et de kaolinite désordonnée dans le ranker andique.

Par ailleurs, l'"andosol Montarquié" se caractérise par un pH acide ( $< 5$ ), une faible quantité de bases échangeables et un fort rapport Al/S+Al (jusqu'à 0,9). Ces propriétés comme la faible quantité d'allophanes et la présence dominante de complexes organiques semblent être des caractéristiques classiques pour les sols andiques des milieux tempérés froids et humides (Flach et al, 1980; Moinereau, 1977) par opposition aux andosols le plus souvent décrits en milieux tropicaux. Elles leur confèrent une tendance cryptopodzolique; le processus dominant est l'acido-complexolyse.

Dans la R.P.F.(1990), ce sol peut être qualifié d'"Andisol non-allophanique" à horizon Aal aluminique, ou "Alu-Andisol humique". Il correspond à un andosol désaturé à tendance cryptopodzolique selon la C.P.C.S. (1967).

Du point de vue constituants, *le ranker andique* se distingue simplement des horizons supérieurs de l'andosol, par la présence de minéraux 1/1 mieux cristallisés : kaolinite 1/1 et la moins grande richesse en fer. Par ailleurs, contrairement à l'andosol, il présente un pH moins acide, est peu désaturé en bases échangeables. Ces derniers caractères, sont considérés comme des indices de désandosolisation par Moinereau (1977), et seraient plus caractéristiques des sols bruns andiques selon ce même auteur.

### *Le sol Brun Acide*

La granulométrie est grossière mais cependant bien pourvue en argiles. Les constituants argileux sont nettement cristallisés constitués essentiellement de kaolinite, d'argiles micacés et de phyllosilicates à 14 Å (vermiculites, vermiculites hydroxy-alumineuses et intergrades gonflants-smectites de la profondeur vers la surface). La fraction grossière est dominée par les sables quartzeux. La teneur en matière organique, la teneur en éléments "amorphes" sont beaucoup plus faibles que dans les sols andiques. En valeur relative, c'est essentiellement la faible part d'Aluminium amorphe rapporté à l'élément total qui distingue ce sol de l'andosol.

Par ailleurs, on note les caractéristiques classiques : pH acide, taux Al/Al+S  $\geq 0,5$  (excepté dans les horizons superficiels) des sols qualifiés de sols bruns acides. Ce sol correspond aux Alocrisols de la R.P.F. (1990).

### *Convergence de caractères*

Les 2 types de sol présentent un pH acide, un complexe d'échange caractérisé par de forts rapports Al/Al+S. Certaines propriétés dites andiques sont aussi observées dans le sol brun acide : le fort taux de variation de la capacité d'échange cationique sur l'ensemble du sol, le  $pH_{NaF} \geq 9,4$  dans les horizons intermédiaires.

Dans l'évolution verticale de chacun de ces sols, ce sont les horizons microagrégés AN3 et BA3 qui présentent : le plus fort taux de variation de la CEC, les valeurs  $pH_{NaF}$  les plus élevées, la plus forte rétention du phosphore, ces différentes propriétés étant à mettre en relation avec la plus forte quantité d'Al amorphe. Ces caractères restent beaucoup plus accentués dans l'andosol que dans le sol brun acide.

### *En Conclusion*

Ce chapitre était nécessaire pour connaître le milieu physico-chimique ambiant des sols étudiés et caler ces sols par rapport à la bibliographie et aux classifications. Pour la suite de ce travail, on retiendra essentiellement la caractérisation des constituants et certaines propriétés qui en résultent (CEC notamment). Ces caractères interviennent sur l'organisation des sols et le comportement physico-hydrique qui feront l'objet des 2 chapitres suivants.



## Chapitre V

# Analyse microscopique

### Introduction

Pour connaître la structure d'un matériau, il est intéressant d'aborder simultanément l'étude de l'arrangement des particules qui le constituent et celle de l'espace poral qui en résulte. L'étude de l'organisation des volumes pédologiques menée ici principalement par microscopie optique et plus ponctuellement par microscopie électronique permet de décrire l'arrangement des particules, de reconnaître et caractériser qualitativement les niveaux d'organisation présents : agrégats, types d'assemblage et porosité associée (géométrie, forme...).

Cette analyse sera menée plus particulièrement pour les horizons microagrégés; l'analyse plus succincte des horizons sus-et sous-jacents permettra d'appréhender les évolutions verticales de ces caractères au sein de chaque type de sol.

La comparaison de l'organisation de l'horizon le plus microagrégé de l'andosol (AN3) et du sol brun acide (BA3) permettra d'analyser les convergences et les divergences des microstructures de ces volumes pédologiques.

Ces différentes observations couplées à la quantification du spectre poral par porosimétrie à mercure pourront servir de base à l'interprétation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau.

Au cours de cette partie, après une brève description des méthodes et techniques utilisées, nous présenterons successivement l'étude micromorphologique des sols andiques puis du sol brun acide.

### 1. Méthodes et techniques utilisées - Echantillonnage

Cette étude a été menée sur des échantillons déshydratés, par l'observation de lames minces au microscope optique, à des grossissements de 1 à 125; quelques observations sur mottes centimétriques au microscope électronique à balayage permettront de compléter cette description pour des grossissements de 26 à 3000.

#### *Echantillonnage*

Les 14 volumes pédologiques (AN1 à AN6, K1, K2; BA1 à BA6) identifiés lors de l'approche macromorphologique ont fait l'objet de ces descriptions micromorphologiques.

Les prélèvements des échantillons nécessaires à la fabrication des lames ont été effectués soit sur plan horizontal, soit sur plan vertical (transitions entre volumes notamment). De grandes lames minces (160 x 90 mm) issues des blocs imprégnés sont confectionnées pour les observations à la loupe et en microscopie optique.

#### *Déshydratation*

L'imprégnation des échantillons nécessite que l'échantillon soit préalablement déshydraté. Deux méthodes ont été utilisées pour cette déshydratation : la technique de séchage à l'air et la technique

d'échange eau - acétone.

° La première consiste à amener l'échantillon à l'équilibre avec une humidité relative proche de 50 %, valeur qui est généralement atteinte lors d'un séchage à l'air libre des échantillons au laboratoire, suivi d'un passage à l'étuve à 40 °C.

° La seconde nécessite que l'eau contenue dans l'échantillon soit tout d'abord remplacée par un liquide miscible avec l'eau et avec la résine d'imprégnation : l'acétone. Au laboratoire de Rennes, l'échange est fait en phase liquide. Dans un premier temps, l'échantillon est saturé par capillarité avec de l'acétone pure. Cette opération est effectuée sous une dépression de 50 cm de mercure afin d'éviter l'éclatement de bulles d'air piégées. Puis, après 48 heures, l'échantillon est directement placé dans un bain d'acétone renouvelé périodiquement jusqu'à élimination complète de la phase aqueuse (durée d'environ 1 à 2 mois).

Par rapport à la dessiccation à l'air ou à la lyophilisation, cette méthode d'élimination de l'eau par l'acétone réalisée avant l'imprégnation de résine, minimise considérablement le retrait macroscopique des échantillons (Bourlet et Fies, 1981); elle permet aussi une meilleure imprégnation par la résine en maintenant la continuité du réseau poral et favorise ainsi l'obtention de lames minces de meilleure qualité (Murphy, 1982). Il paraît ainsi possible de corrélérer les observations des lames minces avec les données physiques obtenues sur matériaux non perturbés. Micromorphologiquement, nous obtenons une meilleure compréhension des organisations plasmiques.

La plupart des observations présentées ici ont été faites sur échantillon déshydraté par échange - eau acétone. L'influence de la technique de déshydratation sur l'organisation des échantillons pourra être appréciée d'après l'observation de quelques lames minces d'échantillons séchés à l'air.

### *Imprégnation*

Après déshydratation, les échantillons décimétriques orientés, sont imprégnés par une résine d'inclusion polyester (résine Crystic polyester) additionnée d'un pigment fluorescent (Murphy et al., 1977); ce pigment excité par des rayons ultra-violettes facilite l'analyse des structures : il permet d'une part de distinguer les vides des constituants solides incolores au microscope polarisant, et d'autre part d'observer directement la porosité sur les blocs ainsi imprégnés au stéréomicroscope.

### *Description*

La terminologie employée pour la description des lames est celle proposée par Bullock et al., (1985) traduite en partie par Stoops (1986). Les estimations de surface pour chacune des phases identifiées sont effectuées à l'oeil sur l'ensemble de la lame et/ou du bloc. Seuls les objets dont la taille minimale est supérieure à 20 µm sont comptabilisés en microscopie optique.

### *Microscopie électronique à balayage*

Seuls les volumes microagrégés AN3 et BA3 ont fait l'objet de quelques observations au microscope électronique à balayage (au S.E.S.C.P.F., centre INRA d'Orléans), ceci à des grossissements de x 26 à x 3000. Les échantillons de taille centimétrique (petites mottes de 1 cm<sup>3</sup>) sont déshydratés par séchage à l'air puis à l'étuve à 105 °C, puis dégazés sous vide avant d'être métallisés.

## **2. L'organisation pour les horizons de l'andosol**

### **2.1. L'horizon microagrégé AN3**

C'est dans ce volume intermédiaire AN3 que la microagrégation est la plus développée dans l'andosol (Fig.III.7). Plusieurs grands types d'unités structurales de base dits "agrégats élémentaires" ont été reconnus. L'arrangement relatif de ces unités et la porosité associée déterminent des niveaux d'organisation supérieurs ou "types d'assemblage".

#### **Caractérisation générale**

Ce volume AN3 présente une structure dominante microagrégée plus ou moins lâche. La porosité globale est forte, de l'ordre de 50 à 60 % : elle comprend une porosité grossière biologique sous forme de cavités et chenaux racinaires fins millimétriques (estimée à 5 à 10 %) mais surtout une forte porosité liée aux assemblages des microagrégats.

Selon les types d'agrégats élémentaires qui seront distingués et leur mode d'assemblage, les traits généraux de la granomasse et de la micromasse varient peu. Le rapport G/F est estimé à 5/95<sub>10µm</sub>.

La fraction grossière, très peu abondante, comporte quelques éléments organiques (20 %) sous forme de racines; mais elle est surtout composée d'éléments minéraux (85 %) de la taille des limons grossiers et sables fins : oxydes opaques de forme variée (55 %) qui correspondent souvent à des pseudomorphoses d'autres minéraux, pyroxènes (15 %) qui ont perdu leur teinte de biréfringence, olivines (15%) plus ou moins envahies d'oxydes, rares oxydes de couleur rouge en L.N. et L.P. (probablement hématite) (< 10 %), et rares sables et graviers de basalte et tuf scoriacé peu altérés (5 à 10 %). Dans cette fraction grossière, les éléments minéraux comme les éléments organiques présentent une distribution relative aléatoire.

La fraction fine, constituée d'argile et limons fins, de nature organominérale, présente en L.N. une couleur brun à brun rouille, d'aspect nuageux, avec des halos plus sombres de matière organique de 50 à 100 µm de diamètre; elle est isotrope en L.P. ponctuée par de rares (< 5%) particules biréfringentes. D'après l'analyse des constituants (chap.IV), elle est essentiellement constituée de metahalloysite à 7 Å et de formes "amorphes ou mal cristallisées" du fer et de l'aluminium (complexes organiques essentiellement).

La distribution relative G/F est de type open-porphyrrique.

Les traits pédologiques, hormis les figures d'origine biologique de type "pellets", sont très rares (< 1%) sous forme des traits amorphes et cryptocristallins (papules), de forme ovoïde, inférieurs à 100 µm, orangé-pâles, hyalins à légèrement poussiéreux en L.N., fendillés, isotropes en L.P, distribués au hasard soit dans la masse basale, soit dans la porosité.

### 2.1.1 Les agrégats élémentaires

Deux grands types principaux d'unités structurales élémentaires ont été distingués :

1. Les microagrégats qui sont les unités les plus fréquentes (90-95% des agrégats);
2. Des unités plus sombres, plus denses et plus grossières : le micropolyèdre dense et le "pellet", peu nombreuses (< 10% des agrégats).

#### 2.1.1.1. Le microagrégat.

C'est une unité de forme subarrondie, à limites lisses à faiblement rugueuses (obj 10), de 30 à 70 µm de diamètre (40 µm en moyenne), brun à brun-rouille en L.N., isotrope en L.P.(Pl. III, photo 4).

La porosité interne n'est pas décelable au microscope optique, mais l'aspect "spongieux" de la masse basale du microagrégat suggère sa présence en quantité notable.

#### 2.1.1.2. Le "micropolyèdre " et/ou "pellet"

Ce sont des unités plus grossières, plus sombres et plus denses que le microagrégat .

##### Le Pellet

C'est une unité de forme ovoïde, à parois lisses, de 500 µm.de long sur 200 à 300 µm de large en moyenne, de couleur brun sombre en L.N., dense, à très faible porosité interne sous forme de cavités circulaires à ovoïdes de 23 à 34 µm de large (Pl.III, photo 1).

Peu abondantes (< 10 % des agrégats), ces unités sont essentiellement présentes dans les pores biologiques où elles constituent un assemblage composé exclusivement de pellets; elles peuvent aussi être dispersées au sein des assemblages lâches de microagrégats.

##### Le micro-polyèdre dense

C'est une unité de forme polyédrique subanguleuse, à contours très émoussés, faiblement mamelonnée, de 150 à 4000 µm de long (le plus souvent 200 à 500 µm), de couleur brun à brun-rouille foncé, un peu plus sombre que les microagrégats, apparemment plus dense, à porosité interne plus faible que les microagrégats (Pl. III, photo 3).

Peu abondantes (< 10 % des microagrégats), ces unités apparaissent dispersées au sein des assemblages lâches de microagrégats.

Le microagrégat d'une part et les micro-polyèdres denses et/ou pellet d'autre part ne présentent pas de transition de l'un à l'autre et ne semblent donc pas dériver les uns des autres.

## **Planche II**

Photographies au microscope optique, sous éclairage en lumière bleue

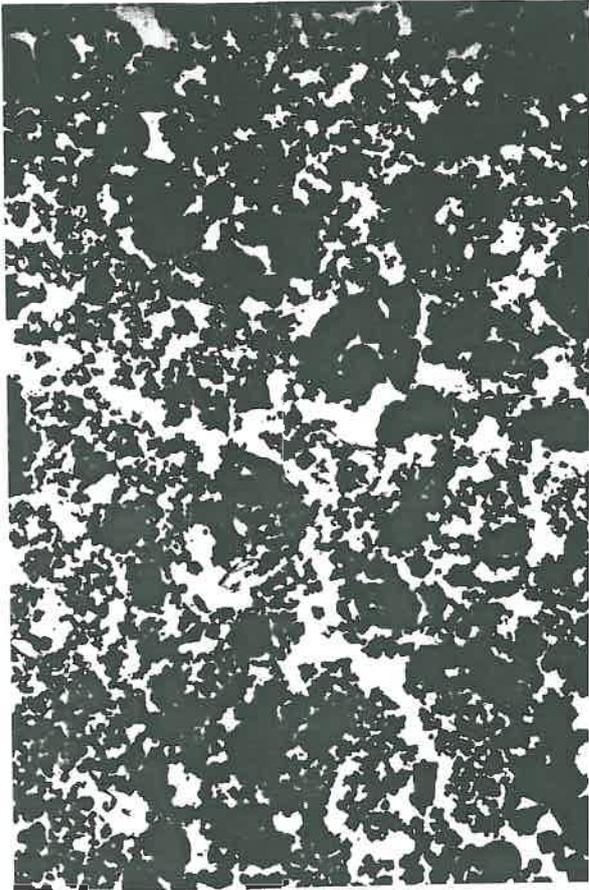
### **Horizon microagrégé AN3 de l'andosol**

Photo 1 - Assemblage de microagrégats de type A1

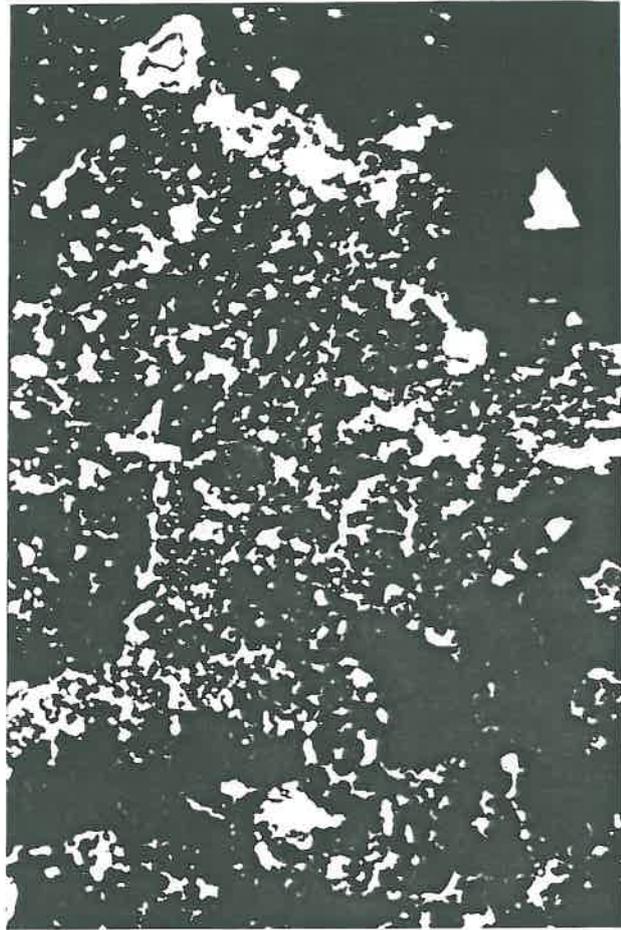
Photo 2 - Assemblage de microagrégats de type A2

Photo 3 - Assemblage de microagrégats de type A3

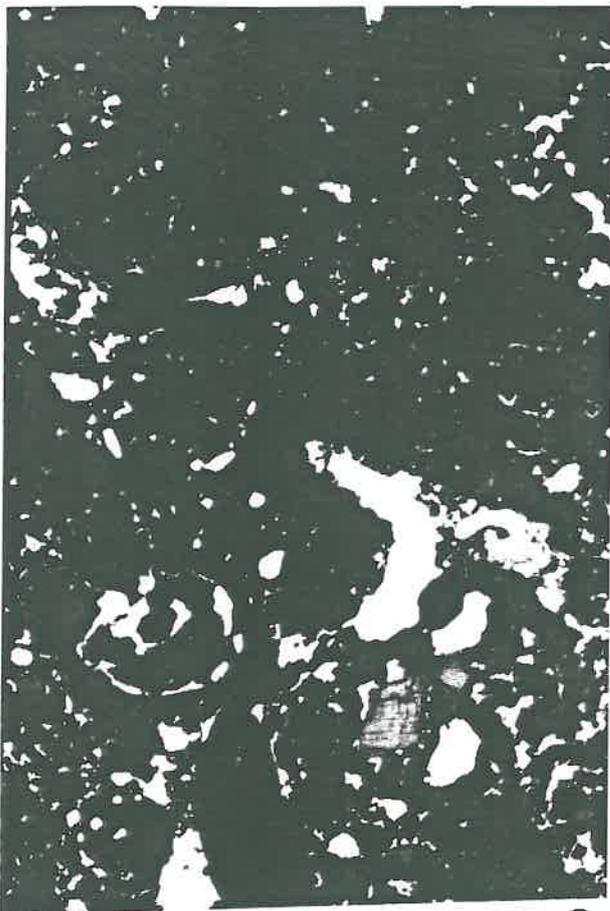
Photo 4 - Assemblage de pellets dans cavités : type A4



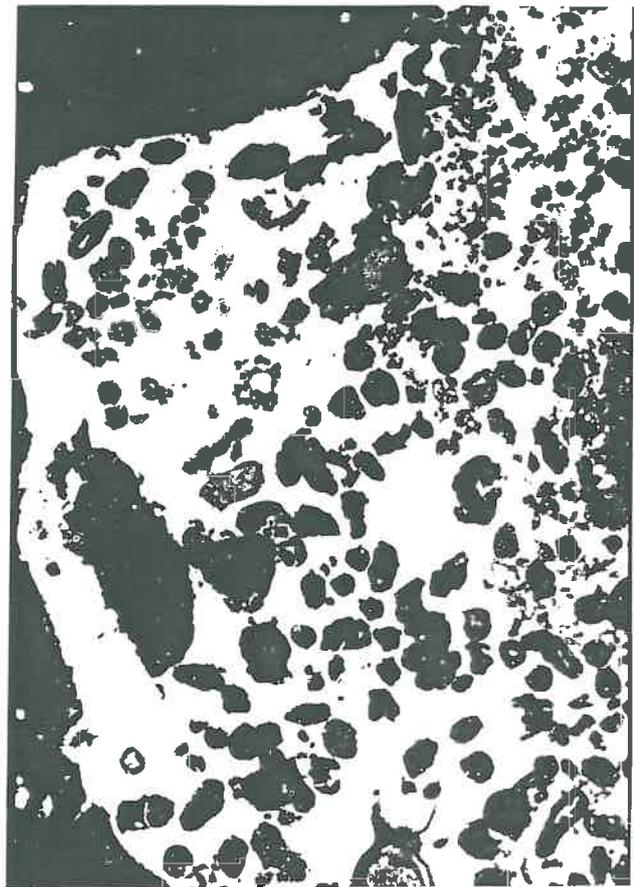
①



②



③



④

0 780 μ

## Planche III

Photographies au microscope optique, sous éclairage en lumière bleue

### Horizon microagrégé AN3 de l'andosol

Photo 1 - Pellets dans cavité biologique

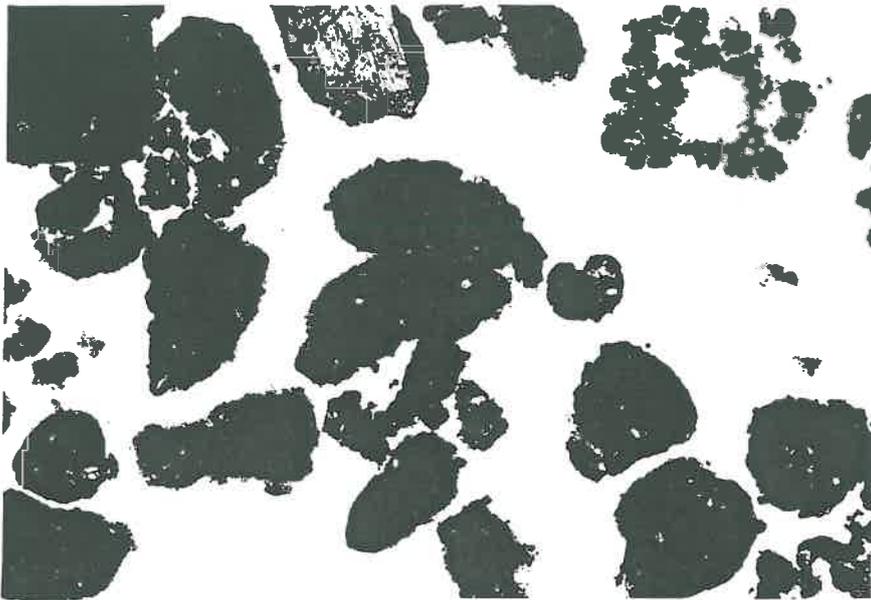
Photo 2 - Grappes de microagrégats ménageant entre elles une porosité importante inter-grappes  
Pores inter-agrégats fins (intra-grappes)

Photo 3 - Grappes de microagrégats ménageant entre elles une porosité importante inter-grappes  
Pores inter-agrégats fins (intra-grappes)

Photo 4 - Microagrégats rarement individualisés, en grappes

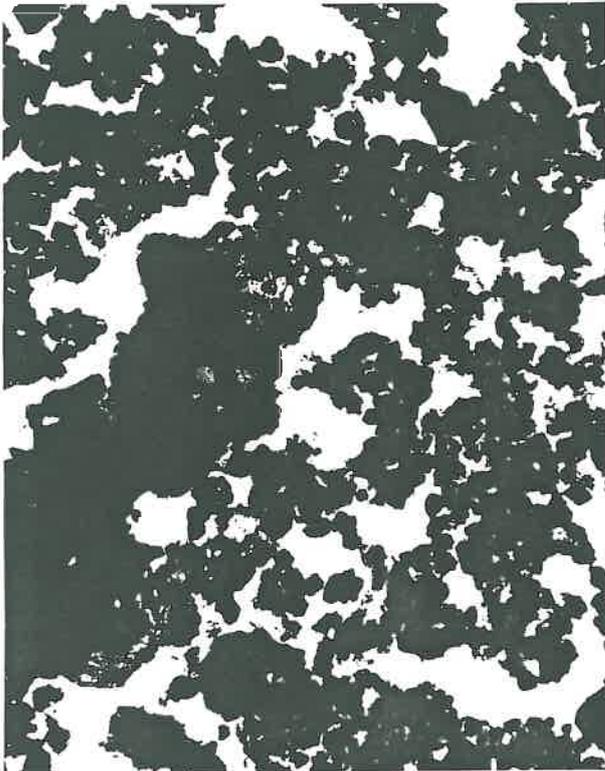
# Planche III

Chapitre V : Analyse Microscopique



0 | 230 μ

①



0 | 230 μ

②



0 | 230 μ

③



0 | 230 μ

④

## **Planche IV**

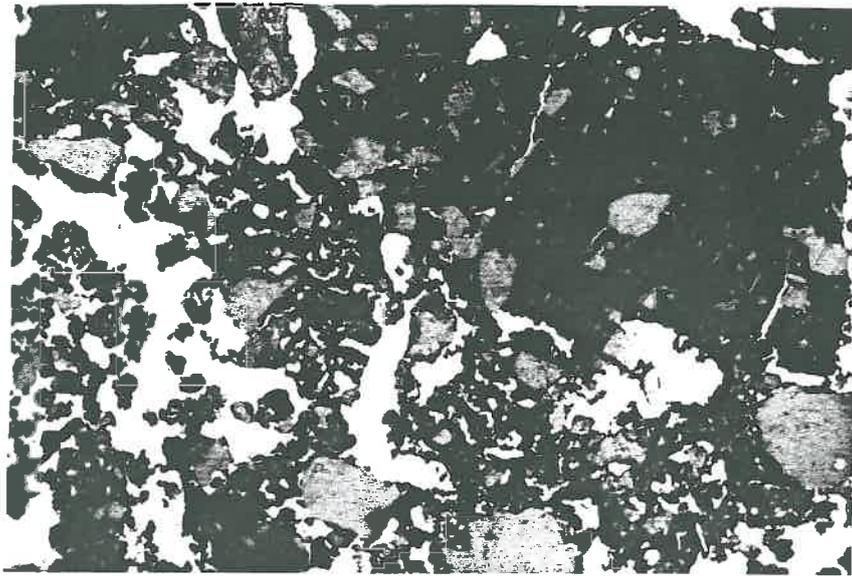
Photographies au microscope optique, sous éclairage en lumière bleue

### **Horizon microagrégé BA3 du sol brun acide**

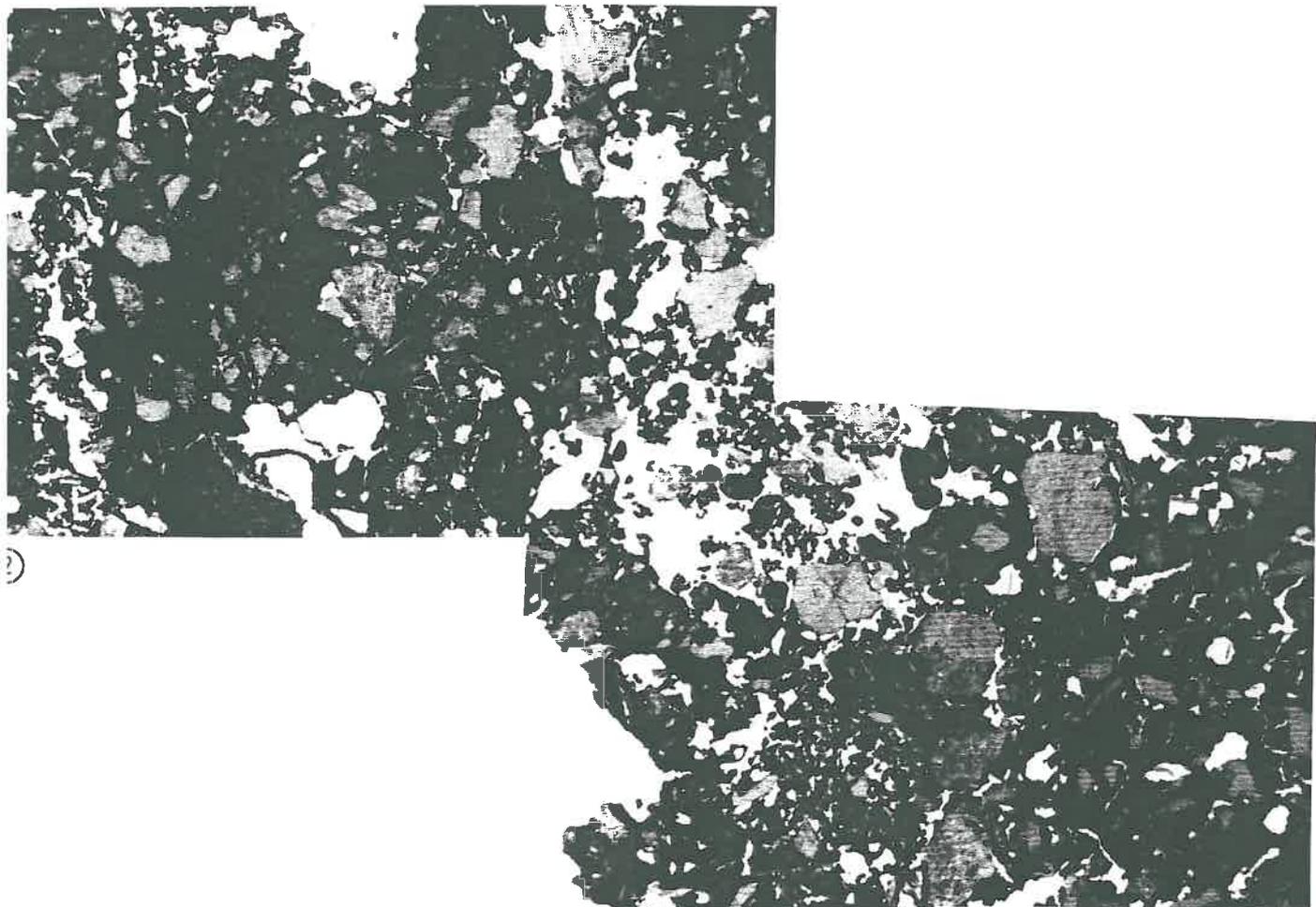
Photo 1 - Structure composée d'une association intime de domaines poreux microagrégés plus ou moins dense (type B1 : microagrégats en arrangement lâche; type B2 : microagrégats en arrangement serré) et de domaines denses en polyèdres anguleux (type B3)

Photo 2 - Structure composé d'une association intime de domaines poreux microagrégés et de domaines denses.  
Noter le polyèdre subarrondi

Photo 3 - Structure composé d'une association intime de domaines poreux microagrégés et de domaines denses



①



②

③

0 780 μ

## **Planche V**

Photographies au microscope optique, sous éclairage en lumière bleue

### **Horizon microagrégé BA3 du sol brun acide**

Photo 1 - Assemblage de polyèdres denses anguleux. Fissures inter-agrégats (assemblage de type B3)

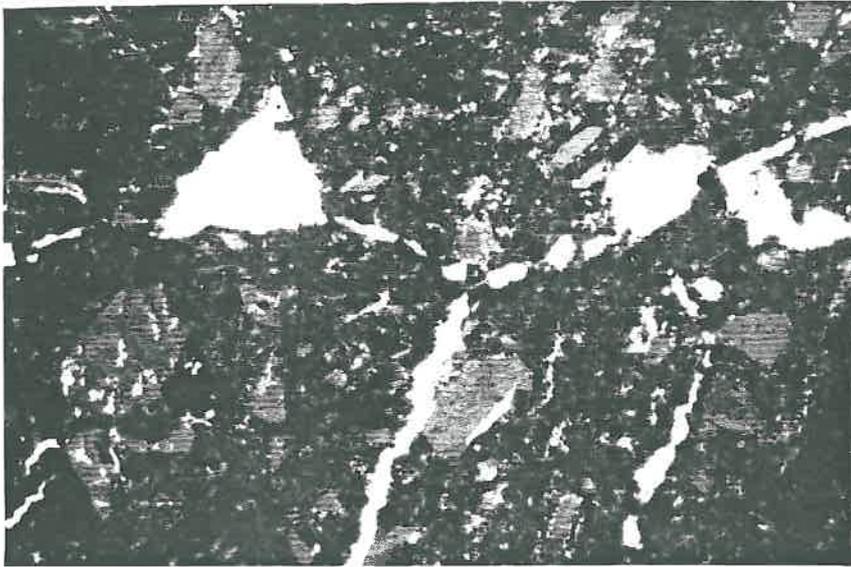
Photo 2 - Microagrégats en arrangement lâche (assemblage de type B1)

Photo 3 - Microagrégats en arrangement dense (assemblage de type B2)

Photo 4 - Microagrégats

# Planche V

Chapitre V : Analyse Microscopique



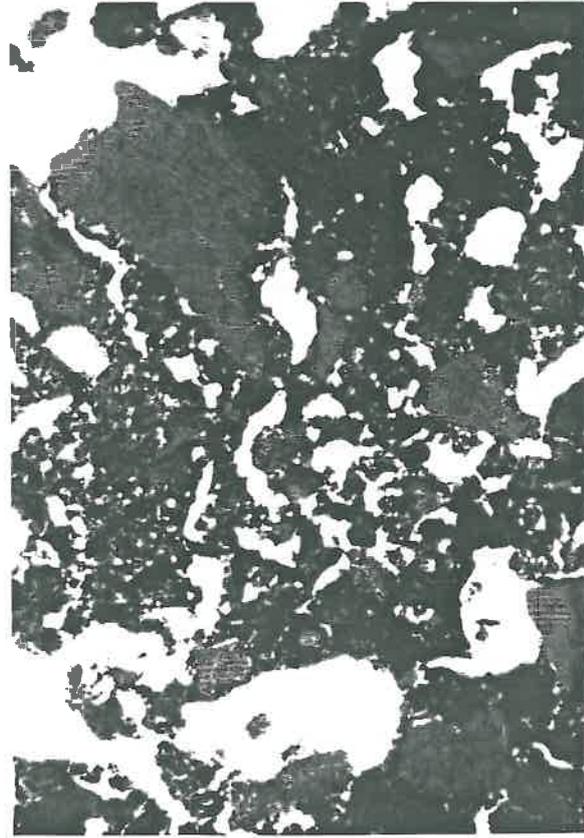
0 | 230  $\mu$

①



0 | 230  $\mu$

②



0 | 230  $\mu$

③



0 | 170  $\mu$

④

## 2.1.2 Les types d'assemblages des agrégats élémentaires

L'arrangement des agrégats élémentaires définit des niveaux d'organisation supérieurs ou "types d'assemblage" qui peuvent être composés d'un seul type ou de plusieurs types d'agrégats élémentaires. Quatre grands types d'assemblage sont distingués dont trois à base de microagrégats, un à base de pellets.

### 2.1.2.1 Assemblages de microagrégats : type A1, type A2 et type A3

Dans cet horizon AN3, les assemblages à base de microagrégats dominant (plus de 90 % de l'agrégation). Selon la distribution relative des microagrégats et les caractéristiques de la porosité associée, 3 types d'assemblage sont distingués; ils sont dénommés : type A1 , type A2, type A3 depuis l'assemblage le plus lâche à l'assemblage le plus "serré". Le passage d'un type d'assemblage à l'autre est progressif. Le type A2 est dominant dans cet horizon.

#### 1) Assemblage de type A1 : microagrégé en arrangement très lâche ( Pl. II, photo 1)

Cet assemblage constitue environ 20 % de l'agrégation.

Les *microagrégats* sont parfois isolés mais le plus souvent disposés en *grappes de taille et forme variable* à contours nettement mamelonnés, arrangées de manière lâche. Au sein des grappes, les microagrégats ménagent entre eux *une porosité polyconcave fine, de 15 à 50 µm de large* (Pl. III, photo 4).

Les grappes de microagrégats sont arrangées de manière lâche et ménagent entre elles *une importante porosité inter-grappes polyconcave, bien connectée, de 60 à 100 µm de large s'ouvrant souvent en cavités grossières de 100 à 300 µm de large* (Pl. III, photo 2). C'est cette large porosité qui caractérise l'assemblage de type A1.

De rares (< 5 %) micropolyèdres denses et/ou des pellets isolés peuvent être dispersés au sein de cet assemblage.

C'est un assemblage *très poreux* : la porosité est estimée à 60 % à 70 % de l'assemblage.

#### 2) Assemblage de type A2 : microagrégé en arrangement lâche (Pl. II, photo 2)

C'est l'assemblage le plus fréquent; il constitue environ 60 % de l'agrégation.

Les microagrégats ne sont jamais individualisés. Comparé à l'assemblage de type A1, les grappes de microagrégats conservent la même porosité interne, inter-microagrégats, polyconcave et fine, de 15 à 50 µm de large. Mais la porosité *inter-grappes* est réduite; toujours polyconcave, elle est plus allongée et plus fine : de 80 µm de large en moyenne, sur une longueur variable de 140 à 800 µm.

La *porosité globale* reste importante, estimée à 40 %. Cet assemblage a un aspect très poreux, spongieux.

#### 3) Assemblage de type A3 : microagrégé en arrangement dense et très dense

Cet assemblage constitue 15 à 20 % de l'agrégation

Les microagrégats sont en arrangement dense. La porosité inter-grappes n'apparaît plus et on observe essentiellement une porosité inter-microagrégat très fine, polyconcave, de 15 à 70 µm de large en moyenne (Pl. II, photo 3).

La *porosité globale* est estimée à 20 % de l'assemblage.

Une variante apparaît principalement *autour des éléments grossiers et des macropores biologiques* sous forme de zones denses composées de *polyèdres sub-anguleux très peu nets* de 500 à 5000 µm de large, mal *délimités par des chenaux ou des fissures* de 100 à 300 µm de large, à contours bien ajustés qui *s'élargissent localement en cavités*. Ces polyèdres présentent une porosité interne faible, très fine de 30 à 50 µm de large, de forme polyconcave, qui semble résulter de *l'assemblage très serré de microagrégats* dont ils constituent une sur-structure.

### 2.1.2.2 Assemblage de pellets : type A4

Cet assemblage essentiellement composé de pellets n'est présent que très localement (< 10% de

l'agrégation) dans les chenaux/cavités.

Il est caractérisé par un arrangement lâche de *pellets souvent individualisés*, qui ménagent entre eux une *large porosité polyconcave en cavité, très connectée, de 150 µm à 1000 µm (voire 4000 µm) de large*. La *porosité* de cet assemblage est très importante, estimée à 80 %. (Pl. II, photo 4).

### *Variation de l'organisation selon le mode de déshydratation*

Les agrégats élémentaires et les modes d'assemblage ont été ici décrits pour des échantillons déshydratés par échange eau-acétone, dont l'organisation à l'oeil et à la loupe semble proche de celle observée au champ.

Les organisations observées sur échantillon déshydraté par séchage à l'air présentent certaines différences :

- Les microagrégats tendent à être plus isolés et de plus petite taille;
- On note aussi la présence de pores fins (80 µm) plus "rectilignes" moins polyconcaves et moins composés qui tendent à délimiter des petits domaines millimétriques polyédriques peu nets.

## 2. 1. 3. Synthèse et Conclusion

Cet horizon AN3 présente donc une organisation dont l'unité élémentaire d'agrégation dominante est le microagrégat : unité sphérique de 40 µm de diamètre moyen (variant de 30 à 70 µm).

La "grappe" peut constituer un niveau d'organisation supérieur non généralisé. Très rarement, des polyèdres localisés autour des pores et éléments grossiers constituent une sur-structure des microagrégats.

La porosité liée aux assemblages de microagrégats peut être décomposée en différents niveaux :

1) une *porosité intra-microagrégats* de taille inférieure à 10 µm, difficilement individualisable à l'échelle du microscope optique.

2) une *porosité inter-microagrégats* : de 15 à 70 µm de large, polyconcave, toujours présente dans les assemblages de microagrégats; elle correspond à une porosité intra-grappes.

3) une *porosité inter-grappes* : polyconcave dont la taille et la forme varient selon les types d'assemblage; elle est large (100 à 300 µm), très interconnectée et s'ouvre en cavités dans le type A1; elle est de forme plus allongée et plus étroite (80 µm de large sur 140 à 800 µm de long) dans le type A2; elle n'est plus présente dans le type A3.

Rappelons que par ailleurs, existent aussi deux autres types de porosité : *une porosité grossière d'origine biologique* millimétrique et une porosité polyconcave grossière (150 à 1000 µm) associée aux assemblages de pellets.

## 2.2 L' évolution verticale des organisations dans l'Andosol

Les caractéristiques microscopiques des autres volumes pédologiques de l'andosol seront décrites succinctement en comparaison à celles de l'horizon microagrégé AN3 précédemment étudié.

### 2.2.1 De l'horizon microagrégé aux horizons sous-jacents

#### 2.2.1.1 Le volume AN4

Le volume AN4 présente un domaine principal avec une structure à dominante de microagrégats proche de celle de l'horizon AN3 sus-jacent et un domaine mineur à structure plus polyédrique, proche de celles des horizons profonds.

La transition de l'un à l'autre de ces domaines se fait sur quelques millimètres (4 mm en moyenne).

La porosité globale est estimée à 40 à 50 %; elle comprend encore une faible macroporosité biologique sous forme de cavités et de chenaux.

#### a) Le domaine principal à structure à dominante microagrégée

Il occupe 60 à 70 % de la surface. Les microagrégats largement majoritaires (60 à 70 % des agrégats) sont en assemblage très lâche (type A1 à A2), plus ou moins individualisés ou en grappes. Des polyèdres sub-anguleux à contours émoussés, faiblement poreux, parfois plurimillimétriques sont dispersés entre les

grappes de microagrégats; ces polyèdres sont ici relativement abondants (30 %). La porosité associée entre les grappes et les polyèdres est importante, composée, très interconnectée et large ( $\geq 100 \mu\text{m}$ ). Elle est estimée à 50 à 60 %.

Le rapport G/F est de 30/70.

Ce volume AN4 est caractérisé par la relative abondance des graviers de basalte ( $> 3 \text{ mm}$ ), émoussés, peu altérés qui occupent 20 % de la surface. Les autres éléments grossiers sont essentiellement des sables (7 à 10 %), généralement supérieurs à  $100 \mu\text{m}$  sous forme de minéraux pseudomorphosés par des oxydes opaques principalement, de pyroxènes, et d'olivine.

La micromasse présente une couleur brun à brun-orangé en L.N. moins sombre que dans les volumes sus-jacents. Par ailleurs, ses caractères sont ceux du volume AN3 (aspect nuageux, avec traces d'opaques en L.N., isotropes en L.P avec de rares particules biréfringentes).

La distribution relative granomasse-micromasse est de type open-porphyrique.

#### b) Le domaine à structure plus dense à agrégation peu nette

Il présente des caractères proches des volumes profonds (AN5 notamment) tant par sa structure que par les caractéristiques de la masse basale.

La structure est alors polyédrique peu nette avec une porosité assez grossière, faible, sous forme de fissures (de  $80 \mu\text{m}$  en moyenne) peu connectées qui délimitent partiellement des polyèdres et s'élargissent localement en cavités de  $130$  à  $3000 \mu\text{m}$  de large. Les polyèdres présentent une porosité interne sous forme de petites cavités de  $20 \mu\text{m}$  de large sub-arrondies.

La granomasse est plus abondante (40 à 50 %). On n'observe plus de graviers de basalte peu altéré mais de nombreux éléments minéraux pseudomorphosés par les oxydes opaques ( $< 150 \mu\text{m}$ ) et des éléments de basalte très altéré.

La micromasse présente une couleur gris-brun à brun-gris orangé clair en L.N., nuageuse, avec de nombreux opaques, elle est isotrope en L.P.

La distribution relative granomasse, micromasse est toujours open-porphyrique.

#### 2.1.1.2 Les volumes profonds AN5 et AN6

L'organisation des horizons profonds AN5 et AN6 diffère de celle des horizons sus-jacents : les microagrégats sont rares (AN5) ou absents (AN6); la structure est essentiellement polyédrique peu nette et la porosité inter-agrégats essentiellement fissurale

##### 1) Le volume AN5

Il présente 2 domaines juxtaposés:

- un domaine principal à structure polyédrique peu nette
- un domaine très localisé à structure microagrégée.

La porosité globale est estimée à 30 à 40 %.

##### a) Le domaine à structure polyédrique peu nette

La structure principale qui occupe 90 % du volume, est polyédrique peu nette. Des fissures de  $30$  à  $150 \mu\text{m}$  de large délimitent partiellement des polyèdres plus ou moins émoussés de taille variable ( $360 \mu\text{m}$  de large en moyenne), localement juxtaposés à une structure plus lamellaire en agrégats de forme rectangulaire. La porosité intra-polyèdres est apparemment faible sous forme de petites cavités de  $20 \mu\text{m}$  de large (10-15%). La porosité fissurale inter-polyèdres est estimée à 30 à 40 %.

Ces polyèdres présentent une sur-structure peu nette en polyèdres beaucoup plus grossiers de  $2 \text{ cm}$  de large sur  $4 \text{ cm}$  de long en moyenne, séparés par des fissures tortueuses larges de  $2 \text{ mm}$  en moyenne. Ces polyèdres grossiers correspondent à la structure polyédrique grossière observée sur le terrain.

Le rapport G/F est estimé à 40/60. La granomasse comprend d'abondants (20%) graviers de basalte poreux et de nombreux oxydes de pseudomorphoses (20%) de la taille des sables grossiers et graviers ( $150$  à  $5000 \mu\text{m}$  large). Les graviers de basalte sont sub-arrondis, émoussés, fracturés, souvent bordés de fissures fines, très altérés, à minéraux peu reconnaissables si ce n'est des oxydes de pseudomorphoses et de rares pyroxènes. La micromasse présente une couleur brun-gris foncé très riche en ponctuations sombres de minéraux opaques en L.N., d'aspect nuageux. Elle est isotrope en L.P..

Des traits pédologiques sont présents en faible quantité ( $< 5 \%$ ) : sous forme de revêtements ou papules amorphes ou cryptocristallins de  $90 \mu\text{m}$  d'épaisseur en moyenne, de couleur orangé-pâle, microlites (lits hyalins alternant avec des lits poussiéreux, ponctués d'oxydes opaques) en L.N., totalement isotropes en L.P.; ces traits apparaissent le plus souvent intégrés à la masse basale, rarement dans la porosité de cavité intra-polyèdre ; on observe aussi d'autres traits amorphes très pâles, isolés, fendillés, jaune pâle et hyalins en LN, isotropes en L.P, identiques à ceux observés dans les volumes supérieurs.

b) Très localement (10 à 15% de la surface), une structure microagrégée est présente dans la porosité

racinaire, en petites plages fines millimétriques à centimétriques. Les microagrégats sont en arrangement assez lâche, plus ou moins isolés; ils ménagent entre eux une porosité importante estimée à 60 %.

Le rapport G/F diffère des domaines à structure polyédrique : G/F 90/10 ; dans ces domaines microagrégés, les éléments grossiers minéraux sont rares; des racines saines et fines sont présentes. La micromasse présente les mêmes caractéristiques que celle des domaines polyédriques principaux. Le "démantèlement" des polyèdres par l'activité biologique, pourrait être à l'origine des domaines microagrégés de ce volume AN5.

## 2) Le volume AN6

Comme le volume AN5, il présente une structure peu nette. Deux domaines sont associés :

- des domaines relativement denses à structure polyédrique peu nette, qui constituent 70 % de la surface de la lame;

- des domaines microporeux à structure particulière qui constituent 30% de la surface de la lame.

La porosité globale est estimée à 30 %.

### a) Les domaines polyédriques

Des fissures de 10 à 260  $\mu\text{m}$  de large (20  $\mu\text{m}$  en moyenne) délimitent très incomplètement des polyèdres très émoussés de 1,5 à 11 mm de large . Ces polyèdres paraissent plus microporeux que dans l'horizon AN5 (porosité interne très fine estimée à 15-20%); ils sont par contre encore plus mal individualisés et la porosité fissurale est moins développée; elle constitue 20 % de la lame.

Le rapport G/F est du même ordre de grandeur que pour le volume AN5 : estimé à 40/60.

La granomasse comprend essentiellement des éléments minéraux supérieurs à 100  $\mu\text{m}$  : leur nature est comparable à celle du volume AN5 : graviers abondants (20-30%) de basalte altéré peu contrastés bordés de fissures fines, qui présentent les mêmes caractéristiques de forme et de structure interne que dans l'horizon AN5, et oxydes de pseudomorphoses moins abondants que dans AN5 (10 %) de la taille des sables grossiers et graviers (1000 à 5000  $\mu\text{m}$  large).

De même, la micromasse diffère peu de celle du volume AN5 : elle présente une couleur plus claire : gris-beige orangé, très riche en ponctuations sombres de minéraux opaques en L.N., d'aspect nuageux. Elle est totalement isotrope en L.P.

Dans ce volume AN6, les traits pédologiques sont abondants (10 à 15 %); ce sont des traits amorphes ou cryptocristallins, sous forme de revêtements ou papules d'épaisseur variable (150 à 260  $\mu\text{m}$  de large). Ils sont essentiellement situés dans la porosité de cavité intra-polyèdres et dans la porosité fissurale inter-polyèdres qu'ils remplissent partiellement ou complètement; certains sont fissurés; des fragments (papules?) sont aussi parfois intégrés à la masse basale. Souvent fissurés, ils présentent une couleur orangée, avec une alternance de lits hyalins et de lits poussiéreux en L.N, d'épaisseur irrégulière de 20  $\mu\text{m}$  en moyenne; les poussières sont identifiées comme des opaques aux forts grossissements ponctuels. Ces traits sont totalement isotropes en L.P.

### b) Les domaines microporeux à structure particulière

Ces domaines de taille millimétrique (1 à 5 mm) constituent environ 30 % de la lame.

Aux forts grossissements, ils apparaissent essentiellement composés d'éléments minéraux isolés de 90  $\mu\text{m}$  à 5  $\mu\text{m}$ , de large, de forme et nature variées : oxydes opaques, minéraux en baguettes non identifiés, et fragments de revêtements comme éléments reconnus. Ces éléments ménagent entre eux une porosité importante (40 % du domaine), de 20 à 10  $\mu\text{m}$  de large en moyenne.

Ces domaines sont probablement issus de la désintégration des graviers de basalte altéré décrits précédemment.

Les horizons profonds AN5 et AN6 présentent donc des caractéristiques très différentes de celles des horizons sus-jacents.

La structure est polyédrique peu nette à porosité globale réduite sous forme de fissures interagrégats et de cavités intraagrégat associée tandis qu'elle est à dominance de microagrégats à porosité associée polyconcave dans les horizons sus-jacents.

Les éléments grossiers sont beaucoup plus altérés que dans les volumes sus-jacents.

Des traits pédologiques sous forme de revêtements et papules sont observés.

Ceci conforte l'hypothèse déjà émise de rupture entre des volumes profonds qui auraient subi une pédogenèse différente de la pédogenèse actuelle, et des volumes supérieurs marqués par une pédogenèse plus récente.

Les volumes profonds présentent certaines caractéristiques (fissures, cavités, structure en polyèdres émoussés, fraction grossière fragmentée) qui pourraient être attribuées au jeu des phénomènes périglaciaires

:

Pour l'origine des fissures et cavités, on peut évoquer le jeu des lentilles de glace provoquant

expansion et tassement du matériau. De même, la glace pourrait jouer un rôle dans la fragmentation des fractions grossières. La forme très émoussée des agrégats pourrait être induite par le jeu de la glace qui fait "tourner" les agrégats (Van-Vliet Lanoë, 1988).

Quant aux traits en revêtements amorphes et cryptocristallins, il ne sont probablement pas issus de la pédogenèse actuelle (fragmentation des revêtements, papules) mais seraient plutôt formés sous un climat plus contrasté que le climat actuel toujours humide, probablement sous climat périglaciaire à alternance de gel-dégel.

## 2.2.2 De l'horizon microagrégé aux horizons de surface

### 2.2.2.1 Le volume AN2

Il présente une structure à dominance de microagrégats proche de celle du volume AN3. C'est ici l'assemblage de type A3 qui domine. Par rapport à l'horizon AN3, la taille moyenne des pores liés aux assemblages de microagrégats est ici réduite, mais le volume poral associé à ces assemblages reste à peu près identique. La porosité globale est toujours très importante (estimée à 60 %). La macroporosité biologique apparaît sous forme de chenaux et cavités.

### 2.2.2.2 Le volume superficiel AN1

Ce volume superficiel est caractérisé par un assemblage lâche de pellets (type A4).

Les *pellets*, de taille variable, présents dans les chenaux / cavités de l'horizon AN3 deviennent ici très prédominants; les microagrégats de taille beaucoup plus petite sont rares (moins de 10 % des agrégats). De nombreux *fragments de racines et de feuilles* sont dispersés entre les agrégats. La porosité inter-pellets est très importante : estimée à 70 %, sous forme de *pores polyconcaves* (de 80 µm de moyenne) s'ouvrant en *larges cavités* (500 à 1500 µm de large).

Dans ce volume superficiel AN1, le rôle considérable de la faune du sol sur l'organisation est ainsi attesté par l'existence des chenaux-cavités et la prédominance des agrégats en boulettes fécales (pellets). Selon Toutain (communication orale, 1990), ces pellets correspondraient essentiellement à des déjections de diplopodes pour les plus grossiers et de collemboles pour les plus fins. Quelques déjections de larves de diptères seraient aussi présentes. On reconnaît l'action de chilopodes par les feuilles et fragments de feuilles découpés dans leur longueur. Enfin des champignons se manifestent sous formes de figures circulaires dans les fragments de feuilles.

## 2.3. Synthèse et conclusion sur l'organisation des horizons de l'andosol

\* Pour les volumes AN2, AN3, AN4, l'accolement des microagrégats forme une structure dominante à porosité d'assemblage polyconcave, fine, avec présence ou non d'un niveau d'organisation supérieur en grappes, ces grappes ménageant entre elles une porosité polyconcave plus grossière. Selon les types d'assemblage la porosité est plus ou moins grossière, mais reste toujours de fort volume.

La porosité est globalement très développée, fine, d'où l'aspect spongieux, très microporeux de la structure.

L'étude menée sur l'horizon AN3 a montré que la porosité est de taille et forme variables et que plusieurs niveaux d'échelle différente peuvent être distingués : (§ 2.1.3)

Pour les horizons AN2 à AN4 qui présentent une structure dominante à base de microagrégats, on observe l'évolution verticale suivante :

° Pour la taille des pores, liée à l'assemblage dominant :

La porosité est globalement plus grossière dans les horizons AN3 et AN4 : ces horizons présentent un assemblage dominant de type A2, avec présence de porosité inter-grappes grossière en plus de la porosité inter-microagrégats.

Elle est plus fine dans l'horizon AN2 : qui présente un assemblage dominant de type A2, ne comportant qu'une porosité fine inter-microagrégats.

° En ce qui concerne l'abondance de la porosité des assemblages de microagrégats :

Globalement le volume de pores est plus élevé dans les horizons AN2 et AN3 par rapport à celui de l'horizon AN4.

Le volume AN4 se distingue des volumes AN2 et AN3 par l'existence de polyèdres relativement abondants juxtaposés aux microagrégats dans les domaines à structure à dominance de microagrégats, et par la présence de domaines polyédriques peu nets proches de ceux des volumes profonds. La porosité globale y est réduite par rapport aux 2 horizons sus-jacents AN3 et AN2.

Pour les horizons AN2 et AN3, la porosité liée aux assemblages de microagrégats est globalement de même abondance; l'horizon AN2 présente une porosité inter-grappes très réduite mais une plus forte porosité inter-agrégats que dans l'horizon AN3.

\* L'horizon superficiel AN1 se caractérise par une structure très liée à l'activité biologique caractérisée par un assemblage lâche de boulettes fécales avec une porosité très grossière, en cavités très interconnectées : il se rapproche de l'assemblage de type A4 existant localement dans les chenaux et cavités d'origine biologique des 2 horizons sous jacents.

\* Les horizons profonds AN5 et AN6 présentent une structure qui diffère radicalement des horizons sus-jacents: à base de polyèdres peu nets avec une porosité globale réduite, sous forme de fissures et cavités.

Les éléments grossiers sont plus altérés, sub-arrondis que dans les volumes supérieurs.

Des traits pédologiques argilo-ferrugineux amorphes ou cryptocristallins sous forme de revêtements microlités, souvent fissurés, parfois désintégrés et fragmentés, totalement isotropes en lumière polarisée, sont localisés dans la porosité inter-polyèdres ou intra-polyèdres, parfois intégrés à la masse basale.

Le caractère isotrope de la micromasse dans l'ensemble des horizons de l'andosol souligne l'abondance des constituants amorphes et cryptocristallins. Au sein de cette micromasse les constituants sont de taille très réduite et intimement liés; ils ne sont pas distinguables individuellement (y compris au MEB, au moins pour les grossissements  $\leq 3000$ ).

### 3. L'organisation dans les volumes du sol brun acide

#### 3.1. Le volume microagrégé BA3

Ce volume BA3 est le volume du sol brun acide pour lequel la structure microagrégée est la plus développée. La structure générale est très "composée", avec une agrégation et une porosité variable sur quelques mm. Globalement, on distingue : des domaines à structure microagrégée lâche, des zones microporeuses à sous-structure microagrégée, des zones denses et fissurées (PI.IV). Ces 3 types de domaine sont le plus souvent de petite taille (2 mm) et intimement associés. La structure microagrégée lâche peut être localement en plages centimétriques. Les agrégats définis comme agrégats de base sont : les microagrégats et les polyèdres denses parmi lesquels des formes interprétées comme pédotubules.

La porosité globale est estimée à 40 à 50 % du volume. Elle comprend une macroporosité d'origine biologique (< 10 %) sous forme de chenaux de vers de terre sub-circulaires grossiers de 3 à 10 mm de diamètre parfois partiellement remplis de pellets, et des pores racinaires sub-verticaux à obliques souvent fins (650 à 1300  $\mu\text{m}$ ). Les autres types de pores sont : des pores fissuraux peu connectés et des cavités (10 à 20 % de la surface), de taille inférieure au mm, dans les zones les plus denses; le plus fréquemment (30 à 40 % de la surface), ce sont des pores plus ou moins polyconcaves "d'entassement" de microagrégats, de taille < 500  $\mu\text{m}$ .

Après une caractérisation générale de la granomasse et de la micromasse, la structure sera décrite plus en détail sous forme de 2 rubriques : agrégats de base, types d'assemblage et porosité associée.

Le rapport G/F est estimé à 45/55<sub>10 $\mu\text{m}$</sub> . La fraction grossière est constituée principalement d'éléments de la taille des sables grossiers (30 %). Les sables sont essentiellement composés de quartz non altéré et anguleux; on reconnaît aussi des feldspaths alcalins (orthose perthitique et microcline), des muscovites et de rares biotites. Les fractions les plus fines de la taille des limons, sont essentiellement composées de micas de type muscovite. Ces éléments grossiers présentent une distribution relative aléatoire. Notons dès à présent que la fraction grossière tend à augmenter depuis les domaines microagrégés

lâches aux domaines denses à tendance polyédrique.

La fraction fine organo-minérale a une couleur brun-jaune en L.N., légèrement tachetée par des particules peu abondantes ( $\leq 5\%$ ) d'opaques et de matière organique; elle présente une couleur brun foncé à brun noir en L.P, avec des paillettes biréfringentes apparemment de nature micacée. Le motif de biréfringence est tacheté. L'allure de la micromasse ne semble pas varier selon les différents types d'agrégation. Rappelons que d'après l'analyse des constituants (chap. IV), cette fraction fine est essentiellement constituée de kaolinite, de minéraux à 14 Å (vermiculites OHA1, notamment) et d'argiles micacées.

La distribution relative G/F est porphyrique du type "lâche" à "à pas double". Il n'y a pas de traits pédologiques hormis les figures d'excréments de vers de terre.

### 3.1.1 Les agrégats de base

Deux grands types d'unités élémentaires ont été distingués dans ce volume BA3 :

- le microagrégat : il est majoritaire (80 % de l'agrégation), mais ses modes d'assemblage font qu'il constitue, soit une structure proprement dite, soit une sous-structure.
- les polyèdres denses (20% de l'agrégation) : 2 faciès ont été distingués.

#### 3.1.1.1. Le microagrégat

C'est une unité de forme arrondie à ovoïde, à contours lisses à faiblement rugueux, dont le diamètre moyen est de 70 à 80  $\mu\text{m}$ , variant de 70 à 100  $\mu\text{m}$  de long sur 45 à 70  $\mu\text{m}$  de large. La porosité intra-agrégat paraît faible ( $< 10\%$ ) au microscope optique (Pl. V, photo 4).

Lorsque le microagrégat est en entassement lâche, le rapport G/F de cette unité est plus faible que pour l'ensemble de l'horizon (estimé à 30/70). La micromasse présente les caractères généraux décrits ci-avant. Cette unité est rarement isolée.

#### 3.1.1.2. Les polyèdres denses

Deux formes de "polyèdres denses" ont été distinguées : des polyèdres denses anguleux limités par des fissures rectilignes; des polyèdres à contours sub-arrondis, isolés et/ou délimités par des fissures courbes.

##### 1) Polyèdres denses anguleux délimités par des fissures rectilignes

Des fissures rectilignes de 35  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  de large (en moyenne 40  $\mu\text{m}$ ), s'ouvrant localement en cavités ovoïdes à triangulaires de 230 à 350  $\mu\text{m}$  de large, définissent partiellement ou plus complètement des *polyèdres anguleux* assez grossiers, à contours légèrement rugueux bien ajustés, de taille supérieure au mm : 2 à 3 mm de large en moyenne (Pl. IV, photo 1). Ces polyèdres sont *denses* (Pl. V, photo 1) : la porosité interne est estimée inférieure à 5%; elle se présente sous forme de pores de forme irrégulière, de 10 à 20  $\mu\text{m}$  de large, apparemment peu connectés : cavités ou fissures très interrompues de 40 à 120  $\mu\text{m}$  de long. Par rapport aux microagrégats, ces unités sont plus riches en sables grossiers; la micromasse présente les caractères généraux décrits ci-avant.

##### 2) Polyèdres denses sub-arrondis

Les figures de ce type sont rares dans ce volume intermédiaire microagrégé.

Ce sont des unités de forme sub-arrondie, à contours lisses à digités, grossières : de 5 mm de diamètre en moyenne (Pl. IV, photo 2). Leur couleur est légèrement plus foncée : brun clair; on observe des halos rouille à brun foncé qui sont probablement de nature organique. Ces unités présentent une organisation interne assez caractéristique : dans leur zone périphérique, les particules grossières (quartz et micas) tendent à être orientées parallèlement à la surface de l'agrégat; dans la partie interne, les particules grossières peuvent former un "noyau" en arrangement plus dense. La porosité intra-agrégat est faible ( $\leq 5\%$ ), sous forme de cavités très fines de 25  $\mu\text{m}$  ou plus large : de 110  $\mu\text{m}$ ; on observe aussi quelques fissures  $< 80 \mu\text{m}$  de large.

Par analogie avec les observations faites pour l'horizon superficiel BA1, dans lequel ces agrégats sont plus fréquents, plus nets et forment des figures mamelonnées, vermiformes dans lesquelles les unités sphériques sont partiellement délimitées par des fissures courbes en croissants, ces agrégats sont interprétés comme des boulettes fécales de vers de terre. Dans ce volume BA3, ces unités sphériques sont rarement groupées, plutôt isolées (rupture probable selon les fissures en croissant des figures mamelonnées) et

partiellement intégrées à la masse basale. Elles sont rarement nettes, rarement intactes. Il est possible que certains des polyèdres denses anguleux décrits ci-dessus (§ 2a) , correspondent à de telles unités fragmentées et intégrées à la masse basale.

### 3.1.2. Les types d'assemblages des agrégats élémentaires

#### 3.1.2.1 Assemblages de microagrégats

Les assemblages de microagrégats constituent 70 à 80% de la surface de la lame. Deux grands types d'assemblages de microagrégats peuvent être distingués : des assemblages relativement lâches; des assemblages plus denses dans lesquels les microagrégats apparaissent plutôt comme une sous-structure de "polyèdres peu nets et poreux". Selon le degré "d'entassement", la porosité varie de 60 à 30 %.

##### 1) Assemblage de type B1 : microagrégé en arrangement lâche, domaines nettement microagrégés

Ce type d'assemblage constitue environ (40 à) 50 % de l'agrégation de cet horizon BA3. Il forme des plages de taille variée : parfois pluricentimétriques (pouvant atteindre 5 à 7 cm) correspondant alors à des cavités ou des zones de porosité racinaire (30 % de la surface), mais le plus souvent, ce sont des petites plages millimétriques (1 à 3 mm), de forme variable (petites cavités ou le plus souvent domaines de forme mal définie.(Pl. IV, photos 1 à 3)), qui sont associées sur courtes distances à des zones plus denses à tendance polyédrique). Ces petites plages constituent 20 % de la surface de la lame.

Dans ce type d'assemblage, les microagrégats sont rarement isolés(Pl. V, photo 4), bien que souvent individualisables; ils sont le plus souvent groupés en "grappes" de 200 à 400  $\mu\text{m}$  de large (Pl. V, photo 2), dans lesquels ils ménagent une porosité fine inter-microagrégats de forme diverse en cavités allongées ou ovoïdes, légèrement polyconcave, de 20 à 30  $\mu\text{m}$  de large en moyenne (elle varie de 10 à 50  $\mu\text{m}$  ) dont le volume est de 10 à 20 % du volume de la grappe .

Ces grappes ménagent entre elles une porosité polyconcave très digitée et grossière, de 70 à 400  $\mu\text{m}$  de large, bien interconnectée (Pl. V, photo 2).

Notons que les microagrégats paraissent peu riches en éléments grossiers; ces derniers leurs sont juxtaposés.

La porosité globale est importante : elle est estimée à 50-60 % de l'assemblage. L'essentiel est composé par la porosité inter-grappes.

##### 2) Assemblage de type B2 : microagrégé en arrangement serré ou "polyèdres peu nets poreux"

Cet assemblage constitue 30 à 40 % de l'agrégation de cet horizon BA3.

Il forme des plages de taille plurimillimétrique, associées aux assemblages de type B1(Pl. IV, photo

1).  
Ce sont des zones à tendance de polyèdres poreux à contours mal définis qui présentent une porosité interne ovoïde à polyconcave aplatie, de 15 à 80  $\mu\text{m}$  de large, qui résulte de l'assemblage serré de microagrégats(Pl. V, photo 3).

La porosité est estimée à 30-40 % de cet assemblage .

On observe toute un gradation d'assemblage de microagrégats depuis le type lâche (type B1) jusqu'au type serré (type B2) (Pl. IV, photo 1).

#### 3.1.2.2 Assemblages de polyèdres denses

Ils constituent 15 à 25 % de l'agrégation de cet horizon BA3. Ce sont essentiellement des assemblages de polyèdres anguleux (10 à 20 % de l'agrégation). Les polyèdres denses sub-arrondis sont rares et rarement associés entre eux (5 % de l'agrégation).

##### 1) Assemblages de type B3 : assemblage de polyèdres anguleux denses

Les assemblages de polyèdres denses peuvent constituer des domaines de longueur pouvant atteindre près de 1 cm, généralement sur une largeur plus faible (3 mm max. : largeur d'un polyèdre)(Pl. IV, photo 1). Ces assemblages présentent une faible porosité inter-agrégats, sous forme de fissures rectilignes, à

parois rugueuses, de 35 à 100  $\mu\text{m}$  de large (en moyenne 40  $\mu\text{m}$ ), plus ou moins connectées qui s'ouvrent localement en cavités ovoïdes à triangulaire de 230 à 350  $\mu\text{m}$  de large (Pl. V, photo 1). Ce sont ces fissures qui définissent les contours des unités de polyèdres anguleux.

La porosité inter-agrégats de ces assemblages est faible : inférieure à 10 % (à 20 %).

## 2) Assemblages de type B4 : en polyèdres sub-arrondis

Dans cet horizon BA3, on n'observe pas d'assemblages de polyèdres sub-arrondis à proprement parler

Les polyèdres denses sub-arrondis forment plutôt des figures individualisées associées aux zones à microagréats et polyèdres poreux (Pl. IV, photo 1).

## Distribution relative de ces différents assemblages

Dans cet horizon BA3, les différents types d'assemblages précédemment décrits sont très "associés"; chacun de ces assemblages constituant de très petites plages (mm à cm), le passage de l'un à l'autre s'effectue donc sur très courte distance (Pl. IV, photo 1).

## Variation de l'organisation selon le mode de déshydratation

L'organisation semble peu affectée par le mode de déshydratation tout au moins aux échelles d'observations.

La porosité inter-grappes semble cependant un peu plus grossière et les grappes de microagréats paraissent plus petits, comme si elles étaient rétractés, mais une analyse quantitative type analyse d'images serait nécessaire pour confirmer ou infirmer ces observations qualitatives.

### **3.1.3 Synthèse et Conclusion**

Cet horizon BA3 considéré comme le volume le plus microagréé du sol brun acide, présente une structure composée d'une association intime de petites plages millimétriques de zones très denses : polyèdres denses à fissures inter-polyèdres et à cavités intra-polyèdres (type B3), et de zones plus poreuses d'assemblage de microagréats à pores polyconcaves en arrangement plus ou moins dense (assemblage lâche (type B1) ou assemblage plus serré à tendance de polyèdres poreux (type B2)). Dans ce type de structuration, la porosité globale est de 30-40 %. Localement la structure lâche microagréée peut constituer de plus grandes plages, notamment au voisinage des racines. La structure microagréée est donc loin d'être généralisée.

La porosité globale est relativement abondante mais très irrégulièrement répartie.

L'activité biologique tient une place importante dans ces sols attestée notamment par les excréments et les chenaux de vers de terre, et par la porosité racinaire.

## Les rapports entre les différents assemblages

Il existe toute une gradation entre les assemblages microagréés lâches et les assemblages de microagréats denses. Le contact entre les deux est par suite progressif (Pl. IV, photo 1 à 3), ce qui suggère l'hypothèse d'une filiation entre les 2 assemblages (polyèdres très poreux - microagréats entassés - microagréats en entassement lâche).

Les polyèdres sub-anguleux denses ne présentent pas de porosité interne permettant d'envisager une "filiation" avec les assemblages de microagréats. Cependant, localement, la limite entre les assemblages de polyèdres denses (type B3) et les assemblages denses de microagréats (type B2) est progressive.

Les formes denses sub-arrondies, interprétées comme excréments de vers de terre proviennent de la fragmentation des assemblages vermiformes fréquents dans le volume BA1, fragmentation qui conduit aux formes isolées visibles dans cet horizon BA3; ces formes sont ensuite progressivement intégrées à la masse basale.

## Récapitulation des niveaux de porosité observés au microscope optique dans le volume BA3

On peut récapituler schématiquement les porosités associées aux différents types d'assemblages et d'agréats.

- \* Porosité liée aux microagrégats et à leur assemblage
  - intra-microagrégats : non individualisable (estimée < 10 % de l'agrégat)
  - inter-microagrégats = intra-grappes : (10 à 20 % du chapelet)  
cavités de 20 à 30  $\mu\text{m}$  de large (10 à 50  $\mu\text{m}$ ) (20 à 80  $\mu\text{m}$  dans assemblage type B2)
  - inter-grappes : (30 à 60 % de l'assemblage) :
    - 70 à 400  $\mu\text{m}$  de large dans l'assemblage lâche (type B1)
    - 15 à 80  $\mu\text{m}$  de large dans l'assemblage dense (type B2) :
- \* Porosité liée aux polyèdres sub-anguleux et à leur assemblage
  - intra-polyèdres denses ( $\leq 5\%$  de l'agrégat)  
cavités ou fissures de 10 à 20  $\mu\text{m}$  de large
  - inter-polyèdres denses ( $\leq 10\%$  de l'assemblage)
    - fissures de 35 à 100  $\mu\text{m}$  de large;
    - cavités de 230 à 350  $\mu\text{m}$  de large.
- \* Porosité liée aux formes denses sub-arrondies
  - intra-pellet : cavités de 25 à 110  $\mu\text{m}$  ( $\leq 5\%$ )
  - inter-pellet : fissures en croissants ou à tracé en décrochements de 250 à 700  $\mu\text{m}$  de large.
- \* Macroporosité biologique : (10 % de la surface)
  - chenaux de ver de terre : 3000 à 10 000  $\mu\text{m}$
  - chenaux racinaires : 650 à 1300  $\mu\text{m}$

## 3.2. Evolution verticale des organisations dans le sol Brun Acide

### 3.2.1 De l'horizon microagrégé aux horizons sous-jacents (BA4, BA5, BA6)

#### 3.2.2.1 Le volume BA4

Le volume BA4 présente une structure avec des domaines d'assemblage microagrégé dense et une porosité fine associée (type B2) proches de ceux du volume BA3. Mais une structure à agrégation assez mal développée avec une porosité de cavités/alvéoles proche de celle des horizons profonds est aussi présente.

La porosité globale est estimée à 40 % du volume.

Le rapport G/F est estimé à 55/45. La fraction grossière est plus abondante que dans le volume sus-jacent BA3; elle comporte principalement des sables grossiers quartzeux (40 %). Les éléments grossiers sont de nature identique à celle du volume BA3.

La fraction fine a une couleur brun-orangé en L.N.; le motif de biréfringence est tacheté localement granostrié.

La distribution relative G/F est de type porphyrique à pas double.

Il n'y a pas de traits pédologiques exceptés de rares excréments de vers de terre encore reconnaissables par leur structure interne.

#### 3.2.2.2. Les volumes profonds BA5, BA6

Ces deux volumes profonds présentent des caractères structuraux très proches.

L'agrégation est mal développée. La structure est massive, peu nette. Il n'y a plus de structure microagrégée, ni de vides polyconcaves.

La porosité reste cependant relativement importante (estimée à 30-35 %). Elle se présente essentiellement (80 % de la porosité) sous forme de cavités, de forme ovoïde à allongée, de 80 à 800  $\mu\text{m}$  de large non interconnectées, situées dans la micromasse, sans relation avec les autres éléments. Des fissures peu nettes et peu interconnectées de 40 à 80  $\mu\text{m}$  de large sont présentes en faible proportion, au sein de la micromasse ou autour des éléments grossiers.

Le rapport G/F est de 70/30.

Les éléments grossiers très abondants sont essentiellement de la taille des sables grossiers (45 %) et, en moindre proportion, de graviers (10 %) et de sables fins (10%) qui sont essentiellement composés de quartz; quelques fragments de granite sont présents. Les micas sont nombreux dans les fractions limons.

La micromasse est jaune-orangée en L.N dans le volume BA6. Dans le volume BA5, elle présente aussi des zones plus claires blanchies ou grises. Le motif de biréfringence est de type ponctué, souvent granostrié (voire à striation réticulée).

La distribution relative granomasse-micromasse est de type porphyrique à pas simple.

Les traits pédologiques sont présents, essentiellement sous forme de figures de redistribution: notamment des traits d'appauvrissement en BA5 et des traits texturaux en BA6

Ainsi, *le volume BA5*, notamment à la base vers sa transition avec le volume BA6, présente en L.N. des domaines à micromasse jaune orangée pâle juxtaposés à des domaines à micromasse gris-blanc très pâle, probablement déferrifiés. Les zones "blanchies" paraissent plus riches en éléments grossiers, apparemment plus pauvres en argile et en fer; les éléments grossiers sont souvent entourés de zones plus biréfringentes (motif de type granostrié); on observe localement des grappes de grains de quartz sans plasma, mais le plus souvent les grains sont emballés dans la micromasse pâle. Le passage des zones gris-pâle aux zones orangées est progressif.

Des traits de couleur rouille en L.N., brun-rouille en L.P, présentant un contact diffus par rapport à la masse basale, apparaissent le long des fissures. Ce sont des traits ferrugineux (imprégnations "en quasi-revêtements").

Des imprégnations ferrugineuses apparaissent aussi sous forme de taches à contours diffus dans la masse basale.

Dans le *volume BA6*, on observe des revêtements ( $\leq 5\%$ ) d'épaisseur variable de 50 à 140  $\mu\text{m}$ , microlités, remplissant certains pores fissuraux. Leur couleur est brun-jaune avec des ponctuations plus sombres, peu contrastée par rapport à la masse basale en L.N. Elle est jaune-orangé en L.P. Ce sont des revêtements argilo-ferrugineux bien orientés.

### Discussion

Les domaines blanchis plus riches en granomasse et les imprégnations ferrugineuses en quasi-revêtements, essentiellement ferrugineux sans argile apparente et diffus, semblent être les témoins d'un appauvrissement en fer, appauvrissement qui apparaît centrifuge. La fraction fine a pu être entraînée sans que la fraction sable ait bougé, puisque ces zones blanchies sont plus riches en éléments grossiers. Il y aurait non seulement perte du fer dans les mottes grises mais aussi enrichissement en fer des mottes plus orangées. Les observations du caractère orangé de l'horizon BA6 et des revêtements confortent cette hypothèse dans le même sens. Ceci pourrait expliquer le rapport  $\text{Fe}/\text{Fe}_T$  élevé (chap.IV) de l'horizon BA6 de même que la valeur faible de ce rapport dans l'horizon BA5.

### 3.2.2 De l'horizon microagrégé aux horizons de surface (BA2 et BA1)

Les volumes supérieurs (BA2,BA1) sont caractérisés par la nette apparition des figures biologiques, notamment de figures denses et fissurées (excréments de vers de terre: fissures à faces courbes et lisses délimitant des agrégats de forme arrondie). Mais ces deux volumes présentent une porosité différente : *le volume BA2* est dense, du fait de la réduction des macropores, mais surtout des pores inter-microagrégats; *le volume BA1* est caractérisé par une macroporosité importante et par la dominance des figures biologiques.

#### 3.2.2.1. le volume BA2 : densification des structures

Cet horizon est dense. La structure est très "serrée". Il y a réduction importante de la macroporosité (par rapport au volume superficiel BA1 notamment). Par rapport au volume BA3, il y a réduction des domaines microagrégés et parmi ces derniers, réduction des pores inter-microagrégats. La porosité globale reste estimée à 35-40 %.

On retrouve les mêmes types que dans le volume BA3 mais en proportions différentes : avec une juxtaposition de domaines d'assemblage microagrégé très dense et de gros polyèdres denses.

Les pellets/microagrégats sont présents mais en proportion réduite et surtout en assemblage très dense, par rapport à l'horizon BA3. Les assemblages prédominants sont des assemblages de polyèdres. On observe beaucoup de zones très denses qui dérivent probablement de boulettes fécales de ver de terre; celles-ci sont déjà partiellement intégrées à la masse basale et seulement reconnaissables par leur forme, leur couleur et surtout l'orientation des paillettes micacées et des grains de quartz en leur sein.

En résumé, les différences principales par rapport au volume superficiel BA3 consistent en une forte réduction des zones lâches microagrégées; et une augmentation des domaines denses : microagrégés très denses et polyèdres denses. Par rapport au volume BA1, la macroporosité biologique est réduite.

Le rapport G/F est estimé à 50/50 avec toujours prédominance des sables grossiers quartzeux.

### 3.2.1.2 Le volume BA1 : place croissante de la biologie

Dans le volume BA1, les figures témoignant d'une action biologique prennent une place importante : résidus de plantes (racines), "agrégats polyédriques arrondis" (excréments de vers de terre) abondent, donnant notamment au sommet de l'horizon une structure très lâche.

Dans ce volume BA1, la porosité globale est importante par rapport à tous les autres volumes du sol brun acide. Elle est estimée à 50 %. Elle s'exprime sous forme d'une forte macroporosité biologique en chenaux et cavités, sous formes de fissures inter-polyèdres souvent peu connectées (courbes dans les figures d'excréments, plus rectilignes entre les polyèdres anguleux), et sous forme de vides d'entassement composés de forme irrégulière associés à l'arrangement des microagrégats dans les assemblages denses de microagrégats/pellets.

Le rapport G/F est de 50/50 avec toujours prédominance des sables grossiers quartzeux. Parmi la fraction grossière, les éléments organiques sont relativement abondants, notamment sous formes de racines. La micromasse est brun-jaune en L.N., très comparable à celle de BA3 si ce n'est une plus grande abondance de punctuations de nature organique. Le motif de biréfringence est tacheté.

Deux types de domaines, bien reconnaissables à l'échelle des photos de bloc (grossissement 2) sont juxtaposés, et ce en proportions quasi-égales (50-50% de la surface de la lame) :

- des domaines fissurés constitués de figures mamelonnées composées d'unités sphériques grossières coalescentes. Ce sont des excréments de vers de terre.
- des domaines à juxtaposition de pellets/microagrégats et de polyèdres avec les assemblages proches de ceux décrits dans le volume BA3.

#### a) L'assemblage des agrégats sphériques (excréments de vers de terre)

L'unité de base est l'agrégat dense de forme arrondie, grossier et dense décrit dans le paragraphe consacré au volume microagrégé BA3. Ces unités de formes arrondies sont "assemblées" en une figure mamelonnée, allongée et vermiforme, en section longitudinale, dans lesquelles les unités sphériques sont partiellement délimitées par des fissures courbes en croissants, non connectées de 300 µm à 600 µm de large, à bords très bien ajustés.

Ce sont des assemblages peu poreux : les agrégats arrondis sont très denses et la porosité de fissures courbes représente moins de 10% de l'assemblage.

Dans les horizons sous-jacents, les figures de ce type sont progressivement fragmentées, et intégrées à la masse basale. Elles sont alors parfois reconnaissables par leur couleur plus sombre en L.N et l'orientation des particules grossières.

#### b) Les domaines d'association/juxtaposition de pellets/microagrégats et de polyèdres

Ces domaines sont proches de ceux décrits dans BA3

Dans ces zones, les assemblages de microagrégats sont plus "juxtaposés" et en plages encore plus réduites que dans le volume BA3. On distingue toujours des microagrégats ou pellets de forme ovoïde, individualisés ou plus rapprochés et groupés en grappes, et des zones plus denses polyédriques.

Par rapport à l'horizon BA3, on retiendra une nette augmentation de la macroporosité d'origine biologique et des assemblages microagrégés tassés.

#### *Discussion*

Le tassement dans le volume BA2 peut être imputé au piétinement des bovins; dans l'horizon BA1, il y aurait régénération de la porosité par l'activité biologique, notamment augmentation de la macroporosité par l'action des nombreuses racines (chevelu dense) et par le "fouissage" de la faune du sol.

### 3. 3. Synthèse et conclusion sur le sol Brun Acide

Le volume BA1 est caractérisé par sa forte macroporosité biologique, et les nombreuses figures d'origine biologique.

Le volume BA2 présente une porosité réduite par rapport aux volumes sus-et sous-jacents : réduction et densification très nette des domaines microagrégés au profit des zones denses polyédriques, par rapport au volume BA3; réduction de la macroporosité par rapport au volume superficiel BA1.

Par rapport au volume BA1 et à fortiori au volume BA2, dans le volume BA3, la porosité inter-agrégats est plus forte; les zones microagrégées sont plus fréquentes et plus larges. La structure est composée d'une association de zones microagrégées et de zones plus denses polyédriques.

Dans ces volumes supérieurs de ce sol brun acide, le rôle de la faune est important, attesté notamment par les chenaux et la présence de traits excrémentaux (notamment des figures en pseudopodes typiques des lombrics). La faune du sol joue donc probablement un rôle important dans la structure du sol, son homogénéisation et dans la plasmation.

Dans le volume BA4, les domaines microagrégés sont denses et une structure peu nette apparaît, sans agrégation nette proche de celle des volumes profonds. La macroporosité biologique est par ailleurs plus faible que dans les horizons sus-jacents.

Les volumes profonds (BA5 et BA6) présentent une agrégation peu développée et une porosité essentiellement sous forme de cavités et de fissures. Les traits pédologiques d'appauvrissement (en BA5 notamment) et texturaux en revêtements (BA6, notamment) sont fréquents, attribuables à des phases d'alternance de réduction et d'oxydation, par battement de la nappe.

Dans l'ensemble des horizons, la fraction grossière est abondante : depuis le bas vers le haut le rapport G/F varie de 70/30 à 50/50 avec une dominance de sables grossiers quartzeux.

## 4. Synthèse et Comparaison des grands traits différenciant ou rapprochant les organisations des deux types de sol

### 4.1. Au niveau de l'unité structurale: le microagrégat

#### 4.1.1 Taille ; forme

1) Dans le sol Brun Acide, les *micro-agrégats* sont de forme sub-arrondie à "carrée" et de 70 à 80  $\mu\text{m}$  de diamètre en moyenne (Pl. V, photo 4).

2) Dans l'Andosol, le microagrégat présente aussi une forme subarrondie, mais sa taille est 2 fois plus petite que le microagrégat du sol brun acide : 40  $\mu\text{m}$  de diamètre (Pl. III, photo 4).

Alors que dans le sol brun acide, certains bords des microagrégats tendent à être rectilignes (d'où leur tendance à une forme "rectangulaire" et "carrée"), dans l'andosol, les *formes* sont toujours plus courbes.

#### 4.1.2 Assemblages des microagrégats et porosité associée

Dans les 2 types de sol, les microagrégats sont rarement individualisés : ils sont groupés en grappes dans lesquelles les microagrégats ménagent une porosité (intra-grappes) plus importante dans le cas de l'andosol (Pl. III, photo 2) que dans le cas du sol brun acide (Pl. II, photos 2 et 3).

Les groupements de microagrégats ménagent entre eux une porosité inter-grappes : celle-ci est en moyenne 2 fois plus grossière dans le sol brun acide; elle est moins interconnectée que dans le cas de l'andosol. D'autre part, si sa forme tend à être polyconcave dans les 2 types de sol, dans l'andosol, elle est plus digitée (ceci est dû aux protubérances des microagrégats des grappes). Enfin cette porosité inter-groupements de microagrégats, est plus importante en surface dans l'andosol par rapport au sol Brun Acide.

Finalement en ce qui concerne la taille des microagrégats et de la porosité associée, il est marquant de comparer les photos des zones microagrégées des 2 types de sol : les formes observées au niveau de la structure microagrégée des 2 types de sols sont comparables mais à des échelles différentes : si on compare les photos de BA3 à l'objectif 3,5 (Pl. V, photo 2) et AN3 à l'objectif 10 (Pl. III, photo 2). Et, c'est bien là le fait à retenir : les 2 types de structures microagrégées peuvent être comparables mais à une échelle bien différente : échelle x 1 dans BA3, échelle x2 à x3 dans AN3. Ainsi les unités structurales et la porosité

associée sont 2 à 3 fois plus petites dans le cas de l'andosol.

#### 4.1.3 Structure Interne du microagrégat

Si on compare maintenant la structure interne des microagrégats (observations au MEB) :

1) Dans BA3, cette structure est plus grossière : à des grossissements de 1000 à 3000, on arrive à l'échelle du constituant élémentaire. On observe des particules en plaquettes de 5 à 30  $\mu\text{m}$  de large (probablement des micas), des grains (probablement de quartz); et des particules trop petites pour être reconnaissables ( $< 1\mu\text{m}$  de large) qui paraissent assemblées bord-face ou d'orientation aléatoire.

2) Dans AN3, aux mêmes échelles dans AN3, on n'observe pas de particules cristallisées : on n'atteint pas les constituants élémentaires qui sont de taille beaucoup plus fine que dans le sol brun acide.

## 4.2 Au niveau de l'ensemble de l'organisation des volumes microagrégés

### 1) Dans BA3

La structure microagrégée nette est localisée (Pl. IV, photos 1 à 3)

L'essentiel de la structure est composé d'une association intime de polyèdres à contours mal définis et de microagrégats, avec peu de polyèdres individualisés.

La porosité globale est plus réduite par rapport à AN3 et ce notamment du fait de la réduction des zones microagrégées et de l'augmentation des zones denses.

### 2) Dans AN3

La structure est beaucoup plus homogène et la structure microagrégée est beaucoup plus généralisée. (Pl. II, photo 1 à 3)

## 4.3. Au niveau de l'évolution verticale des structures au sein de chaque type de sol par rapport au volume microagrégé.

### 4.3.1 Evolution vers le haut

Dans les 2 types de sol, au dessus de l'horizon microagrégé, se situe un horizon plus dense, puis un horizon où la biologie engendre une forte macroporosité mais avec des modalités différentes dans les 2 cas.

#### 1) Pour les volumes 2 (BA2 du sol brun acide et AN2 de l'andosol)

1a) Dans BA2: on observe une forte réduction de la macroporosité. Au niveau de la structure, les zones microagrégées sont encore réduites par rapport au volume BA3 sous-jacent et les microagrégats sont en arrangement plus serré, tandis que les zones en polyèdres mal définis dominent.

1b) Dans AN2, par rapport au volume AN3, la macroporosité biologique est conservée voire augmentée; les microagrégats sont en arrangement plus serré mais la structure reste à dominante microagrégée très généralisée.

#### 2) Pour les volumes 1 (BA1 du sol Brun Acide, AN1 de l'Andosol)

2a) Dans BA1, l'augmentation de la porosité est due aux racines. Les figures biologiques prennent une place prépondérante; elles se traduisent par l'augmentation d'une structure polyédrique à faces courbes avec une porosité associée de type fissural.

2b) Dans AN1, les unités structurales sont également d'origine biologique : il s'agit de pellets ovoïdes qui ménagent entre eux une porosité large de type polyconcave. Les fissures sont absentes.

Finalement dans les deux types de sol, les volumes 1 superficiels sont marqués par la dominance

des figures biologiques. Mais, alors que dans le volume AN1 de l'Andosol, cela se traduit par l'augmentation de la largeur et de l'abondance des pores polyconcaves bien connectés, dans le cas du volume BA1 du sol Brun Acide, ce type de pores diminue en même temps que la structure microagrégée et c'est une porosité fissurale et une macroporosité biologique grossière qui deviennent prépondérantes.

Dans les deux types de sol, entre le volume nettement microagrégé et le volume superficiel riche en figures biologiques, se situe un volume 2 dans lequel l'arrangement est plus dense; ceci est dû notamment à un arrangement plus serré des microagrégats. Mais alors que dans le volume AN2 de l'Andosol, la structure microagrégée, bien que plus serrée, reste généralisée, dans le cas du volume BA2 du sol Brun Acide, les zones microagrégées sont réduites et seulement localisées sur de petites surfaces entre les zones polyédriques qui, elles, dominent.

#### **4.3.2 Evolution vers le bas**

Dans les deux types de sol, on observe un passage à des structures plus denses vers le bas des profils, mais selon des modalités différentes selon le sol brun acide ou l'andosol.

##### **Dans le Sol Brun Acide**

Les volumes profonds sont à structure massive, avec une porosité d'alvéoles fermée, riches en éléments grossiers peu altérés. Les figures de redistribution sont fréquentes et semblent actuelles.

##### **Dans l'Andosol**

Les volumes profonds sont également peu structurés, mais présentent une porosité de type fissural, avec localement une structure à tendance lamellaire; existent aussi des figures de redistribution mais qui ne semblent pas correspondre à un processus actuel.

## Chapitre VI

# Analyse du spectre poral par la porosimétrie à mercure

Afin de compléter la caractérisation de l'organisation des sols andiques et du sol brun acide, notamment l'étude de l'espace poral, une autre technique a été mise en oeuvre : la porosimétrie à mercure.

Cette méthode permet de déterminer et de quantifier la répartition du volume poral en fonction de la taille des pores, sur une gamme de pores accessibles à des rayons de constriction compris entre 150  $\mu\text{m}$  et quelques nm.

## 1. Méthode et mode de présentation des résultats

### 1.1 Méthode

Cette méthode a été décrite de manière détaillée dans des travaux récents, notamment Pellerin (1980), Fies (1984), Bruand (1985), Romero de Carvalho (1990). Nous n'en rappellerons donc que les principaux traits.

#### Principe

La méthode de porosimétrie à mercure consiste à mesurer simultanément la pression nécessaire pour introduire le mercure dans les pores d'un échantillon déshydraté, et le volume de mercure introduit à chaque pression (Lawrence, 1977), ce depuis les basses pressions vers les hautes pressions. Selon le formalisme de Jurin, repris par Vachier et al. (1979), et pour des pores cylindriques, on peut relier le rayon de constriction des pores,  $R_c$ , à la pression,  $P$ , nécessaire pour que le mercure entre dans le pore, par la relation :

$$R_c = - 2 \gamma \cos \theta / P \quad (1)$$

avec  $\gamma$  : tension superficielle du mercure dans le vide;

$\theta$  : angle de raccordement du ménisque à l'interface mercure-solide.

La valeur adoptée pour l'angle  $\theta$  est de  $130^\circ$ , celle adoptée pour la tension superficielle  $\gamma$  est de 0,484 N.m<sup>-1</sup> (Fies, 1984). En conséquence, la relation (1) devient :  $R_c = - 622 \cdot 10^{-3} / P$ , avec  $R_c$  exprimé en  $\mu\text{m}$  et  $P$  exprimé en MPa.

#### Echantillonnage et conditions de réalisation des mesures

Cette étude a été réalisée sur quatorze volumes pédologiques à savoir : les volumes AN1 à AN6 de l'andosol, les volumes K1 et K2 des rankers andiques, les volumes BA1 à BA6 du Sol Brun acide. Une à trois répétitions ont été réalisées par volume pédologique étudié.

Les échantillons sont constitués de petites mottes de 1 à 2 cm<sup>3</sup>, préalablement déshydratés par séchage à l'air puis à l'étuve à 105°C durant 24 h, et dégazées sous vide.

Les mesures d'injection de mercure sont effectuées d'abord dans un poste dit "de basse pression" où la montée en pression, inférieure ou égale à la pression atmosphérique, est ajustée manuellement, puis dans un poste dit "de haute pression" où les mesures sont entièrement automatisées. Ces mesures ont été

réalisées au centre SESCOF d'Orléans avec un porosimètre Micromeritics Pore Sizer 9310, qui permet d'atteindre une pression maximale de 192 MPa ( $R_c$  correspondant : 3,25 nm). Si la pression maximale appliquée est toujours la même d'une mesure à l'autre, il n'est pas évident d'ajuster manuellement la plus basse pression à une même valeur d'une fois sur l'autre : sur la série de mesures, la valeur minimale de pression de mercure appliquée varie de 1926 à 3725 Pa ( $R_c$  correspondant de 323 à 167  $\mu\text{m}$ ). Pour comparer les différentes mesures entre elles, on considérera les volumes de mercure injecté pour des pressions variant de 4147 à 192 MPa, soit pour des rayons de constriction de pores correspondants compris entre 150  $\mu\text{m}$  et 3,25 nm.

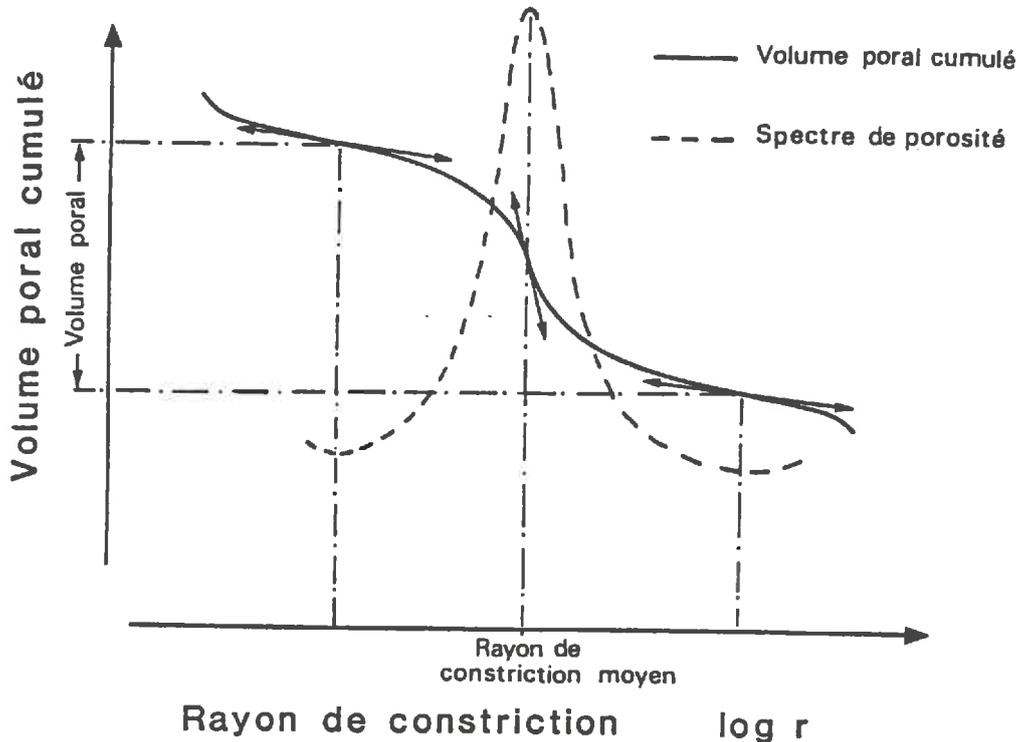


Fig. VI.1 Schéma représentant la façon dont est définie une classe de pores, son volume poral, et le rayon de constriction modal correspondant (d'après Bruand, 1985).

## 1.2 Mode de présentation des résultats

Deux modes de représentation graphique sont utilisés : la courbe de volume poral cumulé et la courbe de distribution des volumes poraux encore nommée "spectre de porosité", qui est la dérivée de la précédente (Fig.VI.1). Toutes deux sont exprimées en fonction du rayon de constriction des pores,  $R_c$ . Afin de comparer plus aisément les courbes de volume cumulé, celles-ci ont été construites à partir du plus faible rayon de constriction (Coulon et Bruand (1989), Romero (1990)).

Les courbes obtenues montrent la présence de plusieurs classes de taille de pores.

Chaque point d'inflexion sub-vertical sur la courbe de volume poral cumulé, indique un maximum d'intrusion du mercure; il correspond à un pic sur la courbe du spectre de porosité.

A l'inverse, chaque point d'inflexion sub-horizontale sur la courbe de volume poral cumulé indique un minimum d'intrusion de mercure ; il sépare donc deux classes de pores.

Les volumes poraux sont exprimés en indice des vides (noté  $E = V_v/V_s$ ).

L'analyse des deux types de courbes permet de connaître, pour chaque échantillon analysé :

- le volume total de pores accessibles à des rayons de constriction compris entre 167 microns et 3,25 nm;
- la répartition de ce volume en différentes classes de pores. Chacune d'entre elles peut être définie par :
  - son rayon équivalent modal : il correspond à un point d'inflexion "sub-vertical" sur la courbe cumulée, soit à un maximum sur le spectre de porosité;
  - ses limites de taille : elles correspondent aux points d'inflexion horizontaux de la courbe cumulée et sont représentées par des minima sur le spectre de porosité.
  - son volume poral correspondant : compris entre les 2 points d'inflexion "horizontaux".

## 1.3 Avantages et limites de cette technique

La porosimétrie à mercure permet d'analyser une large gamme de pores de Rc compris entre 150 à 300  $\mu\text{m}$  à quelques nanomètres. Cependant la porosité analysée ici ne comprend ni la porosité la plus grossière ( $R_c > 150$  à 300  $\mu\text{m}$ ), ni la porosité la plus fine ( $< 3,25$  nm).

Elle n'informe pas sur la géométrie des pores (forme, distribution spatiale); les observations qualitatives au microscope permettent d'avoir accès à ces caractères et sont à ce titre complémentaires.

La loi de Jurin ne s'applique rigoureusement qu'à un système de pores de forme simple et régulière (capillaires cylindriques). Or lorsque les pores présentent des étranglements, le mercure ne peut accéder à ces pores qu'à partir d'une pression qui dépend de la taille de ces constriction. Du fait de ce phénomène "bouteille d'encre", la taille réelle des pores pénétrés par le mercure à une pression donnée risque d'être sous-estimée (plus grande que le rayon de constriction). La porosimétrie à mercure donne donc plutôt une distribution du volume poral en fonction de la taille des constriction.

Le spectre poral analysé correspond à un *état d'organisation particulier* : celui d'échantillons séchés à 105°C. Or, pour des matériaux non rigides, la géométrie de l'espace poral peut varier selon l'état d'hydratation (chap.VII). Par conséquent, le spectre poral, tel qu'il est défini sur échantillon séché à 105°C, peut différer de celui existant à l'état frais par exemple.

## 2. Analyse du spectre poral dans les deux types de sols

### 2.1 Grands traits distinctifs des sols andiques et du sol brun acide

Les figures VI.2, VI.3, VI.4 représentent les courbes de volume poral cumulé (exprimé sous forme d'indice de vide) en superposition avec les spectres de porosité, respectivement pour les horizons du sol brun acide, pour ceux de l'andosol, et pour ceux du ranker andique. Pour les courbes, les traits pleins correspondent aux moyennes des mesures et les traits non pleins aux différentes répétitions.

Les tableaux VI.1, VI.2, VI.3 donnent les caractéristiques des classes de pores définies respectivement pour le sol brun acide, l'andosol, et le ranker andique.

Deux caractères essentiels distinguent les sols andiques (andosol et ranker andique) et le sol brun acide :

- la *quantité du volume poral total*, accessible à des rayons compris entre 150  $\mu\text{m}$  et 3,25 nm;
- la répartition de ce volume poral total sur cette gamme de pores : *l'allure du spectre poral*.

#### 2.1.1 Le volume poral total

Le volume poral total exploré par le mercure est nettement plus important dans les sols andiques que dans le sol brun acide :

- supérieur à 1,0 dans l'ensemble des horizons des sols andiques (Fig. VI.3; Fig.VI.4), il varie de 1,02 dans l'horizon AN6 profond à 1,73 dans l'horizon AN1 superficiel.
- inférieur à 1,1 dans l'ensemble des horizons du sol brun acide (Fig.VI.2), il varie de 0,60 dans l'horizon BA5 à 1,13 dans l'horizon BA3 microagrégé.

#### 2.1.2 L'allure du spectre poral, la répartition du volume poral

La répartition du volume poral diffère nettement dans le sol brun acide et dans les sols andiques (Figures VI.2,VI.3,VI.4).

Dans le sol brun acide, quels que soient les horizons, la courbe de volume poral cumulé présente 2 *nets maxima d'intrusion de mercure* séparés par une tangente horizontale. Ces maxima correspondent sur la courbe dérivée à 2 *pics nets et bien séparés* (Fig.VI.2).

Ces horizons du sol brun acide, présente donc une nette répartition en 2 classes de pores, chacune étant bien définie par un rayon équivalent modal et des limites nettes. On définit une classe 1 aux plus forts Rc, une classe 2 à des Rc plus faibles, une troisième classe étant ébauchée aux plus faibles rayons de constriction.

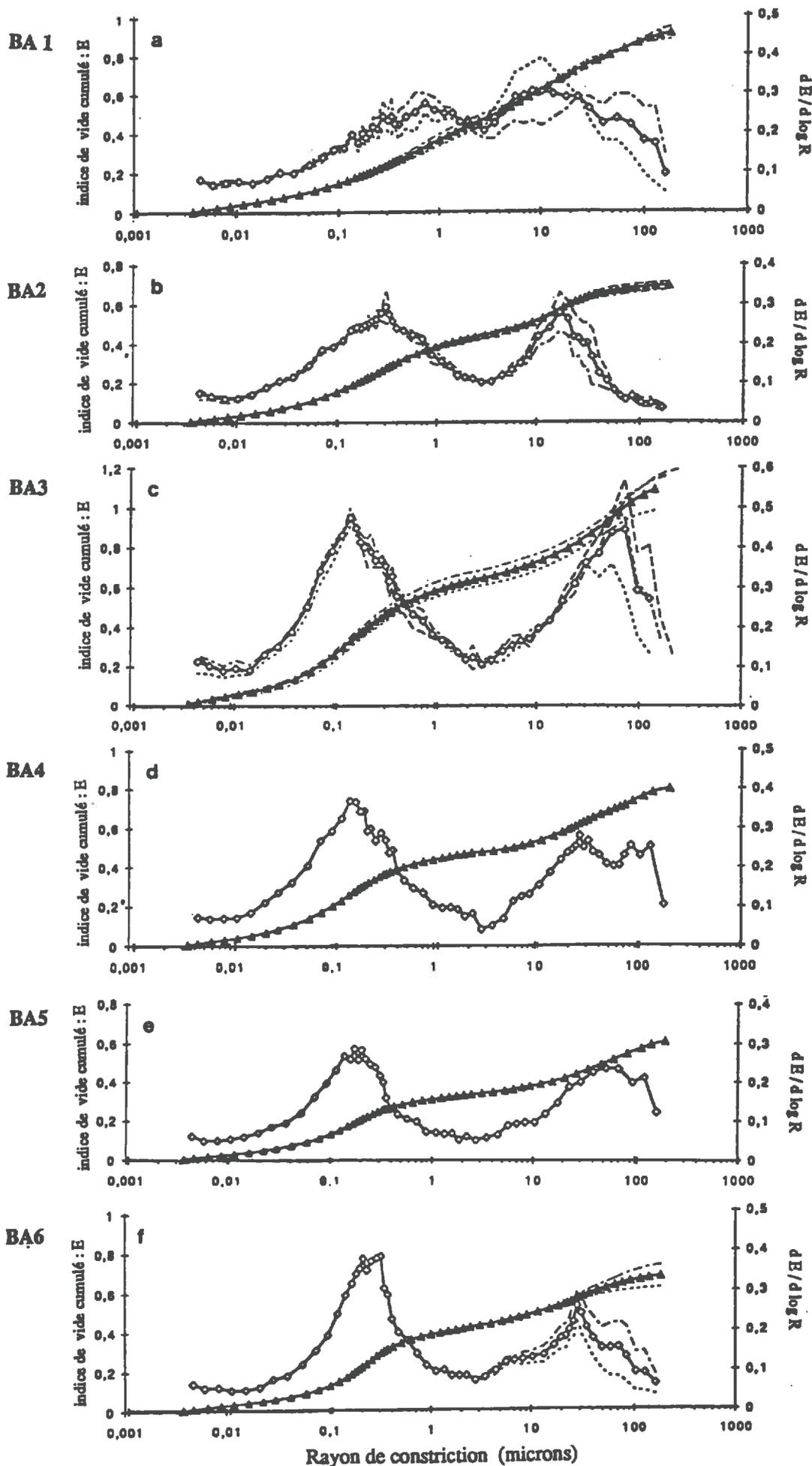


Fig. VI.2 : Indice de vide cumulé (  $\blacktriangle$  ) et spectre de porosité (  $\diamond$  ) en fonction du rayon de constriction des pores pour les 6 horizons du sol brun acide : BA1 (a), BA2 (b), BA3 (c), BA4, (d), BA5 (e), BA6 (f) - moyennes et répétitions - Echantillons centimétriques déshydratés par séchage à 105°C.

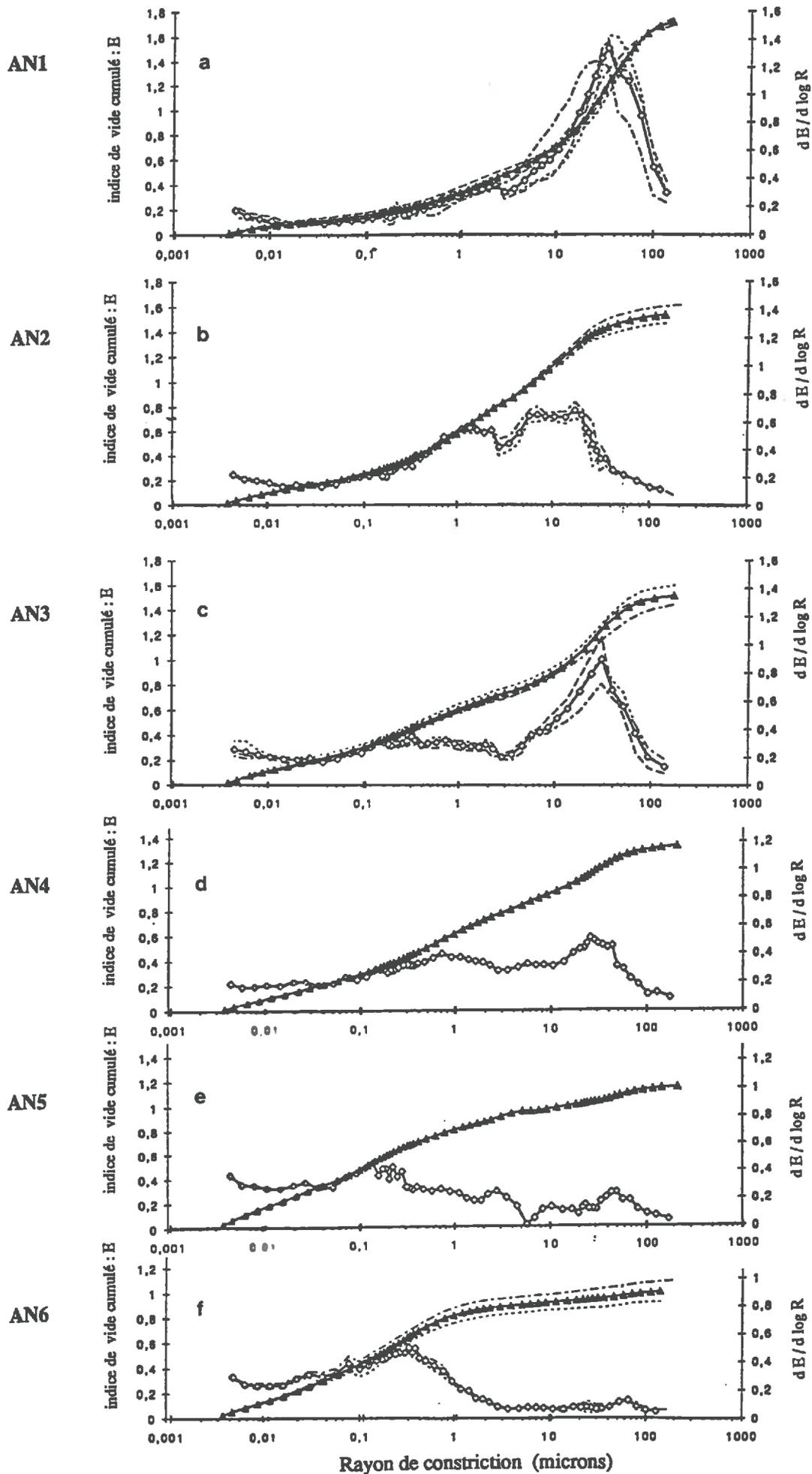


Fig. VI.3 : Indice de vide cumulé (  $\blacktriangle$  ) et spectre de porosité (  $\diamond$  ) en fonction du rayon de constriction des pores pour les 6 horizons de l'andosol : AN1 (a), AN2 (b), AN3 (c), AN4, (d), AN5 (e), AN6 (f) - moyennes et répétitions - Echantillons centimétriques déshydratés par séchage à 105°C.

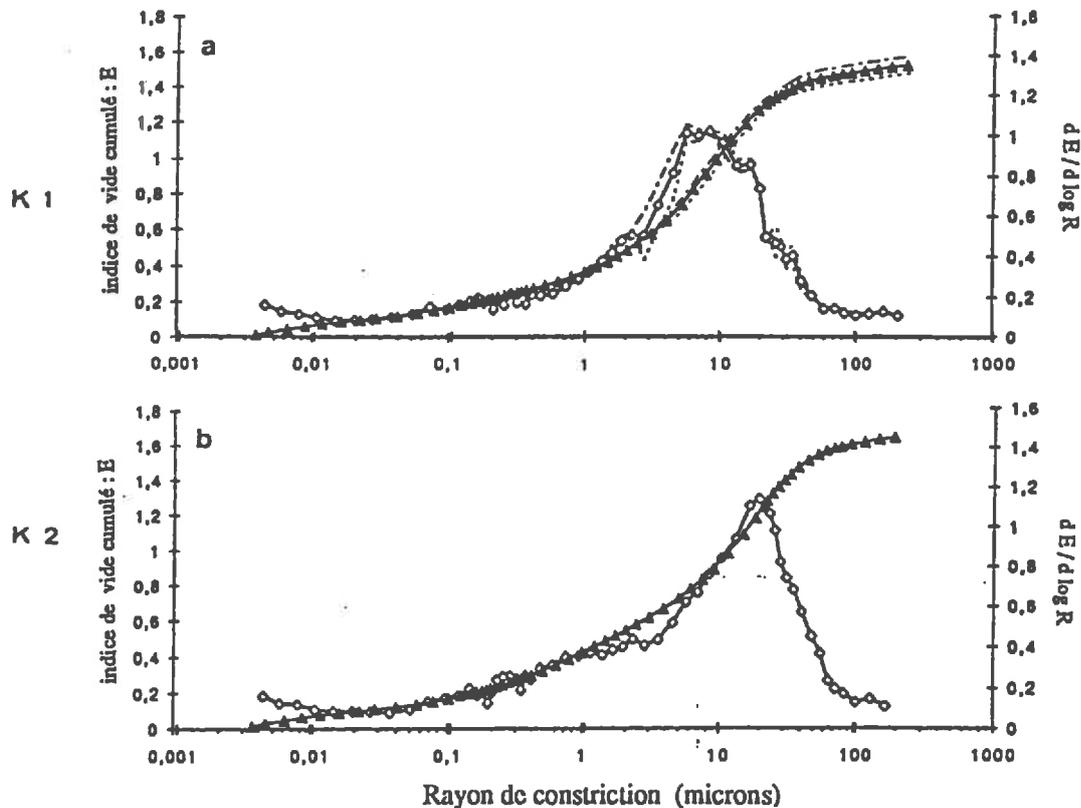


Fig. VI.4 : Indice de vide cumulé ( ▲ ) et spectre de porosité ( ◇ ) en fonction du rayon de constriction des pores pour les 2 horizons du ranker andique : K1 (a), K2 (b)- moyennes et répétitions -. Echantillons centimétriques déshydratés par séchage à 105°C.

Dans les sols andiques, l'allure de la courbe de volume poral cumulé est nettement différente. Selon les horizons, on observe soit un seul maximum d'intrusion, soit 2 maxima mais mal "séparés" (Fig.VI.3).

° Le plus souvent *un seul maximum d'intrusion* sur la courbe cumulée :

- à de *forts rayons de constriction pour les horizons superficiels* : AN1 de l'andosol (Fig.VI.3a), K1 et K2 des rankers andiques (Fig.VI.4)

- à de *faibles rayons de constriction pour les horizons profonds* : AN5 et AN6 (Fig.VI.3e, Fig.VI.3f)

La courbe dérivée est ainsi essentiellement marquée par un seul mode net :

- sous forme de *pic dans les horizons superficiels* (Fig.VI.3a et Fig.VI.4) permettant de définir un rayon modal.

- sous forme de *"bosse" dans les horizons profonds* (Fig.VI.3e,3f) permettant de définir seulement un rayon moyen plutôt qu'un rayon modal.

C'est à dire que *ces horizons superficiels et profonds sont caractérisés par une distribution quasi unimodale de la porosité*

° *deux maxima d'intrusion* dans les horizons intermédiaires (AN2 à AN4) définissant 2 classes de pores; *mais ces maxima sont mal séparés* par une tangente horizontale peu nette (Fig.VI.3b, VI.3c, VI.3d).

Ils correspondent sur la courbe dérivée à deux "modes" :

- un *pic aux plus forts rayons de constriction* : définissant une classe 1 bien caractérisée par son rayon modal,

- à une *"bosse" aux rayons de constriction plus faibles* : illustrant une classe 2 définie par son rayon moyen.

*C'est à dire que ces volumes intermédiaires andiques sont caractérisés par une distribution bimodale de la porosité mais ces 2 classes sont "mal individualisées".*

Par analogie avec ces volumes intermédiaires, la classe de porosité majeure des horizons superficiels sera nommée : classe 1, celle des horizons profonds : classe 2. Pour tous ces horizons andiques, une troisième classe est ébauchée aux plus faibles rayons de constriction (classe 3).

Finalement, si dans le sol brun acide, la distribution du volume poral est nettement bimodale, dans les sols andiques, la distribution est soit quasi unimodale, soit bimodale peu marquée avec des classes 1 et 2 mal individualisées.

Tab. VI.1 : Sol Brun Acide - Rayon de constriction (Rc) modal et volume de pore (E) correspondant pour chacune des classes 1, 2 et 3.

Echantillon	Indice de Vide Total Hg 148 mic. à 3,3 nm	Limite supérieure imposée (microns)	CLASSE 1		Limite Classe 1-2 mic.	CLASSE 2		Limite Classe 2-3 mic.	CLASSE 3		Limite inférieure imposée nm.
			Rc microns	E cc/cc		Rc microns	E cc/cc		Rc mic.	E cc/cc	
BA1 (2 rép.)	0,9034 (0,8742 à 0,9326)	148	RM	0,4345	2,769 (pF2,73)	RM	0,7155	0,009 (pF5,22)	<3,3nm	0,0341	3,3nm
			10,38 (pF2,15)	48,10%		0,4347 (pF3,32)	48,12%				
BA2 (3 rép.)	0,6933 (0,6698 à 0,7108)	148	RM	0,2452	3,1096 (pF2,68)	RM	0,3034	0,009 (pF5,22)	<3,3nm	0,0295	3,3nm
			16,86 (pF1,94)	35,36%		0,4186 (pF3,69)	60,38%				
BA3 (3 rép.)	1,1304 (0,9946 à 1,1653)	148	RM	0,4874	2,7475 (pF2,73)	RM	0,1351	0,01031 (pF5,16)	<3,3nm	0,0531	3,3nm
			63,21 (pF1,37)	43,12%		0,59 (pF4,04)	52,19%				
BA4 (1 rép.)	0,7901	148	RM	0,3158	2,7046 (pF2,73)	RM	0,1448	0,0077 (pF5,28)	<3,3nm	0,0258	3,3nm
			27,21 (pF1,74)	39,96%		0,1448 (pF4,01)	56,76%				
BA5 (1 rép.)	0,6054	148	RM	0,2684	2,4486 (pF2,78)	RM	0,1782	0,0067 (pF5,34)	<3,3nm	0,0178	3,3nm
			61 (pF1,38)	44,33%		0,319 (pF3,92)	52,69%				
BA6 (2 rép.)	0,6683 (0,6197 à 0,7229)	148	RM	0,2446	2,7653 (pF2,73)	RM	0,2434	0,01031 (pF5,16)	<3,3nm	0,0304	3,3nm
			28,32 (pF1,72)	36,60%		0,3933 (pF3,78)	58,85%				

Tab. VI.2 : Andosol - Rayon de constriction (Rc) modal et volume de pore (E) correspondant pour chacune des classes 1, 2 et 3.

Echantillon	Indice de Vide Total Hg 148 mic. à 3,3 nm	Limite supérieure imposée (microns)	CLASSE 1		Limite Classe 1-2 mic. E=1,6251	CLASSE 2		CLASSE 3		Limite inférieure imposée nm.
			Rc microns	E cc/cc		Rc microns	E cc/cc	Rc mic.	E cc/cc	
AN1 (3rep)	1,7292 (1,6982 à 1,7533)	148	RM=34,2 mic	et	2,756 (pF2,73)	soit	93,98%	<3,3nm	0,1041 6%	3,3nm
			34,18 (pF1,64)	1,2564 72,66%		Rm 1,2300 (pF3,08)				
AN2 (2 rep)	1,5345 (1,4664 à 1,6026)	148	Rm	0,7116 46,37%	3,104 (pF2,68)	Rm	0,6689 43,59%	<3,3nm	0,154 10,04%	3,3nm
			10,32 (pF2,16)	1,3436 (pF3,04)		1,3436 (pF3,04)				
AN3 (3 rép)	1,515 (1,4441 à 1,5965)	148	Rm	0,7825 51,65%	3,126 (pF2,68)	Rm	0,5434 35,87%	<3,3nm	0,1891 12,48%	3,3nm
			30,36 (pF1,7)	0,4617 (pF3,51)		0,4617 (pF3,51)				
AN4 (2 rep)	1,3111 (1,3046 à 1,3175)	148	Rm	0,5346 40,78%	3,04 (pF2,69)	Rm	0,6732 51,34%	<3,3nm	0,1033 7,88%	3,3nm
			29,2 (pF1,7)	0,8022 (pF3,27)		0,8022 (pF3,27)				
AN5 (1 rep)	1,1312	148	Rm	0,1826 16,14%	6,32 (pF2,37)	Rm	0,7491 66,22%	<3,3nm	0,1995 17,64%	3,3nm
			49,1 (pF1,5)	0,154 (pF3,98)		0,154 (pF3,98)				
AN6 (2 rep)	1,0184 (0,9360 à 1,1007)	148	Rm	0,1201 11,79%	3,996 (pF 2,57)	Rm	0,769 75,51%	<3,3nm	0,1293 12,70%	3,3nm
			58,4 (pF1,4)	0,2729 (pF3,73)		0,2729 (pF3,73)				

Tab. VI.3.: Ranker Andique - Rayon de constriction (Rc) modal et volume de pore (E) correspondant pour chacunes des classes 1, 2 et 3.

Echantillon	Indice de Vide Total Hg 148 mic. à 3,3 nm	Limite supérieure imposée (microns)		CLASSE 1		Limite Classe1-2 mic.		CLASSE 2		Limite Classe2-3 mic.		CLASSE 3		Limite inférieure imposée nm.	
		Rc microns	E cc/cc	Rc microns	E cc/cc	Rc microns	E cc/cc	Rc mic.	E cc/cc	Rc mic.	E cc/cc	Rc mic.	E cc/cc		
K1 (2rep)	1,5123 1,4627 à 1,5619	148	RM=8,38 mic et	1,225	RM=8,38 8,38 (pF2,24)	80,01%	E=1,4224 0,4597 (pF3,51)	soit	94,05%	Rm 0,2711 (pF3,08)	0,1914	13,05%	0,01946 (pF4,89)	<3,3nm (pF<5,66)	0,0899 5,95%
			19,73	1,0313					93,67%						
K2 (1 rep)	1,6256	148 vral 130	RM=19,73 mic et	1,0313	RM=19,73 19,73 (pF1,88)	63,44%	E=1,5227 2,7939 (pF2,72)	soit	93,67%	1,0001	0,4914	30,23%	0,0261 (pF4,75)	<3,3nm (pF<5,66)	0,1029 6,33%

## 2.2. Comparaison des volumes les plus microagrégés des deux types de sol

Dans les figures VI.5, les 2 volumes microagrégés des 2 types de sol (AN3 et BA3) sont représentés sur un même graphe (Fig.VI.5a: volume poral cumulé et Fig.VI.5b: spectre de porosité).

La comparaison des courbes (Fig.VI.5) permet de "fixer" d'emblée les convergences / divergences entre "horizons microagrégés" des 2 types de sols. On retrouve sur les figures relatives à ces horizons les résultats généraux précédemment évoqués :

Le volume poral total accessible par la porosimétrie à mercure (à des rayons de constriction compris entre 148  $\mu\text{m}$  et 3,3 nm) est plus faible dans l'horizon BA3 ( $E_{tHg} = 1,13$ ) : il ne représente que 73 % du volume poral de l'horizon microagrégé de l'andosol AN3 ( $E_{tHg} = 1,53$ ).

Les deux horizons présentent une répartition de la porosité en 3 classes de pores : classes 1, 2 et 3, mais l'allure et le "degré de séparation" des classes 1 et 2 varie sur la courbe dérivée (Fig.VI.5b) :

- dans le volume microagrégé du sol brun acide, BA3 les classes 1 et 2 sont nettement définies par 2 pics bien séparés par un minimum sur le spectre de porosité, ;

- dans le volume microagrégé de l'andosol, AN3, si la classe 1 est bien définie par un pic sur le spectre de porosité, la classe 2 n'apparaît que sous forme de "bosse" ce qui témoigne de l'absence d'un net "rayon modal", et de l'étalement des rayons de constriction de cette classe 2 dont on ne peut finalement définir que un rayon de constriction "moyen". Par ailleurs, il n'y a pas de minimum net entre les 2 classes de pores, la classe 2 est "peu individualisée" de la classe 1 : la porosité entre les classes 1 et 2 est plus "continue".

Les différentes classes de porosité peuvent être interprétées comme suit :

- d'après les observations menées au microscope optique, la *classe 1* correspond à la *porosité inter-agrégat* d'origine biologique et structurale;

- la *classe 2* peut être interprétée comme la *porosité intra-agrégats*. (elle correspondrait à un "arrangement des particules" grossières de la taille des limons dans BA3 ).

- la *classe 3* est interprétée comme la *porosité inter-particules* (de la taille des argiles).

On comparera ici successivement chaque classe de porosité.

### 2.2.1 La classe 1 : porosité Inter-agrégat

Pour les deux horizons, AN3 et BA3, la *limite inférieure* de cette classe se situe aux alentours de 2,7 - 3  $\mu\text{m}$ . Ces pores inter-agrégats sont caractérisés par un *rayon modal 2 fois plus grand dans BA3* ( $R_{cl.1} = 63 \mu\text{m}$ ) que dans AN3 ( $R_{cl.1} = 30 \mu\text{m}$ ). Le *volume poral* leur correspondant est 1,6 fois *plus faible dans BA3* ( $E_{cl.1} = 0,49$ ) par rapport à celui de AN3 ( $E_{cl.1} = 0,78$ ).

### 2.2.2 La classe 2 : porosité Intra-agrégats

La porosité intra-agrégats s'étend sur une *gamme de taille plus grande dans BA3* (limite inférieure 10 nm) par rapport à AN3 (limite inférieure 26 nm).

Elle présente un *rayon modal plus faible dans BA3* ( $R_{cl.2} = 0,13 \mu\text{m}$ ) par rapport à celui de AN3 ( $R_{cl.2} = 0,46 \mu\text{m}$ ). Le *volume poral* correspondant est *par contre légèrement supérieur dans BA3* ( $E_{cl.2} = 0,59$ ) par rapport à celui de AN3 ( $E_{cl.2} = 0,54$ ).

### 2.2.3 La classe 3 : porosité liée aux particules élémentaires de la taille des argiles

La limite supérieure de cette classe 3 correspond à un  $R_c$  2 fois plus faible dans l'horizon BA3 (10,3 contre 26 nm).

Nous ne disposons pas de la limite inférieure réelle de cette classe : elle est inférieure au rayon de constriction minimal (3,25 nm) accessible à l'entrée de mercure avec l'appareil utilisé.

Le volume poral correspondant aux pores de  $R_c$  compris entre la limite (réelle) supérieure de cette classe 3 et la limite de 3,25 nm imposée par les techniques utilisées, ne représente donc qu'une partie du volume poral total de cette classe 3 de pores inter-particules : on parlera de volume partiel. Il donne cependant une indication relative et permet de comparer les différents échantillons.

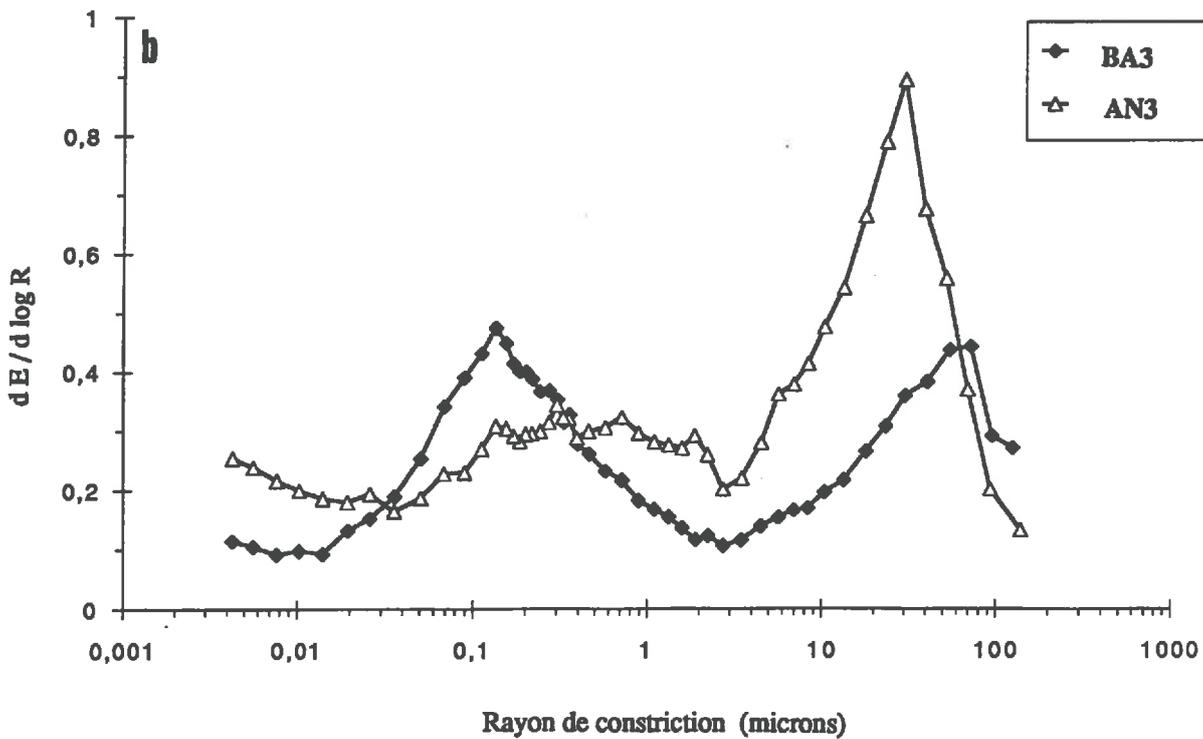
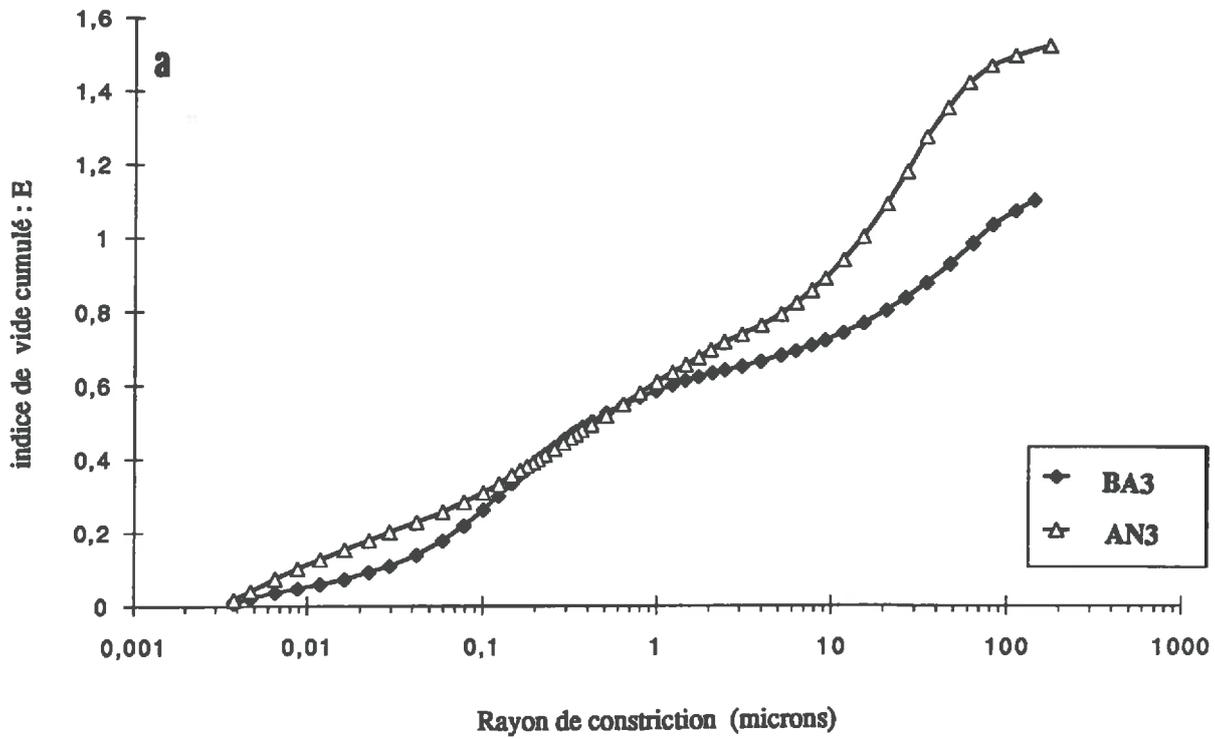


Fig. VI.5 : Comparaison des indices de vide cumulés (a) et des spectres de porosité (b) des horizons les plus microagrégés de l'andosol (AN3) et du sol brun acide (BA3).

Ce volume poral partiel de la classe 3 est presque 4 fois plus faible en volume dans BA3 ( $E = 0,053$ ) par rapport à celui de AN3 ( $E = 0,19$ ); l'importance de cette différence ne peut être simplement imputée à une plus grande "étendue" de cette classe de pores dans le volume AN3

*Le volume poral des 3 classes de pores : inter-agrégats, intra-agrégats, argile, rapporté au volume poral total accessible par la porosimétrie à mercure pour chacun des 2 horizons microagregés des 2 types de sol est reporté dans le tableau ci-après :*

Volume des classes de pores en % du volume total exploré (entre 150 $\mu\text{m}$ et 3,25 nm)	Classe 1 Porosité Inter-agrégats	Classe 2 Porosité Intra-agrégats	Classe 3 Porosité liée à l'arrangement des argiles
Horizon BA3	43,1%	52,2 %	4,7 %
Horizon AN3	51,6 %	35,9 %	12,5 %

Ces résultats concordent avec :

- Les observations macro- et micromorphologiques : on a observé une porosité inter-agrégat (classe 1) plus grossière mais de volume plus faible dans BA3 par rapport à AN3.
- Les résultats des analyses RX et extractions sélectives : les constituants (classe 3) sont moins organisés et plus poreux dans AN3 (constituants "amorphes", métahalloysite) par rapport à ceux de BA3 (Kaolinite, Micas, Intergrades).

## 2.3. Evolution verticale du spectre poral au sein des 2 types de sol

### 2.3.1 Dans l'andosol

Le volume poral total  $E_{tHg}$  varie de 1,02 à 1,73 dans l'andosol (Tab.VI.2). Deux groupes d'horizons se distinguent nettement :

- les horizons profonds (AN5, AN6) à faible volume poral :  $E_{tHg}$  de 1,02 à 1,13;
- les 3 horizons supérieurs (AN1 à AN3) à fort volume poral :  $E_{tHg}$  de 1,51 à 1,73;
- l'horizon AN4 étant intermédiaire :  $E_{tHg}$  de 1,31.

L'allure du spectre poral évolue aussi nettement dans le profil (Fig.VI.3) :

- dans les horizons profonds AN5 et AN6 : la classe 1 est quasiment absente;
- dans les horizons intermédiaires (AN2, AN3, AN4) : les classes 1 et 2 sont bien définies, la première étant cependant plus nettement définie par un rayon modal que la seconde;
- dans le volume superficiel AN1, la classe 2 est quasi-absente.

Les limites de classes : la limite entre les classes 1 et 2 évolue peu : autour de 3  $\mu\text{m}$ ; la limite entre les classes 2 et 3 est un peu plus élevée pour les 3 horizons supérieurs (26 nm) par rapport à celle des 3 horizons inférieurs (10 à 14 nm).

Cette évolution verticale est *bien corrélée avec l'évolution de la structure* : notamment pour la porosité inter-agrégat (classe 1) et de la porosité intra-agrégats (classe 2), des horizons profonds vers les horizons superficiels :

#### a) Les horizons profonds AN5 et AN6

Ils sont caractérisés par la quasi-absence de *porosité inter-agrégats* : celle-ci, grossière (49 et 58  $\mu\text{m}$ ), présente un faible volume poral ( $E_{c11} = 0,12$  à 0,18); elle constitue seulement 12 à 18 % de la porosité totale.

Le volume de la *porosité intra-agrégats*, fine (0,27 à 0,15  $\mu\text{m}$ ), est en revanche fort ( $E_{c12} = 0,77$  à 0,75) . Cette porosité constitue environ 70 % de la porosité totale explorée par le mercure.

b) Dans l'horizon AN4

La *porosité inter-agrégats* se développe brusquement avec un rayon modal de 29  $\mu\text{m}$  et un volume de 0,53 (=  $E_{c1.1}$ ); elle reste cependant minoritaire par rapport au volume total dont elle constitue 41 %.

La *porosité intra-agrégats*, quant à elle, relativement grossière (0,8  $\mu\text{m}$ ), diminue en volume ( $E_{c1.2}=0,54$ ), mais constitue encore 50 % de la porosité totale explorée par le mercure.

c) Dans l'horizon AN3

La *porosité inter-agrégat* devient dominante; son rayon modal est de 30  $\mu\text{m}$  et son volume de 0,78 (=  $E_{c1.1}$ ); elle constitue plus de 50 % du volume poral total.

Le volume de la *porosité intra-agrégats* diminue à 0,54 (=  $E_{c1.2}$ ); son rayon modal est faible: 0,46  $\mu\text{m}$ . Elle ne constitue plus que 36 % du volume total.

d) Dans l'horizon AN2

La *porosité inter-agrégat* devient pratiquement "continue" avec la porosité intra-agrégats. Son rayon modal diminue à 10  $\mu\text{m}$ ; son volume reste fort ( $E_{c1.1}=0,71$ ) en proportion équivalente (46 %) avec le volume de la *porosité intra-agrégats* ( $E_{c1.2} = 0,67$ ) dont le rayon modal augmente à 1,3  $\mu\text{m}$ .

e) Dans l'horizon superficiel AN1

La *porosité inter-agrégat* est plus grossière ( $R = 36 \mu\text{m}$ ) que dans le volume AN3 microagregé; elle est très importante en volume :  $E_{c1.1} = (1,25 \text{ à } 1,62)$ , et représente (73 à) 94 % de la porosité totale explorée par le mercure.

La *porosité intra-agrégats* quant à elle, a quasiment disparu.

## Discussion

*L'évolution de la porosité inter-agrégat correspond bien à l'évolution des structures observée en lames minces au microscope optique :*

- les horizons profonds (AN5, AN6) ne présentent pas de structure microagregée mais une porosité grossière faible et essentiellement fissurale;
- la structure microagregée commence à se développer dans l'horizon AN4;
- elle atteint son plein développement dans l'horizon AN3
- dans l'horizon AN2, la structure microagregée est toujours très développée, mais l'assemblage des microagregats est plus "serré",
- enfin, l'horizon superficiel AN1 est caractérisé par un assemblage très lâche de pellets ménageant entre eux une porosité large.

Quant à la *porosité intra-agrégats*, du fait de sa petite taille ( $R_c < 3,7 \mu\text{m}$ ), elle n'a pu être observée au microscope optique. Des observations à des grossissements supérieurs (MEB) seraient nécessaires pour mieux comprendre l'évolution verticale de porosité représentée par la classe 2.

*La porosité la plus fine inter-particules* (classe 3) reste toujours relativement importante puisque son volume varie de 0,10 à 0,20 E.

### 2.3.2 Dans les rankers andliques

Le volume poral total ( $E_{tHg} = 1,51$  et 1,62) est comparable à celui des volumes supérieurs (AN1 à AN3) de l'andosol (Tab. VI.3).

L'allure du spectre poral (Fig. VI.4) est très proche de celle de l'horizon AN1 de l'andosol; ces horizons présentent aussi une classe 1 dominante, une classe 2 quasi-absente, et une classe 3.

De faibles différences apparaissent cependant par rapport à l'horizon AN1 de l'andosol, pour la classe 1 :

- Pour les horizons du ranker, *la limite supérieure de cette classe 1* est observable : elle correspond à un rayon de constriction de 95  $\mu\text{m}$ . Dans le cas de horizon AN1 de l'andosol, cette limite supérieure de la classe 1 est plus grande que la limite de 148  $\mu\text{m}$  accessible par la technique de porosimétrie à mercure
- Le *rayon de constriction modal* de cette classe 1 est plus faible dans les rankers, notamment dans K1 (8  $\mu\text{m}$  dans K1, 20  $\mu\text{m}$  dans K2 contre 34  $\mu\text{m}$  dans AN1).

- *Le volume correspondant* est un peu plus faible : 1,42 à 1,52 E (contre 1,62 dans l'horizon AN1 de l'andosol). Ceci explique la différence dans le volume poral total. Cette classe de pores représente comme dans l'horizon AN1 de l'andosol 94 % du volume poral total.

### Discussion

Ces résultats concernant la classe 1 de pores inter-agrégats sont ici aussi bien corrélés avec les observations micromorphologiques : porosité inter-agrégat plus fine et de plus faible volume dans les horizons du ranker par rapport à celle de l'horizon AN1 de l'andosol.

#### 2.3.3 Dans le sol brun acide

Le volume poral total  $E_{tHg}$  varie de 0,60 à 1,13. La valeur minimale correspondant aux horizons profonds (BA5 et BA6) et l'horizon de subsurface BA2 tassé; la valeur maximale correspondant à l'horizon BA3 microagrégué (Tab. VI.1).

L'allure du spectre poral évolue peu dans le profil : *trois classes de pores* sont *toujours* nettement représentées. Les variations verticales minimales dans l'allure du spectre poral concernent notamment :

- *la plus ou moins grande séparation des classes 1 et 2* : l'horizon BA1 est caractérisé par rapport aux autres horizons par une faible individualisation des classes 1 et 2 (Fig. VI.1a).
- l'existence de " sous pics " pour la classe 1 : notamment dans l'horizon BA4.
- *l'allure plus ou moins étroite du pic de la classe 2* : ce pic est plus large dans les 2 horizons supérieurs, plus aigu en profondeur. Le rayon modal est donc de mieux en mieux défini vers les horizons profonds.

Finalement, dans ce sol Brun Acide : les variations sont relativement faibles. Il n'y a pas d'évolution significative selon la profondeur.

- l'horizon BA3 microagrégué se distingue des autres horizons : par un volume poral plus élevé pour chacune des 3 classes de pores, et notamment pour la classe 2, et par la taille des rayons modaux : il présente le plus fort rayon de constriction pour la classe 1 et le plus faible rayon de constriction pour la classe 2.

- l'autre horizon intermédiaire BA4, est proche de l'horizon BA3 microagrégué : même rayon de constriction modal pour la classe 2 et rayon de constriction moyen proche pour la classe 1; la différence réside dans la valeur du volume poral qui est toujours plus faible dans l'horizon BA4 (rapports 1,54; 1,32 et 2,06, respectivement pour les classes 1, 2 et 3).

- Les 2 horizons superficiels (BA1 et BA2) se rapprochent l'un de l'autre par le rayon de constriction de la classe 1, le volume poral de la classe 2; ils diffèrent l'un de l'autre : par le rayon de constriction de la classe 2 qui est plus grand en BA2, mais surtout par le volume poral de la classe 1 qui est plus élevé en BA1.

- les horizons profonds (BA5 et BA6) sont très proches l'un de l'autre; ils diffèrent cependant : pour la classe 1, par un rayon de constriction et un volume plus forts dans l'horizon BA5; inversement, pour la classe 2 : le rayon de constriction et le volume poral sont plus élevés dans l'horizon BA6.

On note une certaine convergence entre les horizons qui présentent les plus faibles volumes poraux totaux, à savoir entre l'horizon BA2 tassé de surface et l'horizon BA6 profond. Ils présentent des volumes poraux très proches pour chacune des classes de pores; en revanche, ces 2 horizons diffèrent par la valeur du rayon de constriction de la classe 1 plus faible dans l'horizon BA2. Le caractère "compact" de ces horizons est essentiellement dû au faible volume poral correspondant à la classe 1.

Les proportions relatives de chacune des classes par rapport au volume total évoluent relativement peu selon les horizons. On peut opposer :

- l'horizon BA1 qui présente la plus forte proportion de pores inter-agrégats (classe 1) (48 %) et la plus faible proportion de pores intra-agrégats (48 %) (classe 2);
- l'horizon BA2 tassé et l'horizon BA6 qui présentent la plus faible proportion de pores grossiers (36 %) et la plus forte proportion de pores intra-agrégats (60 %).

### 3. Conclusion

#### Résumé des principales différences entre les 2 types de sol

Le volume poral total exploré par le mercure, accessible à des rayons de constriction compris entre 150  $\mu\text{m}$  et 3,25 nm, est nettement plus élevé dans l'andosol

L'évolution verticale au sein du profil est faible dans le sol brun acide alors qu'elle est importante dans l'andosol

Le spectre poral est nettement bimodal dans le sol brun acide, alors qu'il est quasiment unimodal à bimodal moins bien défini dans l'andosol.

Le rayon de constriction modal de la classe 1 inter-agrégats est globalement plus élevé dans le sol brun acide. Celui de la classe 2 intra-agrégats est équivalent à plus élevé dans l'andosol.

Le volume poral correspondant à la classe 3 est au moins 2 fois plus élevé, et jusqu'à 10 fois plus élevé dans l'andosol.

La comparaison des volumes microaggrégés de chacun des 2 types de sol (BA3 et AN3) illustre bien ces différences.

#### Bonne corrélation avec les observations micromorphologiques

\* Pour l'andosol, l'évolution verticale des caractéristiques de la classe 1 inter-agrégats est en accord avec les observations micromorphologiques. Pour la classe 2, les résultats devront être comparés aux résultats des mesures hydriques.

\* Pour le sol brun acide, il n'y a pas d'évolution claire selon la profondeur, mais seulement certaines tendances : les horizons BA3 et BA1 sont les plus poreux. Les horizons BA2 et BA6 profond sont moins poreux. Ceci concorde avec les observations micromorphologiques.

#### Intérêt de poursuivre l'analyse de l'espace poral et son évolution en fonction des contraintes hydriques par l'étude des propriétés de rétention d'eau et des propriétés de retrait-gonflement

Rappelons que l'ensemble de ces résultats concerne l'analyse de la porosité d'échantillons à un état d'hydratation particulier : séchés à 105 °C, ceci sur une gamme de pores de Rc compris entre 148  $\mu\text{m}$  et 3,3 nm, qui exclue la porosité la plus grossière et la porosité la plus fine.

Il sera intéressant de comparer la distribution du volume poral telle qu'elle est définie par la porosimétrie à mercure sur échantillon déshydraté aux résultats des "mesures hydriques" qui permettent de suivre l'évolution simultanée de l'indice de vide et de l'indice d'eau selon l'état d'hydratation.

# Chapitre VII

## Etude du comportement physico-hydrique

### Introduction

Pour compléter l'étude de l'espace poral menée jusqu'ici à un état hydrique particulier, l'évolution des organisations selon l'état d'hydratation a été suivie. Une analyse de l'espace poral est ainsi effectuée à partir de l'étude conjuguée des courbes de rétention d'eau et des courbes de retrait.

Après avoir consacré un paragraphe aux méthodes utilisées pour cette étude, nous avons choisi de décrire en premier lieu certaines caractéristiques des 2 types de sol sous forme de profils porosimétriques (Chrétien, 1986); ceci permettra de fixer d'emblée les grands traits distinctifs des 2 types de sols. Nous présenterons ensuite les courbes de retrait, puis les courbes de rétention, et leur évolution verticale au sein de chaque type de sol. Enfin nous présenterons en synthèse une comparaison des 2 types de sol, assortie d'une comparaison plus précise des deux horizons microagrégés.

### 1. Méthode

#### Principe

Il s'agit de suivre l'évolution simultanée du contenu en eau retenue dans l'échantillon et son volume apparent en fonction du potentiel de l'eau. Il est donc nécessaire de fixer d'abord la valeur du potentiel de l'eau ou contrainte hydrique (que l'on exprimera par la notion de pF) appliquée à l'échantillon et de déterminer ensuite son volume apparent et sa teneur en eau.

On peut alors établir des courbes de teneur en eau et/ou volume apparent en fonction de la contrainte hydrique et des courbes volume apparent en fonction de la teneur en eau.

Ces courbes pourront fournir des informations sur l'évolution du système poral et sur la localisation de l'eau extraite entre deux contraintes hydriques. Rappelons en effet que l'on peut établir, par analogie avec des pores cylindriques (loi de Jurin), une relation entre la valeur du potentiel de l'eau dans un échantillon et la valeur du rayon de pore équivalent  $R_e$  (valeur maximale du rayon d'un pore cylindrique rempli d'eau).

Cette valeur  $R_e$  peut être calculée en exprimant le potentiel de l'eau par la valeur de la succion nécessaire pour extraire l'eau lui correspondant (Hillel, 1980). La relation employée pour déterminer la valeur du rayon  $R$  est la suivante :

$$R = -2 \gamma \cos \theta / \rho g h = 2 \gamma \cos \theta / P \quad \text{avec } P = \rho g h \quad (1)$$

où:

$\rho$  est le rayon de pore équivalent d'un capillaire cylindrique (en m)

$\gamma$ , la tension superficielle entre l'eau et l'air (en  $N.m^{-1}$ )

$\rho$ , la densité de l'eau (en  $Kg.m^{-3}$ )

$\theta$ , l'angle de contact entre le solide et l'eau (en  $^\circ$ )

$g$ , l'accélération de la gravité (en  $m.s^{-2}$ )

$h$ , la hauteur d'eau équivalente (en m) dans un capillaire de rayon  $r$ , permettant d'évaluer la succion

$P$ , la pression permettant d'évaluer la valeur de la succion (en Pascal).

La valeur adoptée pour la tension superficielle de l'eau à 20°C est de  $72,7.10^{-3} N.m^{-1}$ , pour  $\rho$  de  $10^3 Kg.m^{-3}$ , pour  $g$  de  $9,81 m.s^{-2}$ ; on suppose une mouillabilité parfaite ( $\theta = 0^\circ$  d'où  $\cos \theta = 1$ ). La relation (1) s'écrit alors :

$R = 1482/h = 1482/P = 1482/10^{pF} = 10^{(3,171-pF)}$  ou encore  $pF = \log(1482/r)$ , avec  $R$  exprimé en  $\mu m$ ,  $h$  en cm,  $P$  en hPa; le  $pF$  étant le logarithme décimal de  $h$  exprimé en cm (ou de  $P$  exprimé en hPa).

Tableau VII.1a : - Niveaux énergétiques de l'eau dans le sol : correspondance entre l'humidité relative, la pression pneumatique et le pF. Relation entre la pression externe appliquée (pF) et le rayon de pore équivalent (loi de Jurin) ou rayon de constriction Rc.

Méthodes utilisées pour amener les échantillons à l'équilibre aux différents (pF).  
(d'après Grimaldi, 1981; Tessier, 1984 et Bruand, 1985).

Humidité relative à 20°C (en %)	Pression (bar)	pF	"rayon de pore équivalent" ou "rayon de constriction" $\mu\text{m}$	Méthodes utilisées pour amener les échantillons à l'équilibre aux différents pF	
100	0	--	--	eau libre	
--	0,0032	0,5	460	Dispositif proposé par Tessier et Berrier (1979)	Pression pneumatique
99,9993	0,01	1	150		
99,9927	0,1	2	15		
99,9275	1	3	1,5		
99,88	15,8	4,2	0,1	Appareil de Richard	Humidité relative contrôlée par une solution saline saturée
98 ?	28	4,45	0,05	CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O	
52	1000	6	0,0015	NaHSO <sub>4</sub>	
--	--	6,6	(0,00037)	Séchage à l'étuve à 105°C	

Tab.VII.1b : Chemin suivi pour amener les échantillons à l'équilibre aux différents pF.

Type d'échantillon	chemin suivi		pF final
MOTTES	humidité au moment du prélèvement pF2	→	0,5
		→	1
		→ pF1 →	2
		→ pF1 → pF2 →	3
		→ pF1 → pF2 → pF3 →	4,2
		→	4,45?
		→	6
		→	6,6
échantillons tamisés à 2 mm	humidité au moment du prélèvement	→	3
		→	4,2
	séchage à l'air ,	→	3
		→	4,2

## Forme de l'échantillon

Nous avons prélevé des volumes non perturbés de taille décimétrique pour chaque horizon, sur plan horizontal, au début du printemps, en condition proche de la capacité au champ. Ces échantillons ont été stockés de façon à préserver l'état d'hydratation où ils étaient lors du prélèvement. Avant chaque série de mesures, ils ont été fragmentés à la main en "mottes" de 5 à 10 cm<sup>3</sup> pour lesquelles l'organisation naturelle a été conservée. Ces mottes n'ont pas toujours d'existence structurale véritable mais elles permettent d'étudier, si ce n'est la totalité de l'espace poral, tout au moins une fraction des différentes classes de pores et elles sont d'une utilisation relativement aisée.

Tous les horizons pédologiques identifiés lors de la description morphologique ont fait l'objet de ces mesures.

## Mise à l'équilibre avec une contrainte hydrique donnée

Le tableau VII.1a donne les équivalences entre les différents modes d'expression : activité de l'eau, potentiel matriciel et précise les différentes techniques utilisées pour amener les échantillons à l'équilibre avec une contrainte hydrique déterminée. Il donne aussi la relation entre contrainte hydrique et la taille équivalente maximale des pores remplis d'eau.

Les échantillons sont mis à l'équilibre avec une contrainte hydrique déterminée en utilisant différentes techniques :

a/ Pour des  $pF \leq 4.4$  les échantillons ont été soumis à une pression pneumatique (Richards, 1941) en utilisant : le dispositif d'ultrafiltration proposé par Tessier et Berrier (1979) pour des  $pF \leq 3,0$  et les presses à membrane pour  $pF 4.2$ .

b/ Pour les  $pF > 4.4$ , les échantillons ont été mis à l'équilibre avec des humidités relatives déterminées, à l'aide de solutions salines saturées (sulfate de cuivre pentahydraté  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  pour  $pF 4.45$  et Sulfate hydrogène de Sodium  $NaHSO_4$  pour  $pF 6.0$ ). Seuls les horizons superficiels de l'andosol (AN1, AN2, AN3) ont fait l'objet de ces mesures à  $pF 4.45$  et  $pF 6.0$ .

c/ Enfin les échantillons ont été séchés à l'étuve à 105 ° C durant 24 h, et cet état hydrique a été assimilé à  $pF 6,6$  (Grimaldi, 1981).

Notons que la concentration saline de la solution interstitielle est telle que le potentiel osmotique peut être négligé.

Les échantillons ont été soumis à l'histoire hydrique suivante (Tab. VII.1b) : à partir de leur humidité au moment du prélèvement (soit à partir de teneur en eau pondérale très variable, mais d'un  $pF$  proche de 2 pour tous les échantillons) :

- pour le  $pF 0.5$ , ils sont hydratés jusqu'à  $pF 0.5$ ;
- pour les  $pF$  de 1, 2.0, 3.0 et 4.2, ils sont réhumectés à  $pF 1$  puis soumis à une déshydratation par étapes pour les  $pF 2.0, 3.0$  et 4.2;
- pour les  $pF$  de 4.45, 6.0 et 6.6, partant de leur humidité au moment du prélèvement, les échantillons sont directement et progressivement desséchés.

## Mesures

Pour chaque contrainte hydrique, le volume apparent des mottes a été déterminé par poussée d'Archimède dans le pétrole (Monnier et al, 1973), et la teneur en eau pondérale par gravimétrie (tout en sachant que l'eau d'hydratation des constituants amorphes (et des cations) n'est pas éliminée à 105°C).

Avec un tel protocole, l'opération de ressuyage et la mesure du volume (poussée hydrostatique) constituent les deux principales sources d'erreur (Monnier et al, 1973).

Pour chacun des horizons, la densité de solide ( $d_s$ ) a été mesurée au pycnomètre haute précision (6 répétitions par échantillon).

Ces mesures sont destructrices : une motte ne sert qu'à une seule répétition et ce, pour un  $pF$  donné. Ainsi, le nombre de répétitions pour une contrainte hydrique et un type d'échantillon donné varie de 7 à 19. Il est en moyenne de 10. Pour chaque échantillon et chaque  $pF$ , la moyenne, le coefficient de variation ainsi que l'intervalle de confiance à 95 % ont été calculés. Ceci permet d'autant plus d'apprécier l'hétérogénéité de la structure du volume pédologique. Au total plus de 800 mesures ont été réalisées : 800 mottes sur lesquelles on mesure un couple de variables ( $\theta, E$ ) $_{pF}$ .

Les résultats sont exprimés sous forme d'indice des vides (E), d'indice d'eau ( $\theta$ ) et d'indice d'air (A). Ils correspondent respectivement au volume des vides ( $V_v$ ), au volume d'eau ( $V_w$ ) et au volume d'air ( $V_a$ ) rapportés au volume de solide ( $V_s$ ). Ainsi,

- $E = V_v/V_s =$  indice de vide
- $\theta = V_w/V_s =$  indice d'eau
- $A = V_a/V_s =$  indice d'air.

## Présentation des résultats

Les résultats sont présentés sous forme de :

- courbes de retrait : ce type de courbe représente l'évolution de l'indice de vide en fonction de l'indice d'eau; il permet par conséquent de discuter les modifications de l'espace poral lorsqu'il se vide de son eau; notons que les échelles sur chacun des 2 axes sont alors identiques.

- courbes d'indice d'eau, d'indice de vide, d'indice d'air en fonction de la contrainte hydrique (pF). La courbe d'indice d'eau en fonction de la contrainte hydrique (pF) renseigne sur la quantité d'eau retenue en fonction du potentiel. Elle peut aussi fournir des informations sur la localisation de l'eau : l'eau extraite entre 2 valeurs de pF provient de pores dont les rayons de pore équivalent peuvent être calculés à l'aide de la relation (1) qui emploie un modèle de pores cylindriques. L'image de la géométrie de l'espace poral ainsi obtenue sera d'autant plus déformée que les pores diffèrent de ce modèle. C'est le cas notamment des horizons à structure microagrégée dans lesquels la porosité est essentiellement une porosité "d'entassement", "d'empilement de sphères", bien éloignée de pores cylindriques. En fait le modèle de pores cylindriques ne concerne que les étranglements existant dans un pore c'est à dire ses constriction. De la sorte, l'analogie avec des pores cylindriques se limite aux seules constriction; en contrepartie, nous n'avons pas d'information sur la géométrie des volumes poraux auxquels les constriction donnent accès. Il est néanmoins possible de comparer les systèmes poraux de 2 échantillons en comparant leurs courbes de rétention d'eau (en effet lorsque 2 échantillons possèdent le même espace poral entre 2 valeurs de  $R_e$ , leurs courbes de rétention sont parallèles entre les 2 valeurs de pF correspondantes).

Sur ces courbes, figurent soit l'ensemble des répétitions effectuées (points), soient les moyennes assorties de leur intervalle de confiance à 95%.

Puisque la teneur en eau des différents horizons au moment du prélèvement correspond à une contrainte hydrique équivalente à environ pF 2, les points obtenus pour les pF supérieurs à 2 correspondront à une déshydratation des échantillons, tandis que ceux obtenus pour des pF inférieurs à 2 correspondront à une hydratation.

## Mesures complémentaires effectuées

Rappelons que des mesures de densité apparente totale exprimées ici sous forme d'indice de vide "total" ( $E_{HZ}$ ) ont été effectuées sur le terrain au densitomètre à membrane sur un volume de  $500 \text{ cm}^3$  environ, avec trois répétitions pour chaque horizon. Cette mesure comparée à 2 autres mesures effectuées sur motte permet de dresser les profils porosimétriques (Chrétien, 1986).

## 2. Profils porosimétriques

L'examen des profils porosimétriques permet notamment de comparer l'allure des courbes et l'évolution des composantes de la porosité d'un horizon à l'autre sur l'ensemble du profil. Cela permettra de fixer d'emblée les grandes différences existant entre les 2 types de sol, et les seuils qui peuvent exister dans l'évolution verticale au sein d'un même profil.

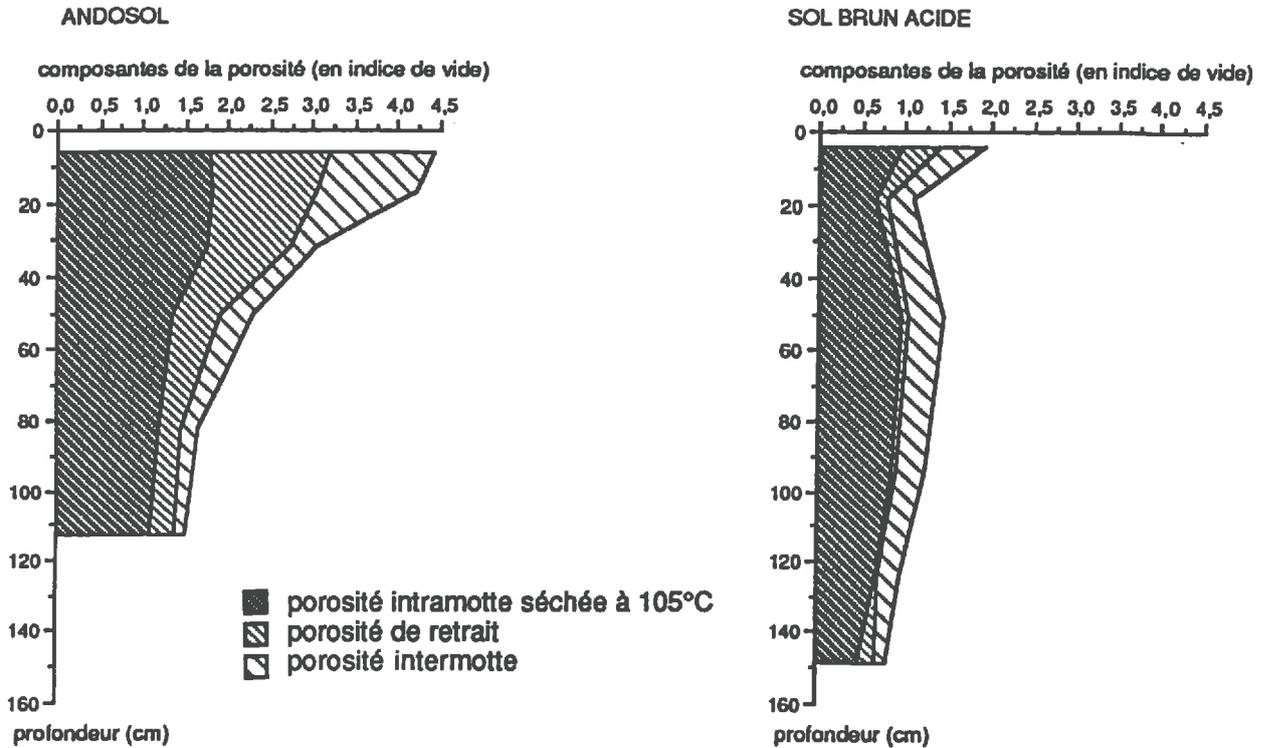
### 2.1 Méthode : construction du profil porosimétrique

Chaque horizon est ici caractérisé par 3 valeurs de porosité exprimée sous forme d'indice de vide, obtenues à 2 échelles d'approche :

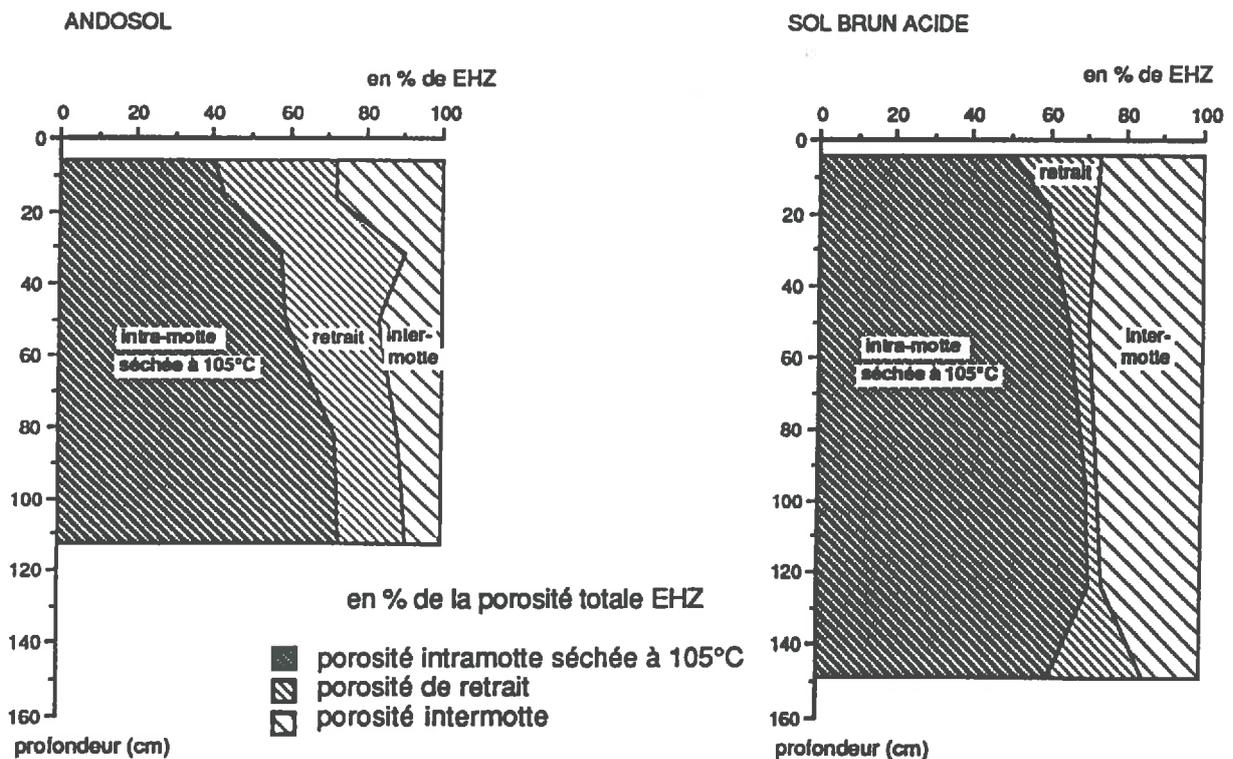
- celle de l'horizon : *porosité totale* " $E_{HZ}$ " (volume de  $500 \text{ cm}^3$ ), à l'humidité naturelle au moment du prélèvement;
- celle de la motte " $E_M$ " (échelle 5 à  $10 \text{ cm}^3$ ) pour 2 états physico-hydriques :
  - à l'état d'humidité naturelle au moment du prélèvement (soit à un état de contrainte hydrique proche de pF 2 pour tous les horizons) :  $E_{Mh}$ ;
  - à l'état séché à  $105^\circ\text{C}$  :  $E_{MpF6.6}$ .

Trois composantes de la porosité totale  $E_{HZ}$  peuvent être définies (Fig. VII.1) :

- la *porosité inter-motte* " $E_{HZ} - E_{Mh}$ " = " $E_{im}$ ": entre les courbes  $E_{HZ}$  et  $E_{Mh}$ ; elle correspond à la porosité grossière essentiellement biologique.



**Fig.VII.1:** Profils porosimétriques : évolution verticale des indices de vide : mesuré au densitomètre à membrane (EHZ), sur motte fraîche (EMh), sur motte séchée à 105°C (EM105). La position relative des 3 courbes définit 3 compartiments : EHZ-EMh = porosité inter-motte; EMH-EM105 = porosité de retrait; EM105 = porosité intra-motte séchée à 105°C.



**Fig.VII.2:** Profils porosimétriques : évolution verticale des indices de vide : mesuré au densitomètre à membrane (EHZ), sur motte fraîche (EMh), sur motte séchée à 105°C (EM105) et évolution des 3 compartiments en pour cent de l'indice de vide EHZ mesuré au densitomètre à membrane.

- la porosité de retrait " $E_{Mh} - E_{MpF6,6}$ " =  $E_r$ : entre les courbes  $E_{Mh}$  et  $E_{MpF6,6}$ ; elle présente la valeur du retrait de la motte, entre l'état d'humidité naturelle et l'état séché à 105°C.
- la porosité  $E_{MpF6,6}$ ; elle représente la porosité de la motte séchée à 105°C.

Le profil porosimétrique présente l'évolution verticale de ces valeurs sous forme de 3 courbes, délimitant les 3 composantes de la porosité.

## 2.2 La porosité totale : valeurs comparées et évolution verticale pour les 2 types de sol

La variabilité de la porosité totale  $E_{HZ}$ , mesurée au densitomètre à membrane est plus élevée dans les sols andiques : le coefficient de variation (C.V) moyen y est 2 fois plus important : C.V moyen = 12,4 % (il varie de 26 % à 3 %) par rapport à celui des horizons du sol brun acide : C.V moyen = 6,8 % (il varie de 20 à 0 %). Cette différence est essentiellement attribuable à une plus grande hétérogénéité de la porosité (et par suite de l'humidité) dans les sols andiques, bien que l'on puisse aussi évoquer une plus grande sensibilité aux variations même minimales de pressions exercées, lors de la mesure au densitomètre à membrane, dues à une plus grande fragilité.

Pour les 2 types de sol, le coefficient de variation pour  $E_{HZ}$  est maximal dans les horizons de surface: C.V. d'environ 20 %.

### Comparaison des valeurs de porosité totale entre les 2 types de sol

La porosité totale exprimée sous forme d'indice de vide:  $E_{HZ}$  est en moyenne 2 fois plus élevée dans l'andosol que dans le sol brun acide (Fig.VII.1). Elle varie de 4,4 à 1,5 dans le premier et de 1,9 à 0,8 dans les seconds. La différence d'indice de vide total, déjà importante entre les horizons profonds ( $\Delta E = 0,4$ ), va en s'accroissant pour les horizons supérieurs ( $\Delta E = 1$  à 3); elle est de 1,6 si on compare les 2 horizons les plus microagrégés (AN3 et BA3) des 2 types de sols.

Globalement, la porosité totale,  $E_{HZ}$ , augmente dans les deux sols de la base au sommet.

Dans l'andosol, l'augmentation de la porosité totale vers la surface se fait selon une hyperbole avec 3 seuils : entre les horizons profonds AN6, AN5 ( $E_{HZ} = 1,5$  à 1,6) et l'horizon sus-jacent AN4 ( $E_{HZ} = 2,3$ ), entre l'horizon AN4 et l'horizon AN3 ( $E_{HZ} = 3,0$ ), et entre l'horizon AN3 et les horizons de surface AN2 et AN1 ( $E_{HZ} = 4,2$  à 4,4).

Dans le sol brun Acide, cette augmentation de l'indice de vide total de la profondeur vers la surface se fait à peu près progressivement, de 0,8 à 1,9. Par rapport aux horizons sus- et sous-jacents (BA1 et BA3), l'horizon de subsurface BA2 est cependant caractérisé par un faible indice de vide total ( $E_{HZ} = 1,1$ ) qui souligne le caractère "compact" de cet horizon noté sur le terrain.

## 2.3 Evolution verticale des composantes de la porosité totale au sein de chaque type de sol

### 2.3.1 Dans l'andosol

Les 3 composantes de la porosité présentent une évolution verticale importante.

La porosité inter-motte est relativement faible de l'horizon profond AN6 à l'horizon AN3 ( $E_{im} = 0,2$  à 0,4); elle constitue 9 à 11 % de la porosité totale  $E_{HZ}$  (16 % dans AN4, riche en graviers). Elle augmente considérablement dans les horizons de surface AN2 et AN1, où elle constitue alors 28 % de la porosité totale (Fig. VII.1 et Fig. VII.2).

La porosité de retrait est relativement faible dans les horizons inférieurs ( $E_r = 0,22-0,23$ ) où elle représente 14 % de la porosité totale  $E_{HZ}$ , 16% de la porosité sur motte humide  $E_{Mh}$ . Elle double dès l'horizon AN4 (0,5) et augmente encore nettement dans les horizons supérieurs AN3 à AN1 ( $E_r = 0,8-1,0$ ) où elle représente plus de 20 % de la porosité totale  $E_{HZ}$  et 30 % de la porosité des mottes humides  $E_{Mh}$ .

La porosité intra-motte séchée à 105°C présente un accroissement entre l'horizon AN4 et l'horizon

AN3.

Finalement, l'accroissement de  $E_{HZ}$  de la profondeur vers la surface est lié dans cet andosol à :

- un faible accroissement de la porosité de motte séchée à 105°C :  $E_{MpF6,6}$ ;
- un accroissement important de la porosité de retrait " $E_{Mh}-E_{MpF6,6}$ ", qui se manifeste dès l'horizon AN4 et devient très net dans les 3 horizons supérieurs.
- un accroissement important de la porosité inter-motte " $E_{HZ}-E_{Mh}$ " mais qui se produit plus en surface : dans les horizons AN2 et AN1.

Dans le ranker andique, la porosité inter-motte est moins importante que pour les volumes superficiels de l'andosol, tandis que la porosité de retrait leur est comparable.

### 2.3.2 Dans le sol Brun Acide

Comparé à l'andosol, l'évolution verticale des valeurs  $E_{HZ}$ ,  $E_{Mh}$  et  $E_{MpF6,6}$  est beaucoup plus progressive (Fig. VII.1). Les 3 courbes sont de plus globalement parallèles et les valeurs des composantes de la porosité évoluent ainsi peu verticalement.

La porosité inter-motte est aussi importante, voire plus importante que dans l'andosol. Elle évolue peu (0,2 à 0,5) mais tend à augmenter progressivement vers la surface, l'horizon BA2 faisant exception. Sa contribution à la porosité totale  $E_{HZ}$  est plus élevée que dans l'andosol (Fig. VII.2); elle varie peu verticalement : elle constitue 26 à 29 % de  $E_{HZ}$ .

La porosité de retrait, par contre, est beaucoup moins importante que pour les horizons de l'andosol. Négligeable dans les horizons BA6 à BA3 (< 0,1 unité), où elle constitue au plus 5 % de la porosité totale  $E_{HZ}$ , elle augmente cependant dans les horizons de surface BA2 et BA1 : 0,13 - 0,35 où elle constitue alors 12 à 18 % de la porosité totale.

La porosité intra-motte séchée à 105°C évolue peu, elle présente un maximum dans les volumes BA1 et BA3.

## 2.4 Conclusion

### Les grandes différences entre andosol et sol brun acide

*La porosité totale  $E_{HZ}$  mesurée au densitomètre à membrane est nettement plus élevée dans l'andosol que dans le sol brun acide. Les 3 composantes : porosité inter-motte, porosité de retrait et porosité intra-motte séchée à 105°C, peuvent être très différentes selon les 2 types de sol et elles participent de manière différente à la porosité totale.*

*La porosité de retrait est beaucoup plus importante dans les horizons de l'andosol. C'est cette composante de la porosité qui différencie le plus les 2 types de sol..*

*La porosité intra-motte séchée à 105°C est aussi plus élevée dans l'andosol, mais l'écart par rapport au sol brun acide est moins grand que pour la porosité de retrait.*

*Quant à la porosité inter-motte, rapportée à la porosité totale elle est toujours plus importante dans le sol brun acide. En valeur absolue, elle est aussi généralement plus élevée pour horizons du sol brun acide; seuls les volumes de surface de l'andosol présente des valeurs supérieures.*

*Si les volumes profonds de l'andosol présentent une porosité totale  $E_{HZ}$  comparable aux valeurs maximales du sol brun acide, la contribution des 3 composantes varie. Celle de la porosité inter-motte est nettement plus importante dans le sol brun acide, tandis que la porosité intra-motte séchée à 105°C tend à être plus importante dans les horizons profonds de l'andosol.*

### Relation avec les observations macromorphologiques

*Rappelons que pour l'andosol, les composantes de la porosité évoluent verticalement de manière importante. Le développement de la porosité inter-motte dans les 2 horizons supérieurs correspond au*

développement de la porosité biologique (chenaux racinaires notamment) observée sur le terrain.

Dans le sol brun acide ces composantes évoluent peu selon les horizons. La porosité inter-motte correspond essentiellement à une porosité biologique (racines, galeries de vers de terre) pour les horizons BA1 à BA3, plutôt à une porosité de cavités grossières dans les volumes profonds.

L'examen de ces profils porosimétriques a permis de fixer les grandes caractéristiques des 2 types de sol : leur différence et l'évolution verticale générale au sein de chacun des types de sol. Ces profils porosimétriques donnent une *photographie globale des composantes de la porosité*. Notons que certaines données qui ont permis de les établir ( $E_{Mh}$ ) varient selon l'état de contrainte hydrique du sol.

L'étude des courbes de retrait et de rétention d'eau effectuée sur motte permettront d'avoir une vision plus dynamique de l'évolution du système poral en fonction des contraintes hydriques qui sont imposées; elles permettront notamment d'analyser la porosité de retrait..

### 3. Caractérisation et évolution verticale des courbes de retrait et des courbes de rétention en eau au sein de chaque profil

Nous décrirons ici successivement pour chaque type de sol, d'abord l'allure des courbes de retrait, puis les courbes de rétention. Ces dernières seront interprétées en terme de spectre poral et de son évolution verticale. Pour les courbes de retrait nous nous limiterons essentiellement à une description des résultats, excepté pour certains points particuliers; c'est la comparaison avec les résultats de porosimétrie à mercure qui nous permettra de proposer certaines interprétations.

#### La variabilité des mesures d'indices de vide et d'indice d'eau sur mottes à différentes contraintes hydriques

Elle donne un idée de la précision des mesures, mais aussi et surtout de l'hétérogénéité de la porosité.

*En valeur absolue*, la variabilité sur les indices de vide et les indices d'eau est plus importante dans les horizons des sols andiques que dans ceux du sol brun acide. Mais cette différence est annulée si les paramètres de dispersion sont *rapportés à la moyenne* : dans les 2 types de sol, le coefficient de variation (C.V. =  $100 \cdot \text{écart-type} / \text{moyenne}$ ) peut varier de 4 à 15 %.

Ces valeurs sont comparables aux rares valeurs disponibles dans la bibliographie pour les sols bruns acides (Curmi, 1987) ; pour les sols andiques, aucune donnée de ce type ne figure dans la bibliographie.

Globalement, l'intervalle de confiance de l'indice d'eau  $\theta$  augmente vers les faibles pF, ce qui peut être mis en relation avec une plus grande variabilité des pores les plus grossiers (Fig.VII.3 et VII.5). Aux faibles contraintes hydriques, on observe une bonne corrélation entre E et  $\theta$ , les points s'alignant selon la droite de saturation, ce qui confirme la fiabilité des mesures; les variabilités mesurées sur l'indice d'eau et l'indice de vide sont alors fortes et très comparables et la variabilité sur le taux de saturation est faible.

Globalement, on constate une augmentation de l'intervalle de confiance des horizons profonds vers les horizons de surface, aussi bien pour le sol brun acide que pour l'andosol, et pour E que pour  $\theta$ ; ce qui traduit une plus forte variabilité des volumes poraux, et par suite des organisations lorsqu'on se rapproche de la surface.

#### 3.1. Courbes de retrait

Rappelons ici brièvement la signification physique du rapport  $\Delta E / \Delta \theta$  qui sera utilisé par la suite : une valeur  $\Delta E / \Delta \theta = 0$  témoigne d'un comportement apparemment rigide sans retrait macroscopique; une valeur  $\Delta E / \Delta \theta = 1$  témoigne d'un retrait normal et d'un comportement idéalement déformable; une valeur  $0 < \Delta E / \Delta \theta < 1$  témoigne d'un retrait partiel, d'un comportement partiellement déformable.

### 3.1.1 Les courbes de retrait pour les horizons de l'andosol

La figure VII.3 représente les courbes de retrait pour chacun des 6 horizons de l'andosol : sont alors représentées l'ensemble des répétitions pour chaque contrainte hydrique, et les moyennes assorties de leur intervalle de confiance à 95 %. La figure VII.4 présente pour chacun des horizons, l'évolution des moyennes d'indice de vide  $E$ , d'indice d'eau  $\theta$  et d'indice d'air  $A$  ( $A = E - \theta$ ) en fonction du  $pF$  assorties de leur intervalle de confiance à 95%.

#### 3.1.1.1 Résultats

Les courbes de retrait diffèrent beaucoup selon les horizons tant dans les valeurs d'indice de vide aux faibles  $pF$  et dans l'intensité du retrait que dans leur forme (répartition du retrait; et valeur  $\Delta E/\Delta\theta$ ). Trois groupes d'horizons seront distingués :

- les horizons inférieurs AN6, AN5, AN4,
- les horizons AN3 et AN2
- l'horizon superficiel AN1.

##### 1) Les horizons inférieurs AN6, AN5, AN4

Ces 3 horizons inférieurs présentent certaines caractéristiques communes dans l'allure de la courbe de retrait (Fig. VII.3 et Fig. VII.4).

Les valeurs d'indice de vide à  $pF$  sont faibles dans les horizons profonds AN5 et AN6 (1,35 à 1,45); elles sont un peu plus élevées dans le volume AN4 (1,9)

Ces 3 horizons sont quasiment saturés à  $pF1$  : taux de saturation supérieur à 92 %, et les courbes s'écartent ensuite très rapidement de la droite de saturation.

*Deux grandes phases* peuvent être distinguées lors de la déshydratation.

De  $pF1$  à  $pF3$ , il y a perte d'eau sans que cela entraîne de variation d'indice de vide significative (Test de Welch)<sup>1</sup>, ce qui traduit un comportement *apparemment rigide* :  $\Delta E_{pF1 \rightarrow pF3} \approx 0$ .

De  $pF3$  à  $pF6,6$ , on observe un certain retrait lors de la déshydratation :

- Dans les 2 horizons profonds (AN5, AN6), ce retrait est faible et du même ordre de grandeur (Fig. VII.3e et 3f) ( $\Delta E_{pF3 \rightarrow pF6,6} = 0,25$ ); il représente 18% de la valeur moyenne  $E_{pF1 \rightarrow pF3}$ . Il s'effectue principalement au dessus de  $pF4,2$  et il n'est que "partiel" ( $\Delta E/\Delta\theta = 0,2$ ).

- Dans l'horizon AN4, le retrait de  $pF3$  à  $pF6,6$  est 2 fois plus élevé ( $\Delta E_{pF3 \rightarrow pF6,6} = 0,25$ ) et il représente 28 % de la valeur moyenne  $E_{pF1 \rightarrow pF3}$ . De plus, il s'effectue à partir de  $pF3$ . Là encore, le retrait n'est que *partiel*, mais le rapport  $\Delta E/\Delta\theta$  est plus important entre  $pF3$  et  $pF4,2$  contrairement aux horizons profonds.

##### 2) Les horizons AN3 et AN2

Les taux de saturation à  $pF1$  sont plus faibles : 89 % dans AN3 et 87 % dans AN2 (Fig. VII.3 et VII.4).

Par ailleurs, l'allure de la courbe de retrait est plus complexe. C'est à  $pF2$ , soit approximativement à la contrainte hydrique au moment du prélèvement, que la valeur d'indice de vide est la plus élevée. *Quatre grandes phases* peuvent être distinguées dans la courbe de retrait.

- Aux faibles contraintes hydriques ( $pF < 2$ ), alors que la contrainte hydrique diminue de  $pF2$  à  $pF0,5$ , il y a *retrait macroscopique*. Cette diminution d'indice de vide lors de l'hydratation est importante :  $\Delta E_{pF2 \rightarrow pF0,5} \approx 0,5$  unités; elle correspond à environ 18 % de l'indice de vide mesuré à  $pF2$ .

<sup>1</sup>Ce test de Welch est utilisé pour comparer les moyennes de deux populations normales lorsque les variances sont inconnues ou inégales.

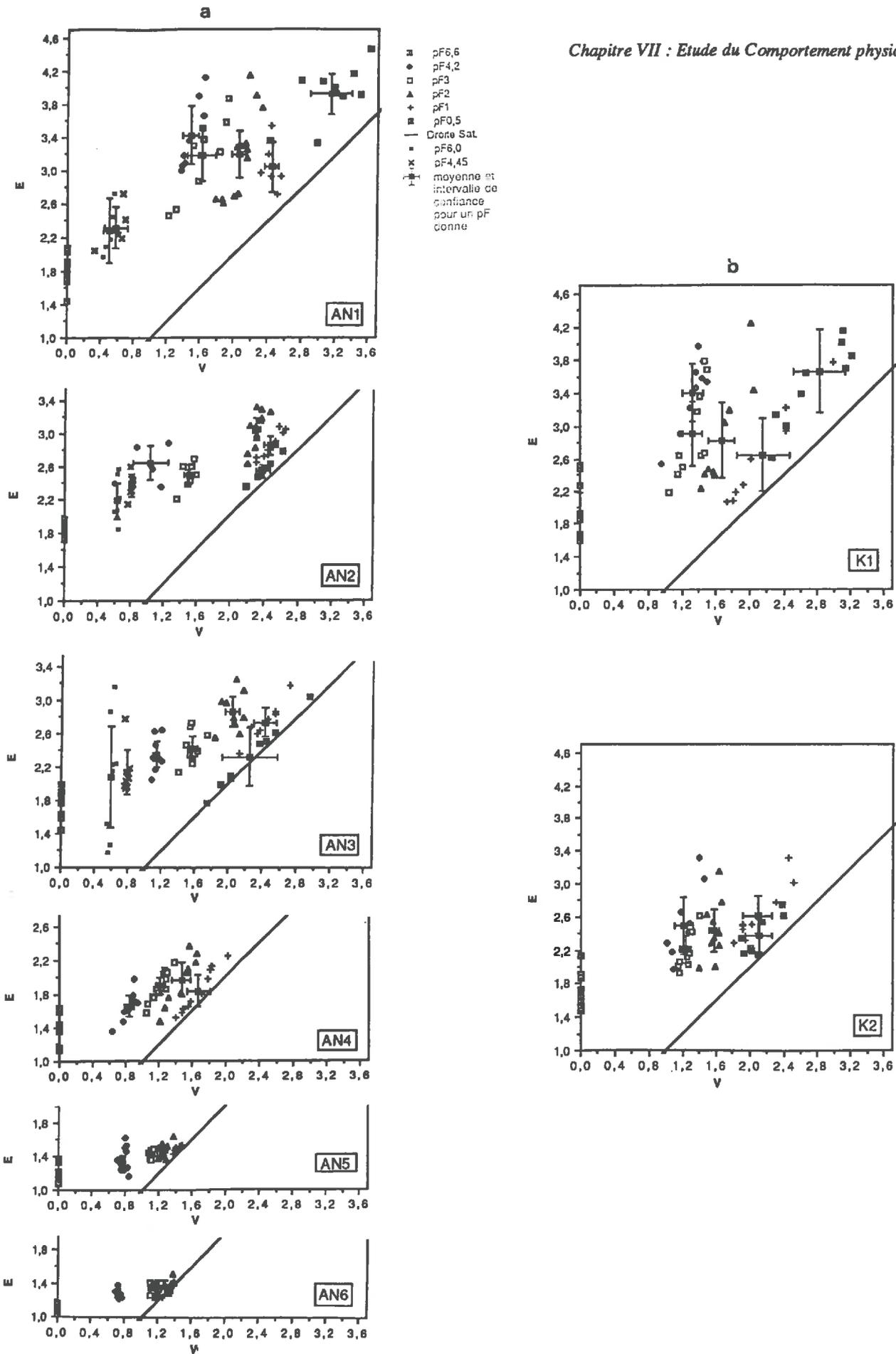


Fig.VII.3 : Courbes de retrait pour chacun des horizons des sols andiques : andosol (AN1 à AN6)<sup>a</sup> et ranker (K1, K2)<sup>b</sup>. Sont représentées les différentes répétitions et les moyennes assorties de leur intervalle de confiance pour chaque pF. 146

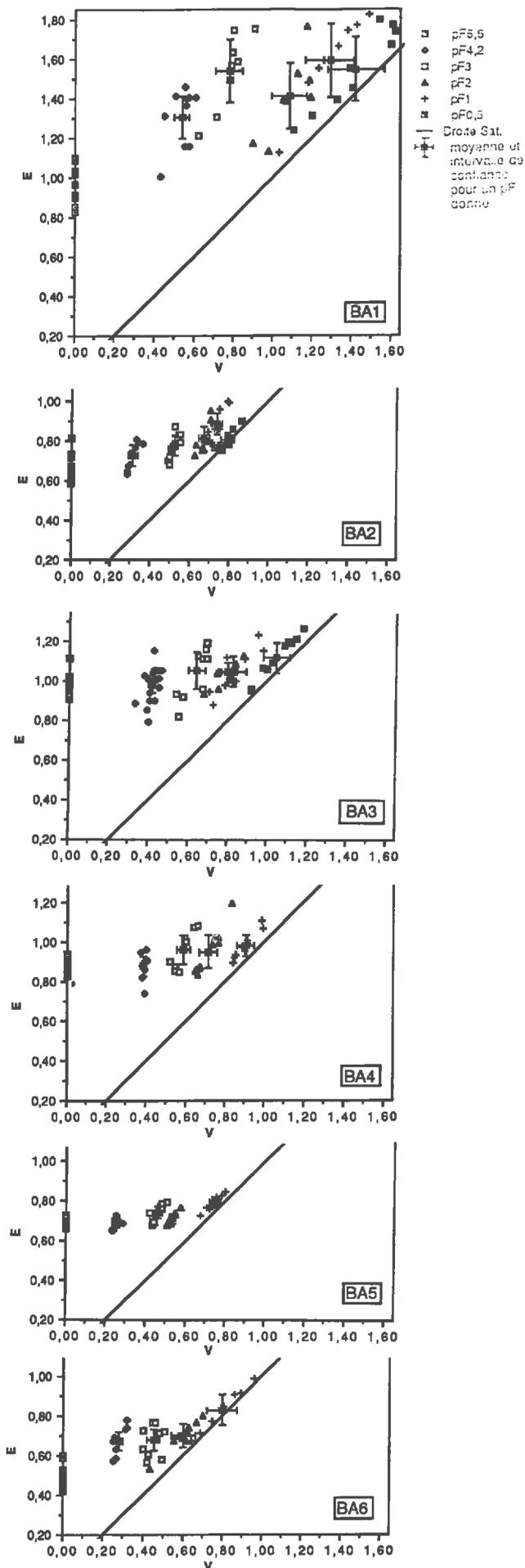


Fig.VII.5. : Courbes de retrait pour chacun des horizons du *sol brun acide* (BA1 à BA6). Sont représentées les différentes répétitions et les moyennes assorties de leur intervalle de confiance.

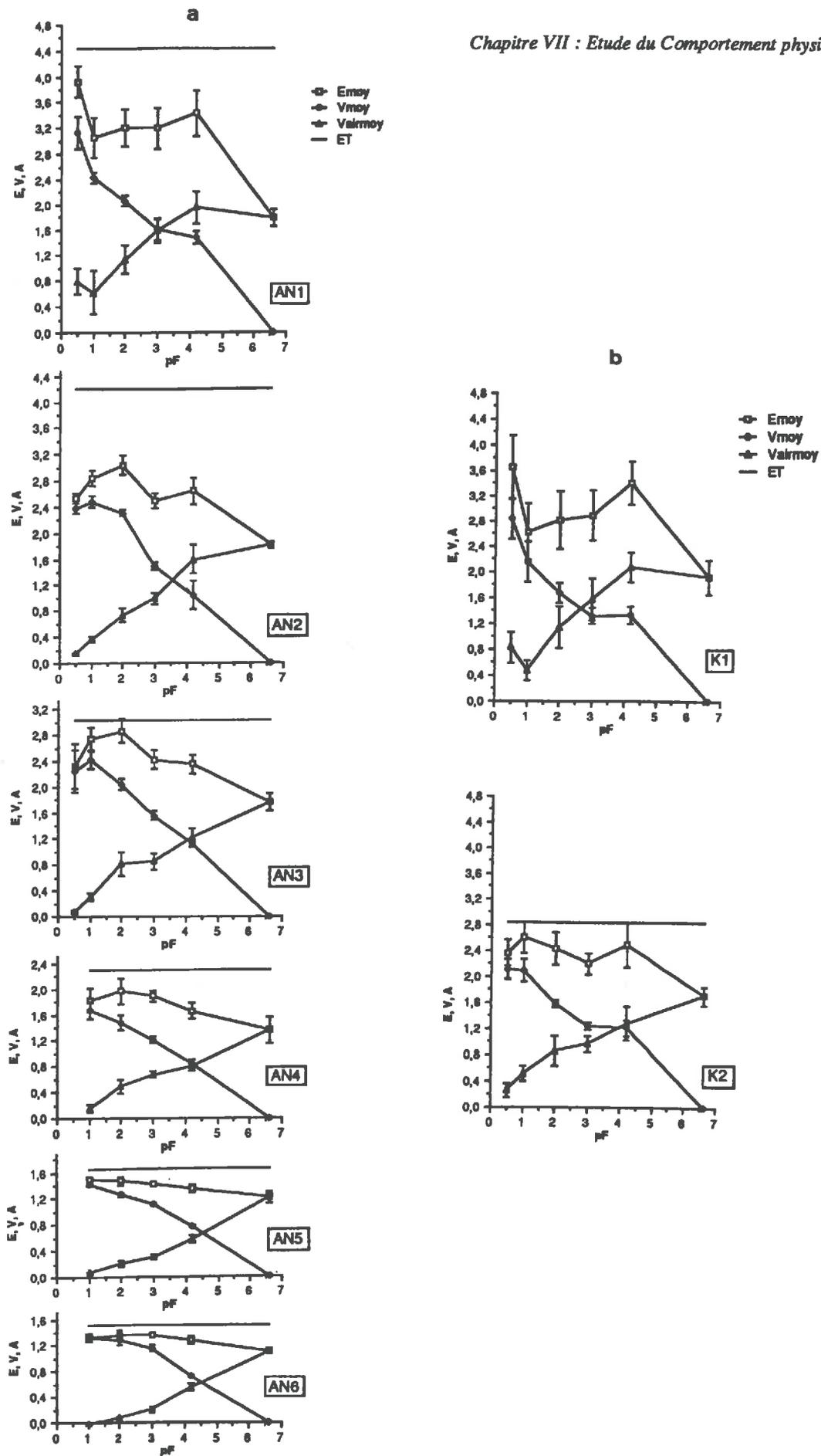


Fig. VII.4 : Courbes d'évolution de l'indice de vide, de l'indice d'eau et de l'indice d'air en fonction du pF, pour chacun des horizons des sols andiques : andosol (AN1 à AN6) et ranker (K1, K2)

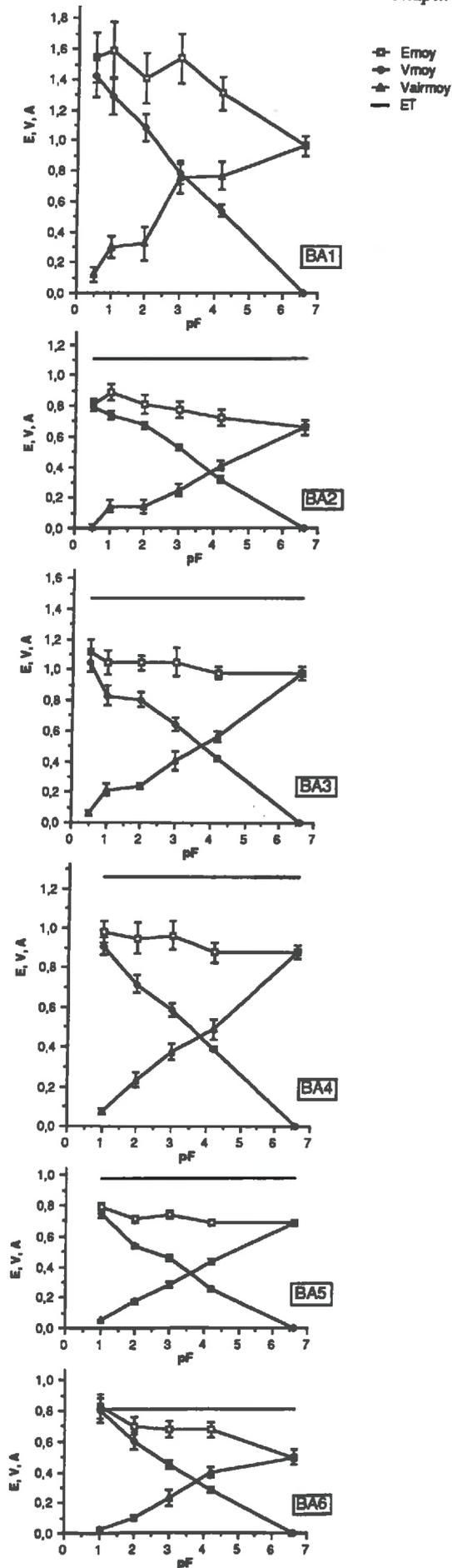


Fig. VII. 6 : Courbes d'évolution de l'indice de vide, de l'indice d'eau et de l'indice d'air en fonction du pF, pour chacun des horizons du sol brun acide (BA1 à BA6).

Pour les 2 échantillons, c'est entre  $pF1$  et  $pF0,5$  que le phénomène est le plus marqué : alors que le volume d'eau entré est nul, voire négatif, l'indice de vide diminue et les échantillons sont *quasiment saturés en eau* à  $pF0,5$ . De  $pF2$  à  $pF1$ , où la diminution de la contrainte hydrique s'accompagne d'une entrée d'eau pour les 2 horizons, ce phénomène de retrait lors de l'hydratation n'est vraiment significatif que pour AN2, tandis que de  $pF2$  à  $pF1$  AN3 est apparemment rigide.

- De  $pF2$  à  $pF3$ , (soit cette fois lors de la déshydratation), on observe une diminution importante de l'indice de vide concomitante au départ d'eau. Le retrait est du même ordre de grandeur dans les 2 horizons ( $\Delta E = 0,44$  et  $0,55$ ) et il représente 18 % et 15 % de la valeur de  $E_{pF2}$  respectivement pour AN3 et AN2. Le retrait est *quasiment normal* en AN3 ( $\Delta E/\Delta\theta=0,97$ ); il n'est que *partiel* dans AN2 ( $\Delta E/\Delta\theta=0,68$ ).

- De  $pF3$  à  $4,2$ , il y a perte d'eau sans que cela entraîne de variation de l'indice de vide; les 2 échantillons AN3 et AN2 ont un *comportement rigide*.

- Enfin de  $pF4,2$  à  $pF6,6$ , on note à nouveau une forte diminution de l'indice de vide ( $\Delta E_{pF4,2 \rightarrow pF6,6} = 0,6$  à  $0,75$ ) concomitante au départ d'eau, la valeur de ce *retrait* étant plus élevée dans AN2 que dans AN3 ( $\Delta E$  : de 0,75 unités soit 25 % de  $E_{pF2}$  avec  $\Delta E/\Delta\theta=0,75$  dans AN2 ;  $\Delta E$  de 0,6 unités soit 22% de la valeur de  $E_{pF2}$  avec  $\Delta E/\Delta\theta=0,52$  dans AN3).

Le retrait de  $pF4,2$  à  $6,0$  est "*normal*" dans AN2 alors qu'il n'est que *partiel* en AN3 ( $\Delta E/\Delta\theta = 0,50$ ); et la diminution de  $E$  est plus forte en AN2 ( $\Delta E=0,46$ ) que en AN3 ( $\Delta E=0,27$ ). De  $pF6$  à  $pF6,6$ , le retrait est du même ordre dans les 2 horizons tant en valeur absolue ( $\Delta E = 0,36$  et  $0,31$ ) que par rapport au volume d'eau extrait ( $\Delta E/\Delta\theta= 0,56$  et  $0,52$ ).

Finalement comparés aux horizons inférieurs, ces 2 horizons AN3 et AN2 sont caractérisés par une forte diminution de l'indice de vide lors de la déshydratation de  $pF2$  à  $pF6,6$ . Dans les 2 horizons, cette diminution est est du même ordre de grandeur : de 1,2 à 1,1 ce qui correspond à 40 % de la valeur  $E_{pF2}$

Par ailleurs on observe aussi un *retrait* lors de l'hydratation de  $pF 2$  à  $pF 0,5$  avec une diminution d'indice de vide de 0,5 unités qui correspond à 17 à 18 % de la valeur d'indice de vide à  $pF2$ .

Une seule phase de contrainte hydrique est apparemment caractérisée par un comportement rigide ( $pF3$  à  $pF4,2$ ). Le même comportement est envisageable pour la gamme  $pF1$  à  $pF2$  dans le cas de AN3.

### 3) L'horizon superficiel AN1

A  $pF1$ , cet horizon AN1 est plus nettement désaturé que les horizons sous-jacents :  $\theta/E$  de 80 %. Il présente encore un comportement différent avec 3 phases:

- Lors de l'hydratation de  $pF1$  à  $0,5$  : l'indice de vide augmente de 0,70 unité, ce qui correspond à 22 % de la valeur  $E_{pF2}$ ; et la valeur du gonflement est égale à la quantité d'eau entrée ( $\Delta E/\Delta\theta = 1$ ). Ce comportement peut être qualifié de "*gonflement normal*".

- De  $pF 1$  à  $pF4,2$ , il y a perte d'eau sans que cela entraîne de variation significative de l'indice de vide (test de Welch), et le comportement est *apparemment rigide* :  $E_{pF1 \rightarrow pF4,2} = 3,2209$ .

- Enfin au dessus de  $pF4,2$ , on observe une très forte diminution de l'indice de vide concomitante au départ d'eau, sans entrée d'air. C'est une phase de *retrait normal* ( $\Delta E/\Delta\theta= 0,97$ ).

La diminution d'indice de vide de  $pF4,2$  à  $6,6$  est de 1,43, ce qui correspond à 44 % de  $E_{pF1 \rightarrow pF4,2}$ .

Au total, le retrait/ gonflement est très important pour cet horizon superficiel AN1 : la variation d'indice de vide de  $pF0,5$  à  $pF6,6$  atteint 2,13 unité. L'indice de retrait :  $100 \cdot \Delta E_{pF0,5- pF6,6} / E_{pF2}$  représente 120 %; entre  $pF 0,5$  et  $pF6,6$ , le volume de vide est réduit d'un facteur 2,2! ( $E_{pF0,5}=3,93$ ;  $E_{pF6,6}=1,79$ ).

#### 3.1.1.2 Interprétation du comportement aux faibles $pF$ des 3 horizons supérieurs (AN3 à AN1)- Courbe de retrait lors de l'hydratation de $pF1$ à $pF0,5$

Deux cas de comportement ont été répertoriés lors de la diminution de la contrainte hydrique de  $pF1$  à  $pF0,5$ , pour les 3 horizons supérieurs AN3 à AN1 de l'andosol : soit un retrait (horizons AN3 et AN2), soit un gonflement (horizon AN1). On peut tenter d'interpréter ces cas de figures en relation avec l'organisation de ces horizons mise en évidence au microscope optique.

Premier cas : Retrait lors de l'hydratation : cas de AN3 et AN2

Pour les horizons AN3 et AN2, il y a retrait macroscopique lors de l'hydratation de pF1 à 0,5. Aux plus faibles pF, l'hydratation induirait donc une réduction de la porosité.

Par ailleurs lors de la diminution de la contrainte hydrique de pF1 à pF 0,5, il n'y a pas de rentrée d'eau ( $\Delta\theta = 0$ , voire  $\Delta\theta < 0$ ) : selon la loi de Jurin cela signifierait une absence de pores de Rc compris entre 150  $\mu\text{m}$  et 460  $\mu\text{m}$ .

De plus, les échantillons ne sont pas saturés à pF1 : par conséquent on peut considérer que, à pF1, il existe des pores de Rc > 150  $\mu\text{m}$  occupés par l'air. Mais les échantillons deviennent saturés à pF 0,5, ce qui signifie qu'il n'existe pas de pores de Rc > 460  $\mu\text{m}$  à pF0,5.

De pF 1 à pF 0,5, il y aurait donc réduction de la gamme de pores de Rc >150  $\mu\text{m}$ , et très probablement au moins pro-parte de celle de Rc compris entre 150 et 460  $\mu\text{m}$ .

Cette phase de retrait pourrait être attribuée au jeu des forces de tension superficielle des films d'eau inter-agrégats qui tendraient à rapprocher les agrégats et à réduire ainsi cette porosité inter-agrégats la plus grossière.

Le fait que le phénomène soit nettement amorcé dès "pF2 à pF1" dans AN2, pourrait s'expliquer par l'assemblage plus dense avec des pores inter-agrégats plus fins en AN2 par rapport à AN3; ce phénomène de "jonction des films capillaires" affecterait ainsi aussi les pores de Rc 15  $\mu\text{m}$  à 150  $\mu\text{m}$  en AN2.

Ce phénomène a été évoqué par Chrétien (1986, p.348) pour des matériaux sableux.

Deuxième cas : Gonflement "normal" lors de l'hydratation (cas de AN1 et de K1)

Dans le cas de l'horizon superficiel AN1, le phénomène inverse est observé : pour des contraintes hydriques correspondant à l'hydratation de pF1 à pF0,5, il y a augmentation d'indice de vide équivalente au volume d'eau entrée ( $\Delta E = \Delta\theta$  et  $\Delta A = 0$ ), soit un phénomène de gonflement normal; et le volume d'air existant à pF 0,5 (dans des pores de Rc > 460  $\mu\text{m}$ ) est identique au volume d'air existant à pF1 (dans des pores de Rc > 150  $\mu\text{m}$ ).

Pour cet horizon AN1 caractérisé par une structure constituée d'un assemblage lâche de pellets, l'interprétation suivante peut être envisagée : lors de l'hydratation de pF1 à pF 0,5, l'eau rentre dans des pores de Rc supérieurs à 150  $\mu\text{m}$  (Rc 150 à 460  $\mu\text{m}$ ); en même temps cette gamme de pores de Rc >150  $\mu\text{m}$  pourrait s'élargir et cela induirait un gonflement macroscopique de l'échantillon; les unités pellets étant en assemblage suffisamment lâche pour qu'aucune contrainte ne s'oppose à cet élargissement de la porosité préexistante ("absence de contrainte d'enveloppe").

Le fait que le volume d'air existant à pF1 soit identique à celui existant à pF 0,5 pourrait indiquer que la quantité d'air existant à pF1 comme à pF 0,5 serait une porosité de Rc > 460  $\mu\text{m}$  et que l'augmentation du volume poral serait dû à l'apparition d'une porosité de Rc compris entre 150 et 460  $\mu\text{m}$ .

**3.1.2 Courbes de retrait dans le sol brun acide**

La figure VII.5 représente les courbes de retrait pour chacun des 6 horizons du sol brun acide: pour chaque contrainte hydrique, l'ensemble des répétitions et la moyenne assortie de son intervalle de confiance à 95 % sont alors représentés. La figure VII.6 présente pour chacun des horizons, l'évolution des moyennes d'indice de vide E, d'indice d'eau  $\theta$  et d'indice d'air A ( $A = E - \theta$ ) en fonction du pF assorties de leur intervalle de confiance à 95%.

Dans ce profil de sol brun acide, les valeurs d'indice de vide pour les faibles contraintes hydriques (pF1 ou pF2) varient de 0,8 à 1,55, grosso-modo depuis la profondeur vers la surface.

Selon l'allure de leur courbe de retrait (valeur d'indice de vide, intensité du retrait et sa répartition), 2 grands groupes d'horizons peuvent être distingués :

\* Les horizons BA6 à BA2, à valeurs d'indice de vide  $\leq 1,1$  aux faibles pF et qui présentent depuis les faibles contraintes à pF6,6, un retrait macroscopique significatif (test de Welch) mais faible : de l'ordre de 0,2 à 0,1 unité seulement. On distinguera 3 sous-groupes selon l'allure de la courbe de retrait :

- les horizons inférieurs BA6 et BA5 : les valeurs d'indice de vide aux faibles pF sont faibles : ( $E_{pF1}=0,8$ )

- les horizons intermédiaires BA4 et BA3 : les valeurs d'indice de vide sont un peu plus élevées ( $E_{moy pF0,5 \text{ à } pF3}=1,06$  pour BA3;  $E_{moy pF1 \text{ à } pF3}=0,96$  pour BA4)

- l'horizon de subsurface BA2 : les faibles valeurs d'indice de vide ( $E_{moy,pF0,5} = 0,83$ ) le rapproche des horizons profonds; tandis que le retrait le rapproche de l'horizon superficiel BA1.

\* l'horizon superficiel BA1 : se distingue de tous les autres horizons par des valeurs d'indice de vide nettement plus élevées :  $E_{moy,pF0,5} = 1,52$ ; et un retrait macroscopique nettement plus fort.

Notons que toutes les courbes s'éloignent de la droite de saturation dès les faibles pF.

Les horizons inférieurs BA6, BA5, BA4 sont quasiment saturés à pF1 :  $\theta/E$  est de 96 à 92%.

Les horizons supérieurs BA3 à BA1 ne sont pas saturés à pF1 ( $\theta/E$  de 79 % pour BA3; 84 % pour BA2; et 82 % pour BA1) mais le deviennent à pF0,5 ( $\theta/E$  de 94 % pour BA3, 99 % pour BA2 et 92 % pour BA1).

### 1) Les horizons profonds BA6 et BA5

Les horizons profonds présentent une courbe de retrait avec 2 phases :

- De pF1 à pF2, il y a une diminution d'indice de vide concomitante au départ d'eau. C'est une phase de *retrait significatif*. Ce retrait est faible, plus élevé en BA6 que en BA5. Dans BA6 :  $\Delta E_{pF1-pF2} = 0,14$ , ce qui correspond à 17 % de la valeur de  $E_{pF1}$ ; dans BA5 :  $\Delta E_{pF1-pF2} = 0,09$ , ce qui correspond à 11 % de la valeur de  $E_{pF1}$ ;

- Au delà de pF2, il y a perte d'eau sans que cela entraîne de diminution de l'indice de vide : *le comportement est apparemment rigide*. La limite de retrait est donc atteinte dès pF2.

### 2) Les horizons intermédiaires BA4 et BA3

Dans ces horizons intermédiaires, la valeur d'indice de vide varie très peu selon les contraintes hydriques : de pF 1 (pF0,5 dans BA3) à pF 6,6, il existe une valeur moyenne d'indice de vide qui appartient à tous les intervalles de confiance à 0,01 unité près : elle est de 1,03 pour BA3, de 0,92 pour BA4.

Entre pF1 et pF6,6, la courbe de retrait présente cependant 3 phases :

- deux domaines sur lesquels il y a perte d'eau sans diminution de l'indice de vide : *de pF1 à pF3 d'une part, et de pF4,2 à 6,6 d'autre part* : les 2 échantillons ont un *comportement rigide*.

- *de pF3 à pF4,2, on observe un certain retrait concomitant au départ d'eau; l'indice de vide diminue faiblement* : dans BA3:  $\Delta E_{pF3-pF4,2} = 0,08$ , ce qui correspond à 8 % de  $E_{moy,pF0,5}$ ; dans BA4 :  $\Delta E_{pF3-pF4,2} = 0,08$ , ce qui correspond à 9 % de  $E_{moy,pF1}$ .

Ces 4 horizons inférieurs (BA3 à BA6) présentent donc de pF1 à pF6,6 un retrait significatif (test de Welch), mais très faible : de 0,10 à 0,15 unité; par ailleurs ils se caractérisent par rapport aux deux horizons supérieurs par l'existence d'une limite de retrait au moins apparente atteinte pour des pF  $\leq 4,2$  : elle est atteinte dès pF2 dans les horizons profonds BA6 et BA5, et à pF4,2 dans les horizons intermédiaires BA4 et BA3.

### 3) L'horizon de subsurface BA2

Pour cet horizon, la courbe de retrait présente 2 phases :

- De pF 0,5 à pF2, il y a perte d'eau sans diminution de l'indice de vide ( $E_{moy,pF0,5}$  à pF2 = 0,83). Le comportement est *rigide*.

- Au delà de pF2, on observe une *diminution faible et progressive* de l'indice de vide concomitante à l'extraction d'eau ( $\Delta E/\Delta \theta = 21$  à 25 % pour chaque domaine de pF). Au total, la diminution de l'indice de vide de pF2 à pF6,6 reste faible :  $\Delta E = 0,18$  unité; mais elle représente tout de même 20 % de la valeur de E aux faibles pF.

Après l'horizon BA1, c'est cet horizon de subsurface BA2 qui présente le retrait macroscopique le plus fort.

#### 4) L'horizon superficiel BA1

L'horizon de surface BA1 se distingue nettement des autres horizons par un fort retrait macroscopique lors de la déshydratation.; la diminution totale d'indice de vide  $\Delta E$  est de 0,55 à 0,44 unité, ce qui correspond à 36 à 32 % de la valeur de E aux faibles pF.

La courbe de retrait présente 2 domaines .

- Pour un premier domaine de contraintes hydriques allant de pF0,5 à pF3, voire pF4,2, il y a perte d'eau sans que cela entraîne une diminution de l'indice de vide (*comportement rigide*). De pF0,5 à pF3, les valeurs d'indice de vide ne sont pas significativement différentes :  $E_{moy pF0,5 \rightarrow pF3} = 1,52$ .

- Au delà de pF3, on observe un retrait important concomitant au départ d'eau. L'indice de vide diminue alors de 0,55 à 0,44 unité, ce qui représente 36 à 32 % de la valeur de E aux faibles pF, les 2 tiers du retrait se faisant au delà de pF4,2.

### 3.2 Les courbes de rétention et la saturation aux faibles pF pour les sols andiques et les sols bruns acides

Dans un premier temps nous décrivons les variations entre les courbes de teneur en eau des différents horizons de PF1 à 6,6. Dans un second temps, nous proposerons une interprétation de ces résultats.

#### 3.2.1 Résultats

Pour faciliter la présentation, nous décrivons les courbes de rétention et leur variations d'un horizon à l'autre en considérant l'allure des courbes : d'une part pour les valeurs de pF < 3 puis pour les valeurs de pF > 3. Auparavant nous présenterons les valeurs des taux de saturation (et quantités d'air) à pF1.

##### 3.2.1.1 Les courbes de rétention d'eau et la saturation aux faibles pF dans l'andosol (Résultats)

La figure VII.7 regroupe les courbes de rétention des 6 horizons de l'andosol et des 2 horizons de ranker andique. Les valeurs des volumes d'air à pF1 sont visualisables sur les figures VII.3 et VII.4 et sont portées dans le tableau en annexe VII.1

##### 1) Taux de saturation à pF1 et volume d'eau extrait de pF1 à pF3

\* Les horizons profonds AN6 et AN5 sont saturés en eau à pF1 ( $A_{pF1} = 0,02$  et  $0,04$ ). D'autre part, pour ces 2 horizons, le volume d'eau extrait de pF1 à pF3 est faible :  $\Delta \theta_{pF1 \rightarrow pF3}$  de 0,17 dans AN6 et 0,30 dans AN5; la différence entre les 2 horizons étant due au plus fort volume d'eau extrait de pF1 à pF2 dans AN5.

\* L'horizon AN4 n'est plus saturé à pF1 ( $A_{pF1} = 0,22$ ). D'autre part, par rapport aux horizons profonds, le volume d'eau extrait de pF1 à pF3 augmente ( $\Delta \theta_{pF1 \rightarrow pF3} = 0,46$ ). Par rapport à AN5, c'est le volume d'eau extrait de pF2 à pF3 qui est plus important.

\* Dans les horizons supérieurs AN3, AN2 et AN1, le volume d'air à pF1 augmente encore et le volume d'eau extrait de pF1 à pF3 devient nettement plus important. Ce dernier est à peu près identique dans les 3 échantillons ( $\Delta \theta_{pF1 \rightarrow pF3} = 0,83$  à  $0,97$ ), qui présentent par ailleurs les mêmes valeurs d'indice d'eau à pF1 et pF3. Ces 3 horizons présentent néanmoins des différences :

- au niveau du volume d'air existant à pF1 : à pF1 le volume superficiel AN1 présente un plus fort volume d'air ( $A_{pF1} = 0,78$ ) que les horizons AN2 et AN3 ( $A_{pF1} = 0,46$  et  $0,37$ ).

- au niveau de la répartition du volume d'eau extrait entre pF1 et pF2 et entre pF2 et pF3 : alors que les courbes de teneur en eau des horizons AN3 et AN1 sont superposées de pF1 à pF3, l'horizon AN2 se différencie par un plus faible volume d'eau extrait de pF1 à pF2, compensé par un plus fort volume d'eau extrait de pF2 à pF3.

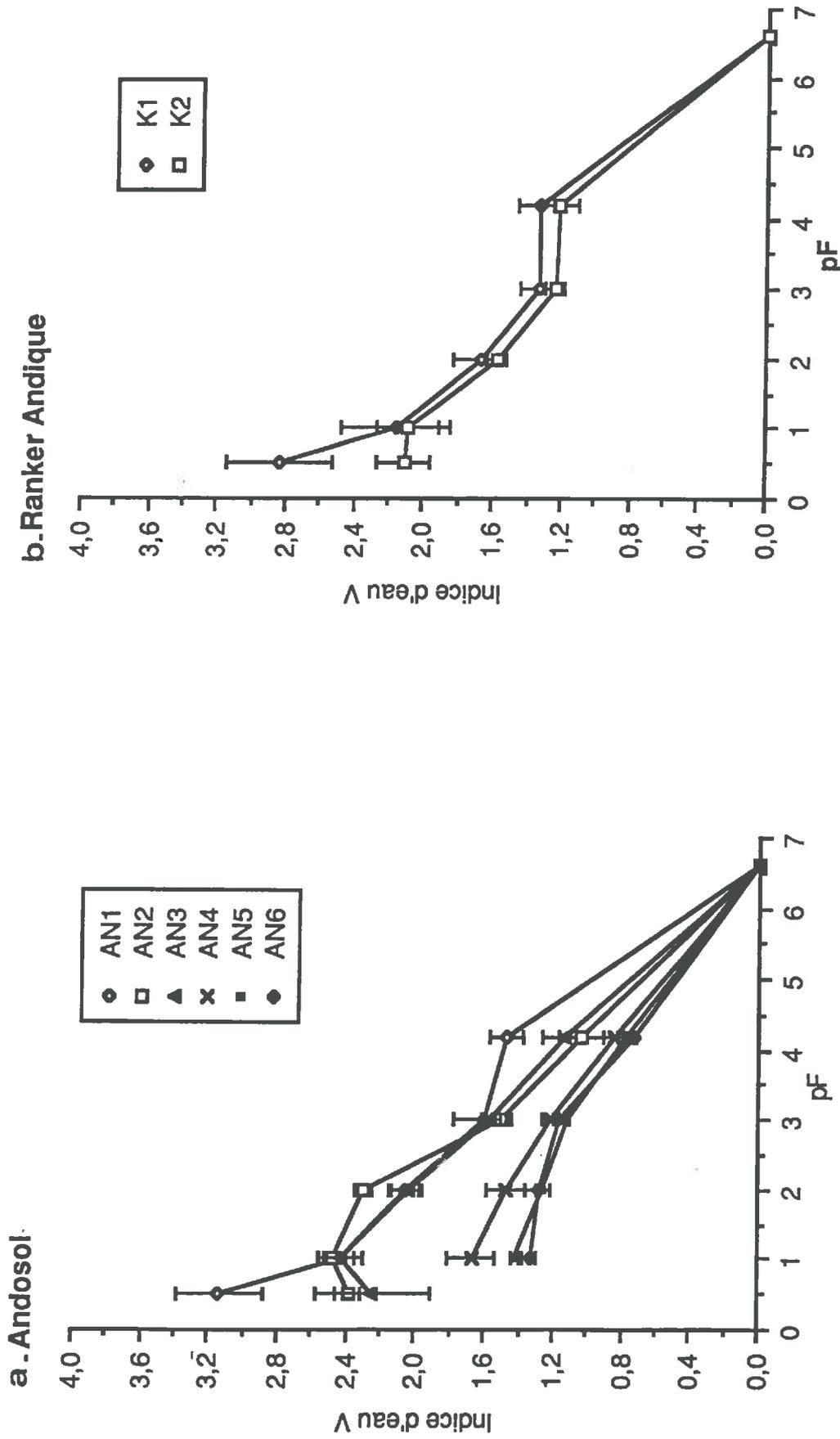


Fig. VII.7 : Les courbes de rétention d'eau superposées pour chacun des horizons des sols andiques : andosol (AN1 à AN6) et ranker andique (K1, K2)

2) Volume d'eau extrait au dessus de pF3

A pF3, les valeurs d'indice d'eau  $\theta_{pF3}$  différencient 2 groupes d'horizons : les 3 horizons inférieurs présentent des valeurs  $\theta_{pF3}$  plus faibles que celles des 3 horizons supérieurs. Cette différence est essentiellement attribuable à un plus fort volume d'eau extrait de pF4,2 à pF6,6 dans les horizons supérieurs.

Pour les trois horizons inférieurs AN6, AN5 et AN4, les teneurs en eau sont comparables à pF3 ( $\theta_{pF3} = 1,1$  à  $1,2$ ); de plus, leurs courbes de rétention sont quasiment superposées de pF3 à pF6,6.

Les trois horizons supérieurs AN3, AN2 et AN1 présentent entre eux des teneurs en eau comparables à pF3 ( $\theta_{pF3} = 1,5$  à  $1,6$ ). Les courbes de teneurs en eau des horizons AN3 et AN2 sont quasiment superposées et de pente régulière de pF3 à pF6,6. Le volume AN1 se différencie de AN3 et AN2 par un *très faible volume d'eau extrait de pF3 à pF4,2* compensé par un *plus fort volume d'eau extrait au delà de pF4,2* (notamment de pF4,2 à pF6,0).

3.2.1.2 Les courbes de rétention d'eau et le taux de saturation à pF1 dans le sol brun acide (Résultats)

La figure VII.8 regroupe les courbes de rétention des 6 horizons du sol brun acide. Les valeurs des volumes d'air à pF1 sont visualisables sur les figures VII.5 et VII.6 et sont portées dans le tableau en annexe VII.3

La courbe de rétention de l'horizon BA1 se différencie nettement de celles de tous les autres horizons. Les courbes de rétention des autres horizons sont plus proches les unes des autres

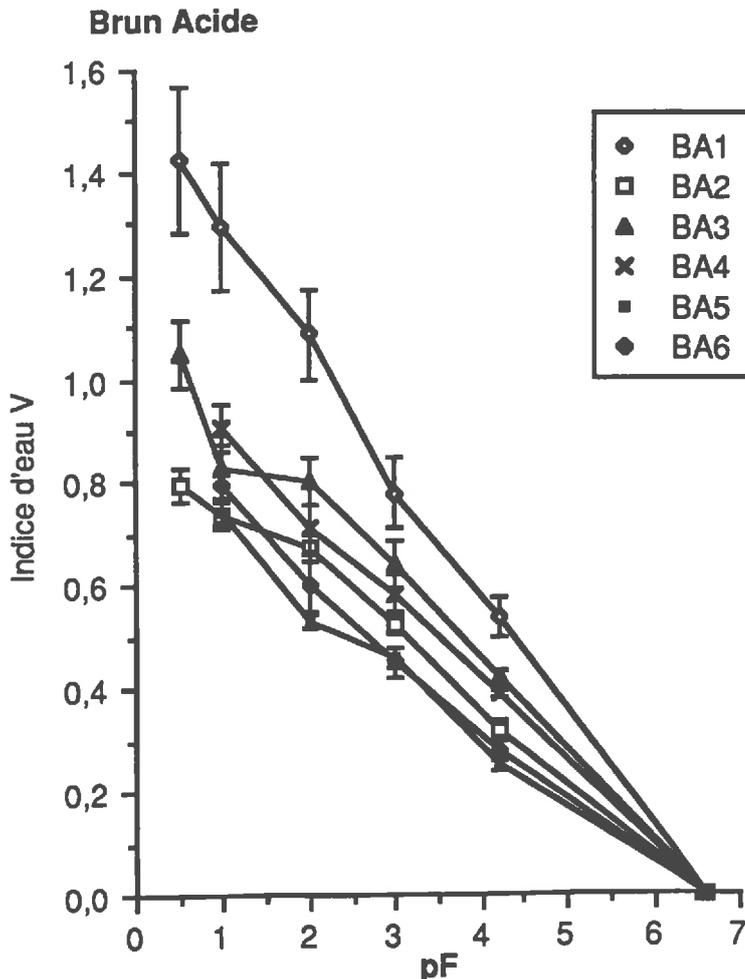


Fig.VII.8 : Les courbes de rétention d'eau superposées pour chacun des horizons du sol brun acide BA1 à BA6

1) Le volume d'air à pF1 et le volume d'eau extrait de pF1 à pF3

a) Les horizons BA2 à BA6

C'est le volume d'eau extrait entre pF1 et pF2 et la quantité d'air existant à pF1 qui différencient ces 5 horizons les uns par rapport aux autres; le volume d'eau extrait de pF2 à pF3 variant peu.

Les 3 horizons inférieurs BA6 à BA4 présentent une *très faible quantité d'air à pF1* :  $A_{pF1}=0,03$  à  $0,06$  mais un *important volume d'eau extrait de pF1 à pF2* ( $\vartheta_{pF1\rightarrow pF2}$  :  $0,19$  à  $0,21$ ).

L'horizon BA3 présente à l'opposé un *très faible volume d'eau extrait de pF1 à pF2* ( $\vartheta_{pF1\rightarrow pF2} = 0,03$ ), largement compensé par un *fort volume d'air à pF1* ( $A_{pF1}=0,22$ ).

Quant à l'horizon BA2, il est caractérisé à la fois par un *faible volume d'air à pF1* ( $A_{pF1}=0,09$ ) et un *faible volume d'eau extrait de pF1 à pF2* ( $\vartheta_{pF1\rightarrow pF2} = 0,07$ ).

b) L'horizon BA1

L'horizon BA1 se caractérise par un volume " $A_{pF1} + \vartheta_{pF1\rightarrow pF3}$ " =  $0,74$ , beaucoup plus important que pour tous les autres horizons, et qui est dû à :

- une *forte quantité d'air à pF1* ( $A_{pF1}=0,23$ ); comparable à celle de BA3 ( $A_{pF1}=0,22$ );
- un *fort volume d'eau extrait de pF1 à pF2* ( $\vartheta_{pF1\rightarrow pF2} = 0,21$ ); comparable à celui des horizons inférieurs BA4 à BA6;
- mais *surtout à un fort volume d'eau extrait de pF2 à pF3* ( $\Delta\vartheta_{pF2\rightarrow pF3} = 0,31$ ), qui le différencie de tous les autres horizons du sol brun acide.

2) Le volume d'eau extrait de pF3 à pF6.6

A pF3, l'indice d'eau  $\vartheta_{pF3}$  varie de  $0,45$  à  $0,78$  depuis l'horizon BA6 à l'horizon BA1.

Grosso-modo, les volumes d'eau extraits de pF3 à pF4,2 sont comparables d'un horizon à l'autre ( $0,17$  à  $0,24$ ) et *c'est le volume d'eau à pF4,2, qui fait la différence*. Selon cette valeur  $\vartheta_{pF4,2}$ , 3 groupes d'horizons sont distinguables avec par ordre de  $\vartheta_{pF4,2}$  décroissant :

le volume superficiel BA1 ( $\vartheta_{pF4,2} = 0,54$ ); les volumes intermédiaires BA3 et BA4 ( $\vartheta_{pF4,2} = 0,42$  et  $0,39$ ); le volume de subsurface BA2 ( $\vartheta_{pF4,2} = 0,32$ ) et les volumes profonds BA6 et BA5 ( $\vartheta_{pF4,2} = 0,28$  et  $0,25$ ).

**3.2.2. Les courbes de rétention d'eau : Discussion et Interprétation**

Les courbes de teneur en eau en fonction de la contrainte hydrique renseignent sur la localisation de l'eau lors de l'extraction : l'eau extraite entre 2 valeurs de pF provient de pores dont les rayons de constriction peuvent être calculés à l'aide de la relation (1) (§1) et dont le volume correspondant est donné par le volume d'eau extrait.

L'allure différente des courbes selon les horizons donne donc une image de l'évolution du spectre de porosité selon les horizons.

Le volume d'air existant dans les échantillons sous forme de mottes à pF1 correspond à des pores de  $R_c$  supérieurs à  $150 \mu\text{m}$  : "*porosité grossière*".

Le volume d'eau extrait de pF1 à pF 3 provient de pores de  $R_c$  compris entre  $150 \mu\text{m}$  et  $1,5 \mu\text{m}$ . Cette gamme de pores correspond essentiellement à la *porosité inter-agrégats* mise en évidence au microscope optique.

Le volume d'eau extrait à des contraintes hydriques supérieures à pF3 provient de pores fins et ultrafins de  $R_c$  inférieurs à  $1,5 \mu\text{m}$ . Parmi ceux-ci : les pores "*vidangés*" de pF3 à pF4,2, qui sont des pores de  $R_c$  compris entre  $1,5 \mu\text{m}$  et  $0,1 \mu\text{m}$ , correspondent plutôt à des *pores intra-agrégats*; tandis que les pores "*vidangés*" au dessus de pF4,2 sont des pores de  $R_c$  inférieurs à  $0,1 \mu\text{m}$  qui correspondent plutôt à

*l'arrangement et à la nature même des particules élémentaires de la taille des argiles.*

### 3.2.2.1 Interprétation des courbes de rétention d'eau pour l'andosol

#### 1) Evolution de la porosité de $R_c > 1.5 \mu\text{m}$ : porosité inter-agrégat et porosité grossière, dans l'andosol

D'après les courbes de rétention, c'est le volume de cette gamme de pores qui évolue le plus selon les horizons dans ce profil d'andosol.

Les horizons profonds AN6 et AN5 sont caractérisés par l'absence de pores grossiers de  $R_c$  supérieurs à  $150 \mu\text{m}$  et par un faible volume de pores de  $R_c$  compris entre  $150$  et  $15 \mu\text{m}$  inter-agrégats.

Ces résultats concordent avec les observations micromorphologiques : ce sont des horizons où la porosité inter-agrégats est peu abondante, sous forme de fissures et petites cavités. Dans l'horizon AN5, la porosité de  $R_c$  compris entre  $150$  à  $15 \mu\text{m}$  (pF1 à pF2) se développe en même temps qu'apparaît très localement une structure microagrégée.

Dans l'horizon AN4, la porosité grossière de  $R_c > 150 \mu\text{m}$  augmente faiblement en même temps que le volume des pores inter-agrégats dû au développement de la structure microagrégée.

Dans les horizons supérieurs AN3 à AN1, la porosité inter-agrégats de  $R_c 150$  à  $15 \mu\text{m}$  devient très importante. Elle correspond au plein développement de la structure microagrégée et de la porosité associée dans ces horizons. Par rapport à l'horizon AN3, l'horizon AN2 est caractérisé par un moindre volume de pores inter-agrégats les plus grossiers de  $R_c 150 \mu\text{m}$  à  $15 \mu\text{m}$  (pF1 à pF2) compensé par un plus fort volume de pores inter-agrégats plus fins de  $R_c 15-1,5 \mu\text{m}$ . Ce qui correspond bien aux observations micromorphologiques qui montrent que l'horizon AN2 présente une structure microagrégée "plus tassée" (assemblage de type A) que dans l'horizon AN3.

Corrélativement dans ces horizons AN3 à AN1, la porosité grossière de  $R_c > 150 \mu\text{m}$  augmente. Elle devient très importante dans l'horizon AN1 caractérisé effectivement d'après les observations micromorphologiques par une porosité grossière plus abondante que dans les horizons AN3 et AN2, sous forme d'une porosité racinaire et surtout de larges pores résultant de l'assemblage lâche de pellets.

Notons que cette gamme de pores inter-agrégats semble fortement affectée par les phénomènes de retrait/ gonflement tant lors de l'hydratation que lors de la déshydratation à partir de pF2 si on en juge par l'allure des courbes de retrait (rappelons : le gonflement noté de pF1 à pF0,5 dans AN1; le retrait de pF1 à pF0,5 dans AN2 et AN3; le comportement apparemment idéalement déformable de pF2 à pF3). Pour les horizons inférieurs où la structure microagrégée est peu ou pas développée, et la porosité essentiellement fissurale les phénomènes de retrait/gonflement sont apparemment réduits).

#### 2) Evolution de la porosité fine et ultra-fine de $R_c$ inférieur à $1.5 \mu\text{m}$ dans l'andosol

Nous avons noté que pour cette gamme de pores, les horizons inférieurs AN6, AN5 et AN4 se distinguent essentiellement des horizons AN3 et AN2 par un plus faible volume d'eau extrait au delà de pF4,2, volume provenant de pores de  $R_c < 0,1 \mu\text{m}$ . Cette différence est à mettre en relation avec un assemblage et/ou une nature différente et une quantité différente des particules élémentaires (argiles et matière organique) (§ suivant).

L'horizon AN1 serait caractérisé par rapport à tous les autres par un faible volume de pores de  $R_c 1,5$  à  $0,1 \mu\text{m}$  si on en juge par l'absence d'eau extraite entre pF 3 et pF4,2.

### 3.2.2.2 Interprétation des courbes de rétention d'eau pour le sol brun acide

#### 1) Evolution de la porosité de $R_c > 1.5 \mu\text{m}$ : porosité inter-agrégat et porosité grossière dans le sol brun acide

La porosité de  $R_c$  compris entre  $150$  et  $15 \mu\text{m}$  (pF1 à pF2) est importante dans les horizons inférieurs BA6, BA5 et BA4 : cette porosité est attribuée à la porosité de cavités, vésiculaire. Ces mêmes horizons sont quasiment saturés à pF1, ce qui témoigne de l'absence d'une porosité plus grossière (de  $R_c > 150 \mu\text{m}$ ) à l'échelle de la motte.

- La porosité de Rc 150  $\mu\text{m}$  à 15  $\mu\text{m}$  n'est plus mise en évidence dans les horizons BA3 et BA2. Mais alors que dans BA3, cette diminution de volume poral est largement compensée par une porosité plus grossière de Rc 460 à 150  $\mu\text{m}$ , dans BA2 cette gamme de pores Rc 460  $\mu\text{m}$  à 150  $\mu\text{m}$  semble aussi faible.

Dans BA3, le volume d'eau extrait de pF1 à pF2 qui était important dans les 3 horizons inférieurs, devient quasiment nul : ce qui traduirait l'absence de pores de Rc compris entre 150 et 15  $\mu\text{m}$ . La quantité d'air à pF1 augmente par contre nettement par rapport aux horizons inférieurs (saturés à pF1) et un fort volume d'eau est extrait de pF0,5 à pF1. Ceci mettrait en évidence dans cet horizon BA3 le développement d'une porosité plus grossière (de Rc compris entre 460 et 150  $\mu\text{m}$  et même de Rc > 460  $\mu\text{m}$ ).

L'hypothèse que l'on peut formuler est celle de la disparition des cavités présentes dans les horizons inférieurs et d'un développement de la porosité inter-agrégat. Cependant au microscope la porosité inter-agrégat semble plus fine et l'absence de pores de Rc 150 à 15  $\mu\text{m}$  ne semble pas vérifiée.

Dans BA2, comme dans BA3, le volume d'eau extrait de pF1 à pF2 est quasiment nul, mais contrairement à BA3, la quantité d'air à pF1 est très faible (comme le volume d'eau extrait de pF0,5 à pF1). Finalement cet horizon est caractérisé par une faible porosité grossière de Rc > 15  $\mu\text{m}$ , dont le volume est comparable à celui des horizons profonds. Ce très faible volume de pores inter-agrégats avait été noté lors des observations micro-morphologiques.

Dans BA1, une porosité de Rc 150 à 15  $\mu\text{m}$  est à nouveau mise en évidence, en même temps que se développe la porosité de Rc 15-1,5  $\mu\text{m}$  beaucoup plus importante que dans les autres horizons. Par rapport à BA3, le volume d'eau extrait de pF0,5 à pF1 est légèrement réduit tandis que la quantité d'air existant à pF0,5 est plus importante. Par rapport à BA3, le volume des pores de Rc 460-150  $\mu\text{m}$  inter-agrégats serait donc réduit, alors que celui des pores grossiers de Rc > 460  $\mu\text{m}$  correspondant plus à une porosité grossière biologique serait plus important.

## 2) Porosité fine de Rc inférieur à 1,5 $\mu\text{m}$ (pF > 3) dans le sol Brun Acide

Pour cette gamme de pores, l'évolution verticale concerne surtout le volume de pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  (pF > 4,2) qui double depuis la profondeur vers la surface avec 3 seuils: les horizons profonds (BA5 et BA6); les horizons intermédiaires (BA4 et BA3); l'horizon de surface (BA1). Quant à l'horizon de subsurface tassé, il est caractérisé par des teneurs à pF4,2 inférieures à celle des horizons intermédiaires et plus proches de celle des horizons profonds.

Les pores de Rc inférieurs à 0,1  $\mu\text{m}$  correspondent aux pores liés aux particules élémentaires de la taille des argiles. La relation entre le volume  $\theta_{pF4,2}$  et ces particules fines sera analysée dans le paragraphe suivant .

### **3.2.3 Relation entre la teneur en eau à pF4,2 et les caractéristiques concernant les particules élémentaires les plus fines (de la taille des argiles)**

A pF4,2, l'eau est retenue au sein de pores de rayons de constriction inférieurs à 0,1  $\mu\text{m}$  qui résultent des caractéristiques et de l'arrangement des particules de la taille des argiles.

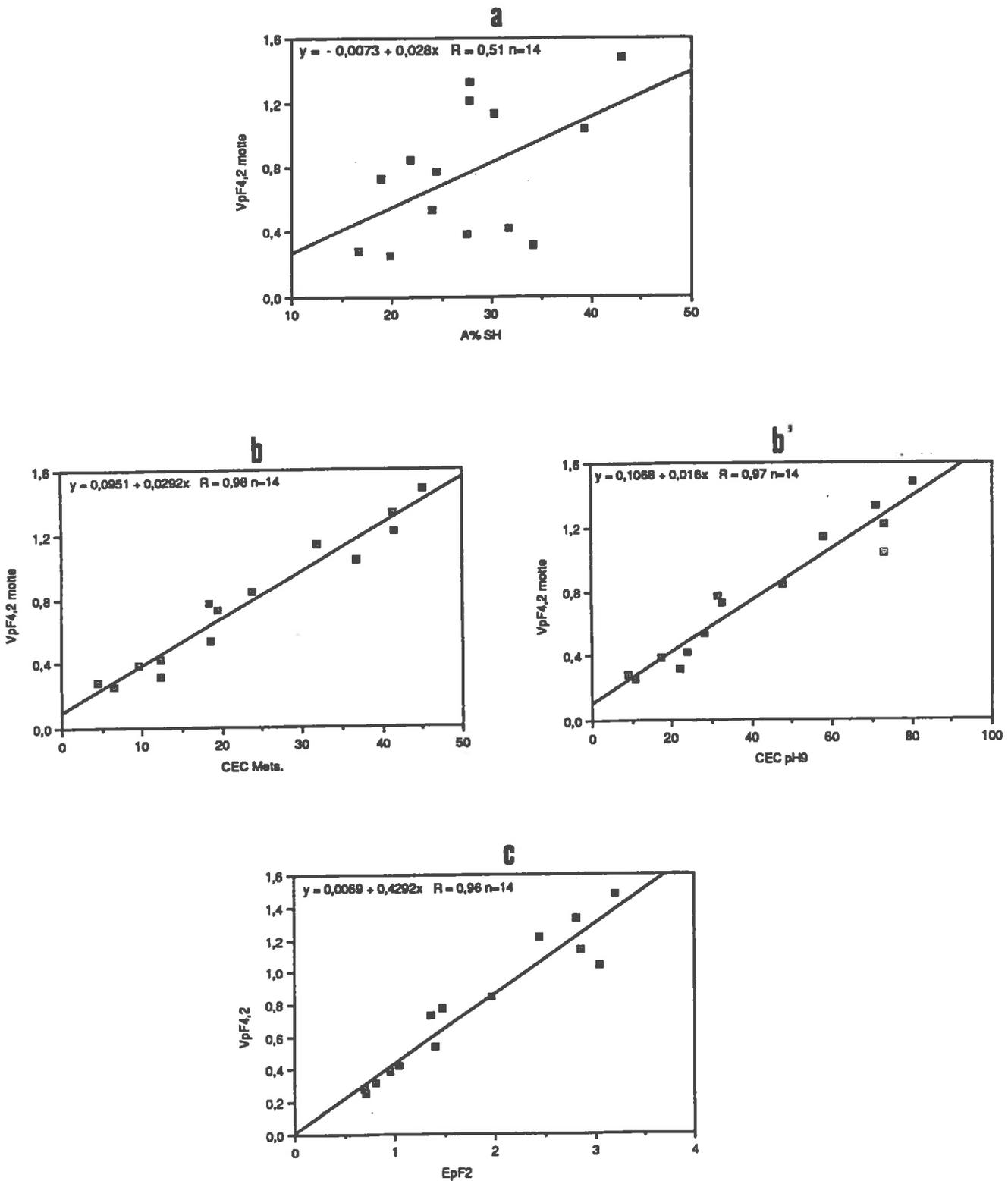
Les études expérimentales de laboratoire sur le comportement de matériaux modèle ont montré que le déterminisme des propriétés de rétention en eau des argiles pouvait être expliqué si l'on prenait en compte la minéralogie des argiles (leurs propriétés à l'échelle du feuillet ou même du cristal) et leur organisation c'est à dire l'arrangement des particules d'argile entre elles (Tessier, 1984; Pedro et Tessier, 1983). Bruand et al. (1988) ont montré que ces résultats obtenus à partir d'échantillons d'argile pure, sont applicables à des échantillons non perturbés de sols argileux.

Nous essaierons ici d'appréhender le rôle des caractéristiques liées aux particules les plus fines sur les valeurs de rétention en eau à pF4,2 des échantillons étudiés .

1/ Lorsque l'eau est retenue par la phase argileuse, les variations de teneur en eau à pF4,2 ( $\theta_{pF4,2}$ ) entre les différents échantillons peuvent être d'abord attribués à des différences dans les teneurs en argiles (fraction < à 2  $\mu\text{m}$ ).

Or, la *figure VII.9a* montre que  $\theta_{pF4,2}$  est peu corrélé avec la quantité d'argile. Le calcul du coefficient de corrélation indique que seulement 51% de la variance de  $\theta_{pF4,2}$  sont expliqués par la régression linéaire de  $\theta_{pF4,2}$  en fonction de la teneur en argile.

Si on considère seulement les échantillons andiques, la corrélation est meilleure. Grosso-modo  $\theta_{pF4,2}$  croit linéairement avec la quantité d'argile et 73% de la variance de  $\theta_{pF4,2}$  peuvent être attribués aux différences de teneurs en argile.



**Fig.VII.9** : Pour les 14 échantillons : 8 horizons des sols andiques et 6 horizons du sol brun acide : quantité d'eau retenue à pF 4,2 en fonction de la teneur en argile (a), de la capacité d'échange (b) et du volume de vide au moment du prélèvement (c).

Par contre pour les échantillons du profil de sol brun acide, la corrélation est très mauvaise; seulement 31% de la variance de  $\theta_{pF4,2}$  sont expliqués par cette relation.

2/ Il a été bien établi que les argiles pouvaient retenir des quantités d'eau variables à une valeur de contrainte hydrique donnée selon leurs caractéristiques minéralogiques (Tessier, 1984). Il est donc nécessaire de tenir compte à la fois de la quantité, et des caractéristiques minéralogiques (de la nature) des argiles granulométriques (fraction  $< 2 \mu\text{m}$  : argiles minéralogiques, complexes organiques, Acides humiques....)

Un moyen simple de le faire est d'étudier les variations de  $\theta_{pF4,2}$  en relation avec la capacité d'échange cationique des échantillons globaux (Bruand et al, 1988) qui permet de prendre en compte à la fois les argiles minéralogiques et les composés organiques (figure VII.9b). Dans ces sols (notamment les sols andiques) où la CEC est très variable selon le pH, c'est la CEC mesurée à pH9 (par  $\text{CaCl}_2$ ) (fig.VII.9b) ou la CEC mesurée par la méthode Metson (fig. VII.9b') qui donne la meilleure corrélation. La CEC mesurée au pH du sol donne une mauvaise corrélation. (A pH9, l'ensemble des surfaces des constituants est ionisée négativement si bien que la CEC à pH9 donne une estimation de la totalité des surfaces d'échange développées par l'ensemble des constituants alors que au pH du sol (acide), les différentes surfaces sont à un état d'ionisation variable.

La relation devient alors plus étroite qu'elle ne l'était avec la seule teneur en argile : 97 % de la variance de  $\theta_{pF4,2}$  est expliquée par la régression linéaire de  $\theta_{pF4,2}$  en fonction de la CEC mesurée à pH 9 (fig.VII.9b) et 98% de la variance de  $\theta_{pF4,2}$  sont expliqués par la régression linéaire de  $\theta_{pF4,2}$  en fonction de la CEC mesurée classiquement par la méthode Metson (fig.VII.9b').

Ce pourcentage de variance expliqué peut être considéré comme très satisfaisant, ce qui signifie que c'est essentiellement la nature des constituants fins susceptibles d'agir sur la CEC : Acides humiques s.l., argiles minéralogiques, complexes organiques ..., qui va déterminer les teneurs en eau de ces sols à pF4,2. Notons que cette valeur de CEC intègre aussi indirectement la taille des particules, puisqu'elle tend à être d'autant plus élevée que les particules sont plus petites.

Si on considère seulement les 8 échantillons andiques, 91% et 95% de la variance de  $\theta_{pF4,2}$  sont expliqués par la régression linéaire de  $\theta_{pF4,2}$ , respectivement en fonction de la  $\text{CEC}_{\text{pH9}}$  et de la  $\text{CEC}_{\text{Metson}}$ .

Si on considère seulement les 6 échantillons du sol brun acide : la variance expliquée est de 86 à 89%, respectivement avec  $\text{CEC}_{\text{pH9}}$  et  $\text{CEC}_{\text{Metson}}$ .

Ce paragraphe montre l'importance de la prise en compte de la minéralogie, de la nature et de l'organisation de la phase argileuse pour les propriétés de rétention en eau aux fortes valeurs de contraintes hydriques; il permet d'expliquer en grande partie les différences observées pour les teneurs en eau mesurées à pF4,2 (eau retenue dans des pores de  $R_c$  inférieurs à  $0,1 \mu\text{m}$ ).

Pour les volumes d'eau retenue dans des pores de tailles supérieures, le jeu de la structure devient prédominant.

## 4. Synthèse et conclusion

### Les grands traits distinctifs des 2 types de sol

\* Les valeurs d'indice d'eau et d'indice de vide aux faibles contraintes hydriques sont nettement plus élevées dans les sols andiques ( $2,5 \geq \theta_{pF1} \geq 1,3$ ;  $3,2 \geq E_{pF1} \geq 1,3$ ) par rapport au sol brun acide ( $1,3 \geq \theta_{pF1} \geq 0,8$ ;  $1,5 \geq E_{pF1} \geq 0,8$ ), ce qui témoigne d'un volume poral de  $R_c \leq 150 \mu\text{m}$  plus élevé dans les volumes andiques.

\* Les différences de teneurs en eau entre horizons andiques et horizons du sol brun acide proviennent du volume d'eau retenu aux forts pF:

-Pour les pF supérieurs à 3 (pF3 à pF6,6 : pores de  $R_c < 1,5 \mu\text{m}$ ), le volume d'eau extrait est toujours nettement plus élevé pour les horizons des sols andiques par rapport à ceux du sol brun acide, quels que soient les horizons concernés. La porosité de  $R_c < 1,5 \mu\text{m}$  qui correspond à la porosité la plus fine : intra-agrégats et inter-particules est toujours plus élevée quel que soient les horizons dans les sols andiques.

La corrélation  $\theta_{pF4,2} = f(CEC)$  montre que *c'est surtout la nature et la forme des constituants fins qui sont responsables de cette différence*; elle montre que la valeur de la rétention en eau à pF4,2 peut être indirectement estimée par la CEC.

- Il en va autrement pour le volume d'eau extrait de pF1 à pF3 (pores de Rc compris entre 150 et 1,5  $\mu\text{m}$ ):

Les volumes supérieurs des sols andiques (AN1 à AN3) présentent des valeurs  $\Delta\theta_{pF1\text{à}pF3}$  (liées à la porosité inter-agrégat) largement supérieures à celles de tous les horizons du sol brun acide.

Pour les pF inférieurs à 3 (pF1 à pF3), le volume d'eau extrait peut être comparable entre les horizons du sol brun acide et les horizons inférieurs des sols andiques. Par conséquent, la porosité de Rc < 1,5  $\mu\text{m}$ , qui correspond au volume de pores inter-agrégats + porosité grossière peut être comparable selon les 2 types de sol (cas de AN4 et BA1 notamment). Le volume d'eau extrait de pF1 à pF2, de pores de Rc compris entre 150 et 15  $\mu\text{m}$ , est supérieur dans la plupart des volumes du sol brun acide par rapport aux volumes profonds des sols andiques.

Ainsi, les différences essentielles entre les volumes poraux des 2 types de sol proviennent d'un plus grand volume de pores fins (Rc < 1,5  $\mu\text{m}$ ) intra-agrégats et inter-particules dans les horizons des sols andiques. Par ailleurs, le volume de porosité inter-agrégats (Rc > 1,5  $\mu\text{m}$ ) peut être comparable. Il est cependant toujours plus élevé dans les horizons supérieurs microaggrégés de l'andosol dans lesquels la structure microaggrégée est généralisée alors que dans le sol brun acide, l'horizon le plus microaggrégé montre plutôt une association de polyèdres plus ou moins denses et de microaggrégats.

\* Par ailleurs les courbes de rétention sont d'allure beaucoup plus variable selon les différents horizons de l'andosol que selon les différents horizons du sol brun acide; ce qui témoigne d'une plus grande évolution verticale du spectre poral dans les premiers que dans les seconds. Notons que cette plus grande évolution verticale dans l'andosol facilite l'analyse de l'évolution verticale du système poral et les relations avec les observations micro-morphologiques, ce d'autant plus que les structures sont plus généralisées ("généralisation de la structure microaggrégée") dans l'andosol que dans le sol brun acide. Dans ce dernier, la faible variabilité verticale et le fait que différents types de structure soient juxtaposés rend plus difficile la compréhension de l'analyse et de l'évolution verticale du spectre poral.

*L'intensité du retrait macroscopique total est très différente selon les deux types de sol, notamment si l'on compare les ensembles supérieurs.*

Dans l'andosol, le retrait total de pF1 à pF6,6, représente 18 à 44 % de la valeur de E aux faibles pF dans les horizons de l'andosol; il est le plus souvent inférieur à 20 % pour les horizons du sol brun acide.

Les courbes de retrait des horizons du sol brun acide peuvent présenter une limite de retrait (horizons BA3 à BA6), alors que ce n'est jamais le cas pour les horizons de l'andosol.

#### Illustration des grandes différences par la comparaison de horizons les plus microaggrégés des 2 types de sols (BA3 et AN3)

Les figures VII.10a et VII.10b présentent respectivement les courbes d'indice de vide, l'indice d'eau en fonction de pF des 2 horizons, et les courbes de retrait des 2 horizons. Elles illustrent les grandes différences existant entre les 2 types de sol.

*La valeur d'indice de vide E aux faibles pF est plus de 2 fois plus élevée dans AN3 par rapport à BA3 ; le volume poral est donc beaucoup plus important dans l'horizon microaggrégé de l'andosol.*

*La saturation aux faibles pF : à pF 0,5, AN3 et BA3 sont tous deux saturés (à 95%). Mais BA3 se désature plus vite : le taux de saturation à pF1 est de 79 % pour BA3, tandis qu'il est encore de 89% dans AN3. La porosité grossière est, relativement au volume de vide, plus importante dans BA3 par rapport à AN3*

La valeur d'indice d'eau à pF 1 est 2 à 3 fois plus élevée dans AN3 (2,4) que dans BA3 (1 à 0,8), et, quel que soit le domaine de pF considéré, le volume d'eau extrait (pente de la courbe) est toujours au moins 2 fois plus élevé dans AN3 que dans BA3 ; la différence la moins marquée se situe entre pF 3 et 4,2, la différence la plus accentuée se situe entre pF 1 et 2.

*Le retrait/gonflement macroscopique des faibles pF à pF6,6 est pratiquement négligeable dans BA3 alors qu'il est très élevé dans l'horizon AN3. Ainsi, alors que l'horizon microaggrégé BA3 du sol brun acide présente un système poral apparemment quasiment rigide (pas ou peu de retrait macroscopique), pour l'horizon AN3 de l'andosol, le système poral subit des déformations macroscopiques importantes selon les contraintes hydriques auxquelles l'échantillon est soumis.*

Fig.VII.10 a: Andosol et Brun Acide-Hz3-E et V fonction du pF

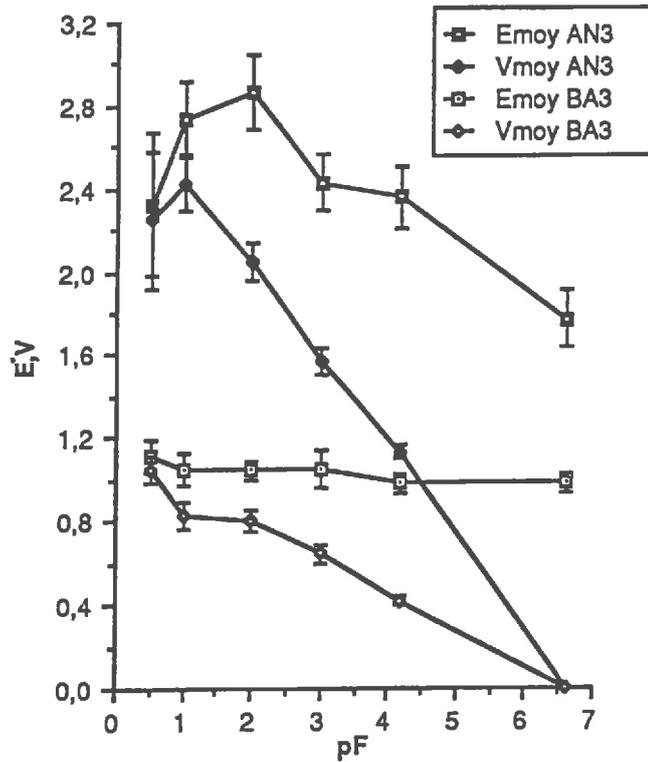


Fig.VII.10 b: Andosol et Brun Acide-Hz3-Courbe de retrait

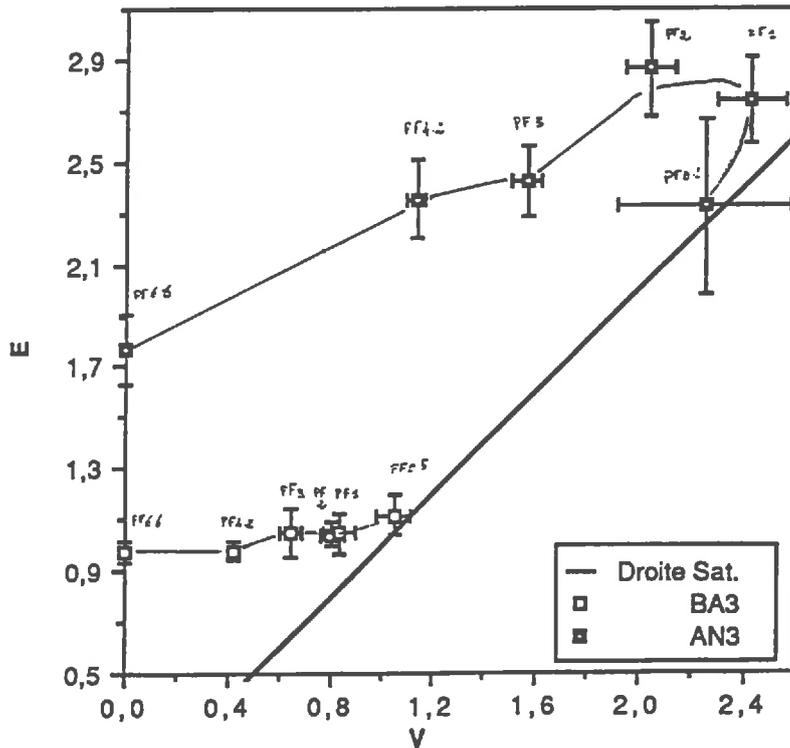


Fig.VII.10 : Comparaison des données du comportements hydriques entre les 2 horizons microagrégés de l'andosol (AN3) et du sol Brun Acide (BA3).

L'analyse des courbes de rétention peut être considérée comme une image du spectre poral existant pour les échantillons aux faibles contraintes hydriques. Cet espace poral est ici fractionné en classes imposées par les pF auxquels ont été faites les mesures; et non en classes correspondant à des seuils "réels" de la porosité.

Les mesures menées en porosimétrie à mercure ont permis d'appréhender de façon "plus continue" l'espace poral, de déterminer des classes de pores. Mais ces mesures de porosimétrie sont menées sur échantillon déshydraté à 105°C.

Or, les courbes de retrait montrent que, au moins pour certains horizons (horizons supérieurs des sols andiques, horizon BA1 du sol brun acide) il existe un retrait macroscopique important des faibles contraintes hydriques à pF6,6, témoignant d'une déformation importante, en l'occurrence d'une diminution importante du volume poral. De plus, la rigidité observée dans d'autres horizons signifie simplement qu'il n'y a pas de retrait macroscopique mais cette rigidité pourrait n'être qu'apparente.

En cela, la comparaison des courbes de rétention d'eau, des courbes d'entrée d'air issues des mesures hydriques et des courbes de volume poral mesuré en porosimétrie peut fournir des informations appréciables sur l'évolution du système poral lors de la déshydratation.

## Chapitre VIII

# Comparaison des résultats de porosimétrie à mercure et du comportement physicohydrique

## Relation avec l'organisation

On compare ici les volumes poraux correspondant à l'eau extraite et à l'air entré entre 2 valeurs de contraintes hydriques, soit 2 valeurs de rayon de constriction (loi de Jurin), et le volume poral exploré par le mercure entre ces mêmes valeurs de rayons de constriction. Les observations microscopiques permettront de proposer des interprétations concernant l'évolution des organisations en fonction des contraintes hydriques.

### 1. Mode de représentation et exemples d'interprétation

On représente graphiquement les résultats en portant (Fig.VIII.1) :

- en abscisse, un rayon  $R_c$  correspondant
  - ° au rayon de constriction des pores remplis par le mercure dans le cas de la porosimétrie;
  - ° au rayon de constriction des pores vidés de leur eau et par suite remplis d'air dans le cas des mesures physico-hydriques.
- en ordonnée, des volumes <sup>1</sup>:
  - ° dans le 1<sup>er</sup> cas : un volume poral cumulé ( $E_{Hg}$ ) exploré par le mercure,
  - ° dans le 2<sup>ème</sup> cas :
    - un volume d'eau extrait ( $\emptyset$ ), lors de la déshydratation
    - un volume d'air entré ( $A$ ), lors de la déshydratation; il est obtenu par différence entre la valeur d'indice de vide et la valeur d'indice d'eau.

Trois courbes sont ainsi établies : une à partir des données de porosimétrie à mercure, deux à partir des données des mesures physico-hydriques (courbes de rétention et courbes de retrait).

Pour comparer ces courbes, on les cale par changement d'origine; dans le cas de la porosimétrie à mercure, la valeur de rayon maximale disponible pour tous les horizons est de 167  $\mu\text{m}$ , tandis que dans les mesures hydriques on dispose pour tous les horizons de la valeur à pF1 ( $R_c$  de 148  $\mu\text{m}$ ); par conséquent pour "caler" les 2 types de méthodes, on considère les valeurs de volume d'eau, d'air et de mercure égales à 0 pour un rayon de 148  $\mu\text{m}$ .

### Trois exemples de représentation et d'interprétation

Trois exemples synthétisés par Bruand (1985), Bruand et Prost (1987), vont être ici repris succinctement. Ils permettent d'illustrer comment ces représentations graphiques peuvent rendre compte de la dynamique de l'organisation : le cas d'un matériau à espace poral rigide (la craie) (Vachier et al, 1979), le cas d'un matériau à porosité en grande partie idéalement déformable (Illite-Na) (Azzaoui, 1984), le cas d'un échantillon argileux : la Terre d'Aubues (Bruand, 1985) (Fig.VIII.1).

---

<sup>1</sup>Ces termes de volumes seront utilisés par commodité; il s'agit en fait d'indice : de volume de vide rapporté au volume de solide

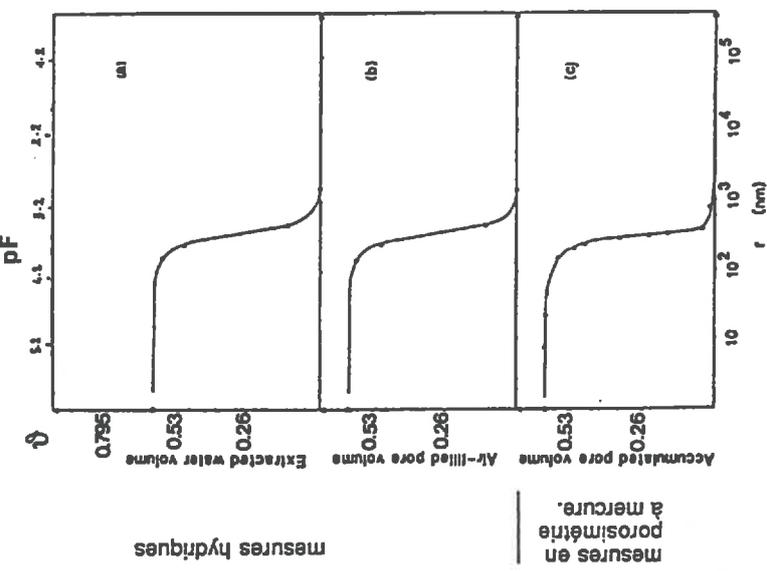


Fig. VIII.1a : Pour la craie;

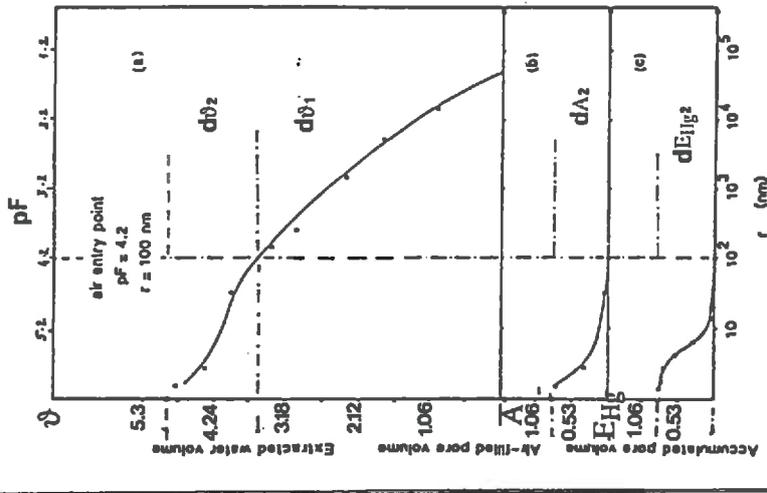


Fig. VIII.1b : Pour une argile gonflante : Illite Na;

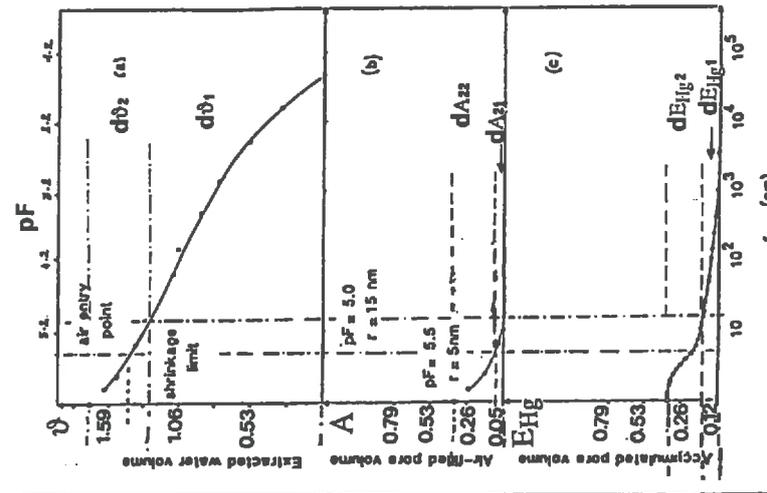


Fig. VIII.1c : Pour un échantillon micrométrique de la Terre d'Aubues.

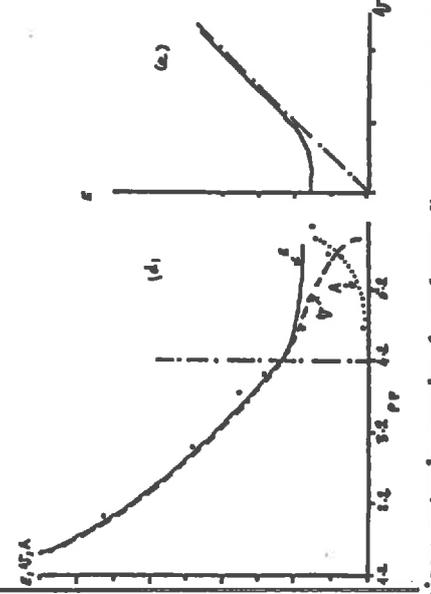
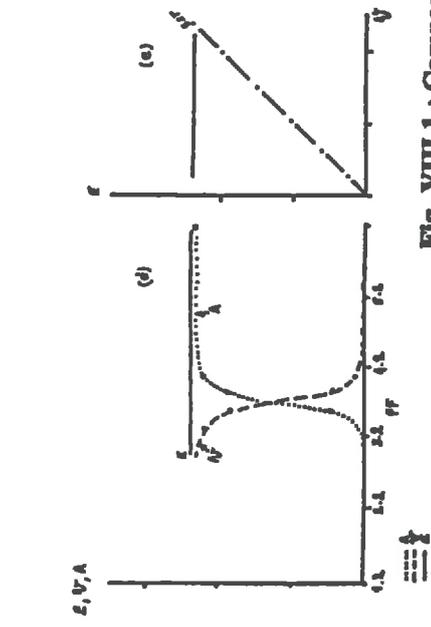


Fig. VIII.1 : Comparaison entre la courbe de volume d'eau extrait (a), la courbe de volume d'air entré (b) obtenues en mesures physico-hydrauliques et la courbe de volume poral cumulé (c) obtenue en porosimétrie. Représentation classique des courbes de rétention d'eau (d) et courbes de retrait (e) (Bruand et Prost, 1987)

° **Premier exemple : cas d'un matériau à espace poral rigide : la craie**

Les données obtenues par Vachier et al (1979) montrent que les 3 courbes sont superposables (Fig. VIII.1a). Le volume poral déterminé par l'intrusion de mercure est équivalent au volume d'eau extrait lors du processus de déshydratation et au volume de pores occupés par l'air. Autrement dit, pour une pression donnée, correspondant à une valeur déterminée de  $R_c$ , le volume d'eau extrait est égal au volume d'air entrant dans le solide et à la quantité de mercure injectée dans l'échantillon durant l'expérience d'intrusion de mercure.

On a donc pour toute valeur  $\Delta R_c$ ,  $\Delta E_{Hg} = \Delta \vartheta = \Delta A$ . Ceci correspond au comportement d'un *système poral rigide*.

° **Deuxième exemple : cas d'un matériau à espace poral en partie idéalement déformable : l'illite Na**

La même représentation, appliquée aux données obtenues par Azzaoui (1984), avec une argile gonflante (Na-Illite) (Fig. VIII.1 b), montre que deux domaines peuvent être distingués selon l'allure relative des 3 courbes.

1) Lors du processus de déshydratation, pour les  $pF$  inférieurs à 4,2 ( $R_c > 100$  nm), on observe une extraction d'eau  $\Delta \vartheta_1$  (Fig. VIII.1b(a)), mais celle-ci n'entraîne aucune entrée d'air ( $\Delta A_1 = 0$ ) (Fig. VIII.1b(b)). D'autre part, la courbe d'entrée de mercure (Fig. VIII.1b(c)) montre que l'espace poral de l'échantillon déshydraté n'est pas accessible pour des valeurs de rayon de constriction supérieures à 100 nm ( $\Delta E_{Hg1} = 0$ ).

2) Dans le deuxième domaine, pour des rayons de constriction inférieurs à 100 nm ( $pF > 4,2$ ), le processus de déshydratation entraîne toujours une certaine extraction d'eau, mais cette fois le volume d'eau extrait  $\Delta \vartheta_2$  est sensiblement équivalent au volume d'air entré  $\Delta A_2$  et au volume de mercure intrusé  $\Delta E_{Hg2}$ ; si bien que les 3 courbes sont grossièrement superposables.

Ainsi, pour le cas de cette Illite Na, le système poral peut être subdivisé en 2 types de pores à comportement différent :

- une première gamme de pores de rayons de constriction supérieurs à 100 nm, se comporte comme un *système idéalement déformable* et cela se traduit par une extraction d'eau sans entrée d'air, ni intrusion de mercure et on a :  $\Delta \vartheta_1 > 0$  et  $\Delta A_1 = \Delta E_{Hg1} = 0$ ;

- par contre pour des valeurs de  $R_c$  inférieures à 100 nm, la porosité se comporte plutôt comme un *système rigide* et on retrouve l'exemple précédent de la craie avec :  $\Delta \vartheta_2 = \Delta A_2 = \Delta E_{Hg2}$ .

° **Troisième exemple : cas d'un matériau à espace poral en partie idéalement déformable, en partie apparemment rigide : échantillon micrométrique de la Terre d'Aubues**

Les données obtenues par Bruand (1985) sur un échantillon micrométrique (pâte) de la Terre d'Aubues, illustrent encore un autre type de comportement (Fig. VIII.1c).

Les 2 courbes issues des mesures du comportement physico-hydraulique montrent que :

1) Jusqu'à  $pF = 5,0$  ( $R_c > 15$  nm), le système se déforme idéalement :  $\Delta \vartheta_1 > 0$  et  $\Delta A_1 = 0$ .

A ce stade de déshydratation correspondant à une contrainte hydrique de  $pF = 5$ , il n'y a donc plus de pores de  $R_c > 15$  nm, ceux-ci disparaissant lorsqu'ils sont vidés de leur eau.

2) A partir de  $pF 5$ , le système ne se déforme plus idéalement et il existe une certaine entrée d'air.

- Entre  $pF 5$  et  $5,5$  ( $4,7$  nm  $< R_c < 15$  nm), le volume d'eau extrait est supérieur au volume d'air entré :  $\Delta \vartheta_{21} (\approx 0,159) > \Delta A_{21} (\approx 0,053)$ ; il y a encore déformation partielle et diminution du volume poral.

- A  $pF 5,5$  ( $R_c = 4,7$  nm), la limite de retrait est apparemment atteinte, et au dessus de  $pF 5,5$ , le volume d'eau extrait est égal au volume d'air entré :  $\Delta \vartheta_{22} = \Delta A_{22}$ . Il n'y a pas de variation du volume poral; et la gamme de pores de  $R_c > 4,7$  nm se comporte apparemment comme un système rigide.

Si on compare ces résultats issus des mesures physico-hydrauliques à ceux issus de la porosimétrie à mercure obtenus sur échantillons déshydratés par séchage à l'air (contrainte hydrique correspondant à  $pF = 6,0$ ), plusieurs remarques peuvent être faites.

- La courbe de volume poral obtenue par l'expérience d'injection de mercure révèle l'existence de pores de  $R_c > 15$  nm, dont le volume peut être estimé à  $\Delta E_{Hg1} = 0,119$  dans les échantillons séchés à l'air. Ces pores ont donc été créés au dessus de pF 5.

- D'autre part, puisque à pF=5,5, le volume d'air entré dans l'échantillon n'est que de  $\Delta A_{21} = 0,053$ , on peut déduire qu'un volume poral d'au moins 0,066 ( $= \Delta E_{Hg1} - \Delta A_{21}$ ), correspondant à des pores de  $R_c > 15$  nm, a été créé pour des pF  $> 5,5$  alors que le volume poral total de l'échantillon ne variait plus et que le système était apparemment rigide.

La comparaison des 3 types de courbes permet ainsi de mettre en évidence que la phase de contrainte hydrique pF  $> 5,5$  est en fait une phase au cours de laquelle les pores de  $R_c < 4,7$  nm se referment partiellement, la diminution du volume de cette gamme de pores étant en même temps compensée par l'apparition d'un volume de pores de  $R_c > 15$  nm, si bien que la valeur du volume poral ne varie pas et que le système est apparemment rigide.

Remarque : dans le cas de l'illite Na (2ème exemple), un domaine de pores idéalement déformable (de  $R_c > 100$  nm) était également mis en évidence avec  $\Delta A_1 = 0 < \Delta \vartheta_1$ . Le fait que sur ce même domaine de pores la porosimétrie ne mettait en évidence dans l'échantillon séché aucun volume poral accessible à des valeurs de  $R_c$  supérieur à la valeur du rayon de constriction au point d'entrée d'air ( $\Delta E_{Hg1}=0$ ), était un argument en faveur de la non-crédation de pores lors d'étape ultérieure de la déshydratation.

### ° Conclusion sur ces trois exemples

Ces trois exemples montrent l'intérêt d'une telle comparaison des résultats des mesures physico-hydrriques et de porosimétrie à mercure.

- La représentation du volume d'eau extrait  $\Delta \vartheta$  lors de la déshydratation entre 2 contraintes hydriques renseigne sur la localisation de l'eau extraite, en indiquant les 2 valeurs de rayon de constriction correspondants.

La vidange  $\Delta \vartheta$  du volume poral entraîne l'apparition d'un volume d'air variable  $\Delta A$  dans l'échantillon.

- La comparaison de la courbe d'eau extraite au cours du processus de déshydratation, à celle du volume déterminé en porosimétrie permet de déterminer les domaines de porosité dont le volume a ou non varié par suite de la déshydratation.

- La comparaison de la courbe du volume d'air entré dans l'échantillon au cours du processus de déshydratation ( $\Delta A$ ), à celle du volume poral déterminé en porosimétrie à mercure sur échantillon déshydraté ( $\Delta E_{Hg}$ ) permet de mettre en évidence des volumes poraux accessibles à une valeur de rayon de constriction  $R_c$ , qui n'existaient pas dans l'échantillon en équilibre avec la contrainte hydrique correspondant à ce rayon de constriction.

C'est ce type de raisonnement qui sera appliqué par la suite.

## 2. Résultats et interprétation

Pour chacun des horizons, les 2 courbes d'eau extraite ( $\vartheta$ ) et d'air entré (A) issues des mesures physico-hydrriques et la courbe de volume de pore cumulé issue des mesures de porosimétrie à mercure ( $E_{Hg}$ ) sont représentées en superposition sur un même graphe. Les résultats sont exprimés sous forme d'indice de vide, d'indice d'eau et d'indice d'air.

Rappelons que les échantillons sur lesquels ont été réalisées les expériences d'injection de mercure sont des échantillons déshydratés par séchage à l'étuve à 105°C. Cet état hydrique correspond au plus fort stade de déshydratation (pF6,6) sur les courbes de rétention d'eau et les courbes de retrait.

Certains sigles seront utilisées pour la comparaison des volumes totaux :

- L'indice de vide à pF6,6, nommé ici " $E_{MepF6,6}$ " donne le volume de vide total existant à l'échelle de la motte déshydratée. Il comptabilise tous les pores présents à pF = 6,6, à l'échelle de la motte (y compris les pores de  $R_c > 150$   $\mu$ m et ceux de  $R_c < 3,25$  nm non pris en compte en porosimétrie);

- Le volume total de pores exploré par le mercure ( $150$   $\mu$ m  $< R_c < 3,25$  nm) est noté " $E_{tHg}$ ";

- Le volume total d'eau extraite et le volume total d'air entré entre pF1 et pF6,6 ( $150$   $\mu$ m  $< R_c < [0,37$  nm]) sont respectivement notés " $\vartheta_T$ " et " $A_T$ ".

- Le volume d'eau extrait et le volume d'air entré de pF1 à pF6,0 ( $150 \mu\text{m} < R_c < 1,5 \text{ nm}$ ), dont on ne dispose que pour les 3 horizons supérieurs de l'andosol (AN3, AN2, AN1), sont respectivement notés " $\vartheta_t$ " et " $A_t$ ". Notons que ces derniers volumes  $\vartheta_t$  et  $A_t$  correspondent à une gamme de pores plus proches de celle appréhendée par l'intrusion de mercure : la valeur de  $R_c$  correspondant à pF 6,0 ( $R_c = 1,5 \text{ nm}$ ) étant plus proche de la valeur de  $R_c$  minimale appréhendée en porosimétrie à mercure ( $R_c = 3,25 \text{ nm}$ ).

Pour la plupart des échantillons nous ne disposons pas de valeurs de mesures hydriques à pF 6,0. Il est par conséquent difficile de comparer les volumes poraux déduits de la porosimétrie à ceux déduits des mesures hydriques pour ces pores de rayons de constriction  $< 0,1 \mu\text{m}$ . (On se contentera de comparer les pentes des 2 types de mesures tout en étant conscient de l'approximation ainsi faite.)

La quantité d'air, " $A_{pF1}$ ", fournit des indications sur le volume des pores de  $R_c > 150 \mu\text{m}$  existant à pF1. Les mesures effectuées à pF 0,5 fournissent des données supplémentaires sur le volume de la gamme de pores de  $R_c$  460 à  $150 \mu\text{m}$

Les teneurs en eau mesurées à pF3 et pF4,2 sur sol tamisé à 2 mm conservé humide et/ou séché à l'air, fourniront éventuellement des données complémentaires pour discuter les résultats (Ann. VIII.1).

## 2.1 Cas des échantillons de l'Andosol

Nous avons choisi de décrire en détail les résultats pour l'un des horizons des profils andiques : le volume microagrégé AN3. Ensuite nous décrivons plus sommairement les traits distinctifs des autres volumes.

### 2.1.1 Cas de l'horizon microagrégé AN3

La figure VIII.2 présente les 3 courbes moyennes  $E_{Hg}, \vartheta, A$  pour cet horizon microagrégé. La figure présentée en annexe VIII.1 présente de plus les intervalles de confiance pour chaque point  $\vartheta$  et  $A$  des mesures hydriques et les valeurs extrêmes pour les valeurs  $E_{Hg}$  correspondant aux mêmes rayons de constriction.

#### 1). Comparaison des volumes poraux totaux déterminés selon les différentes méthodes

Le volume poral total à pF6,6 ( $E_{MepF6,6} = 1,766$ ), qui comprend l'ensemble des pores présents dans la motte, est supérieur au volume total exploré par le mercure ( $E_{tHg} = 1,515$ ). La différence (0,251) peut être attribuée au volume des pores de  $R_c > 150 \mu\text{m}$  et/ou à ceux de  $R_c < 3,25 \text{ nm}$ , non explorés par le mercure (Fig. VIII.2).

De pF1 à pF6,6, le volume total d'eau extrait ( $\vartheta_T = 2,425$ ) est largement supérieur au volume total d'air entré ( $A_T = 1,45$ ); c'est là l'effet du fort retrait macroscopique à l'échelle de la motte.

Par ailleurs, le volume d'air entré entre pF1 et pF6,6,  $A_T$ , est comparable au volume poral total exploré par le mercure ( $E_{tHg} = 1,515$ ) qui ne comprend pas les pores de  $R_c < 3,25 \text{ nm}$ .

Quant au volume d'air entré de pF1 à pF6,0 ( $150 \mu\text{m} < R_c < 1,5 \text{ nm}$ ),  $A_t$  (1,17), il est largement inférieur au volume poral total exploré par le mercure  $E_{tHg}$  ( $150 \mu\text{m} < R_c < 3,25 \text{ nm}$ ).

Les hypothèses pour expliquer la différence  $E_{tHg} - A_t = 0,345$  sont les suivantes :

- soit la déshydratation entraîne une réorganisation des pores grossiers de  $R_c > 150 \mu\text{m}$  en les amenant à des  $R_c < 150 \mu\text{m}$  qui seront alors pris en compte par la porosimétrie à mercure alors qu'ils n'ont pas été comptabilisés dans le volume d'air entré de pF1 à pF6,0. Ce sont des pores qui ont été quantifiés à pF1 ( $A_{pF1} = 0,313$ ), dont le volume est comparable à la différence :  $E_{tHg} - A_t$ . Rappelons que ces pores qui correspondent aux plus gros pores "inter-grappes", sont apparus très sensibles aux variations de contraintes hydriques (fermeture lors de l'hydratation de pF1 à pF0,5).

- soit encore, au delà de pF6,0, il y a ouverture d'une gamme de pores de  $R_c > 1,5 \text{ nm}$ , non pris en compte dans  $A_t$  mais qui seront comptabilisés dans  $E_{tHg}$ .

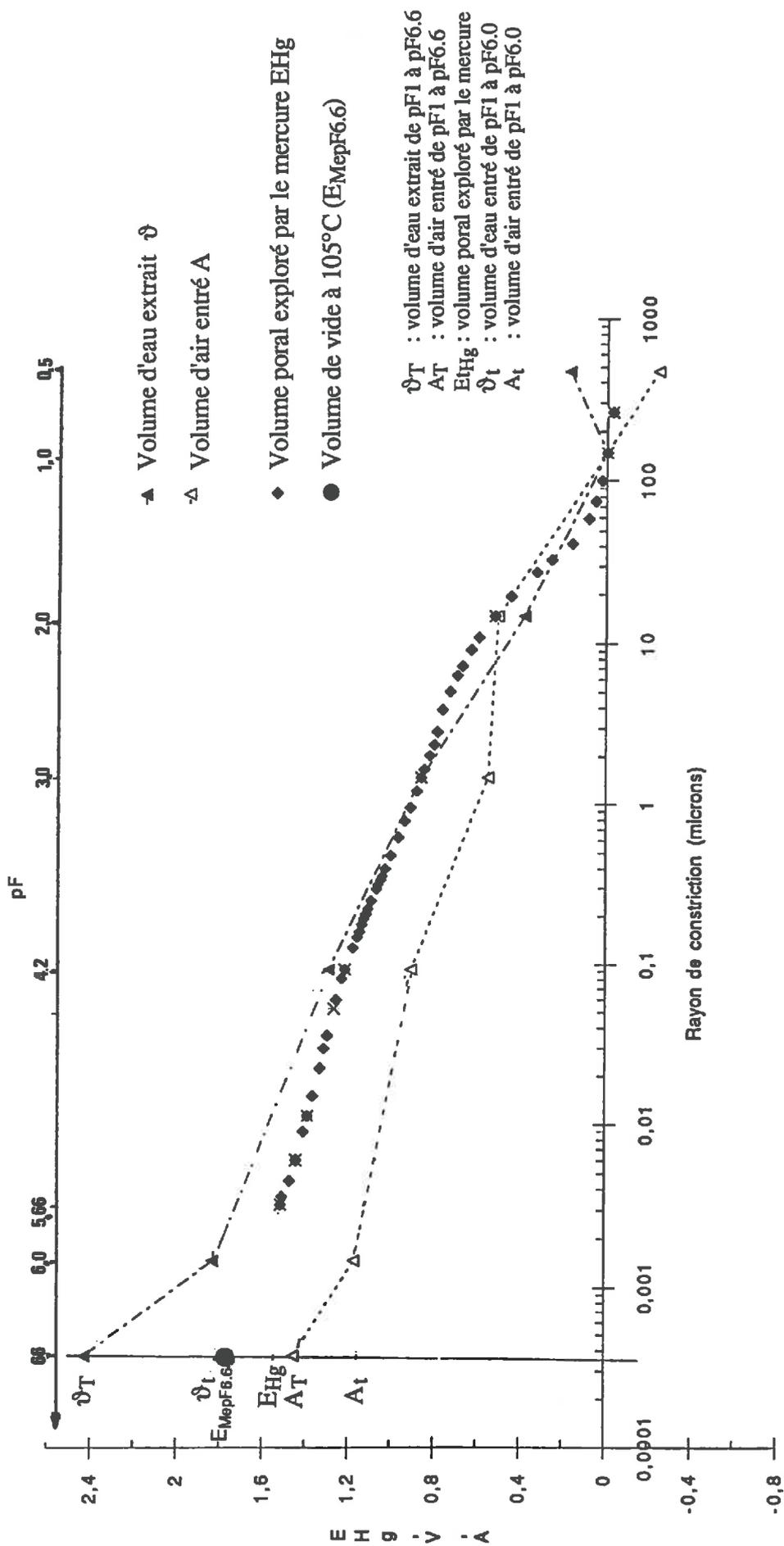


Fig. VIII.2 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait (a), du volume d'air entré (b) et du volume poral cumulé (c) en fonction de la valeur du rayon de constriction pour l'horizon microaggrégé AN3 de l'Andosol.

## 2). Comparaison des 3 courbes

Nous examinerons ici l'allure relative des trois courbes (Fig. VIII.2). Nous proposerons en même temps quelques hypothèses quant à l'évolution de l'espace poral lors de la déshydratation.

Pour cet échantillon les courbes peuvent être décomposées en 4 phases.

\* La comparaison des courbes  $\vartheta$  et A montre que, de pF1 à pF2, le volume d'eau extrait est égal au volume d'air entré dans l'échantillon. Il s'agit de la vidange des pores de Rc compris entre 150 et 15  $\mu\text{m}$ . L'observation des lames minces montre la présence de pores inter-grappes de microagrégats et de pores grossiers inter-agrégats (intra-grappes) dont les dimensions sont compatibles avec cette gamme de pores.

De plus, la comparaison avec la courbe EHg montre que, sur cette gamme de pores,  $\Delta\text{EHg} = \Delta A = \Delta\vartheta$ . Cette gamme de pores semble donc être rigide tout au long du processus de déshydratation.

\* De pF2 à pF3, l'extraction d'eau des pores de Rc compris entre 15 et 1,5  $\mu\text{m}$  n'entraîne aucune entrée d'air. Les pores vidangés correspondent alors vraisemblablement essentiellement aux pores les plus fins inter-microagrégats (et en faible part à des pores intra-agrégats). Ces pores se déformeraient donc idéalement entre pF2 et pF3; et, à pF3, ces pores ne seraient donc plus représentés.

Or la courbe d'indice de vide cumulé EHg montre l'existence d'un volume correspondant à des pores de Rc compris entre 15 et 1,5  $\mu\text{m}$ , dans les échantillons déshydratés à pF6,6. Ce volume poral, qui n'existe plus à pF3, serait donc à nouveau créé pour des pF supérieurs à 3. L'observation des échantillons déshydratés au MEB montre l'existence de pores en cavités allongées délimitant les microagrégats qui correspondraient à ces tailles de pores.

\* Le volume d'eau extrait de pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  (pF3 à pF4,2) correspond au volume d'air entré dans l'échantillon ( $\Delta\vartheta = \Delta A$ ). Il est aussi égal au volume poral exploré par le mercure pour cette même gamme de taille de pores sur échantillon déshydraté. Ces pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$ , qui correspondent aux pores intra-microagrégats, apparaissent donc rigides tout au long du processus de déshydratation. D'après les observations au MEB, ils correspondent à l'arrangement d'unités de 1 à 2  $\mu\text{m}$  de large, dont la nature n'est pas reconnaissable à l'échelle d'observation.

\* Lorsque l'eau est extraite de pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  (pF4,2 à pF6,6), on observe une certaine augmentation du volume d'air mais celui-ci est largement inférieur au volume d'eau extrait. A de telles contraintes hydriques, l'eau est extraite de pores résultant de l'assemblage des particules élémentaires de la taille des argiles. Le volume de ces pores diminue et les particules tendent vers un assemblage plus compact. On peut envisager que, par suite, durant cette phase (pF > 4,2), les microagrégats diminuent alors de volume, et que ce réarrangement se traduit par la nouvelle apparition d'un volume poral inter-agrégats sur la gamme de pores de Rc compris entre 15 à 1,5  $\mu\text{m}$  où  $\Delta\text{EHg}$  est supérieur à  $\Delta A$ .

En résumé, l'interprétation qui peut être proposée en rapport avec l'organisation est la suivante :

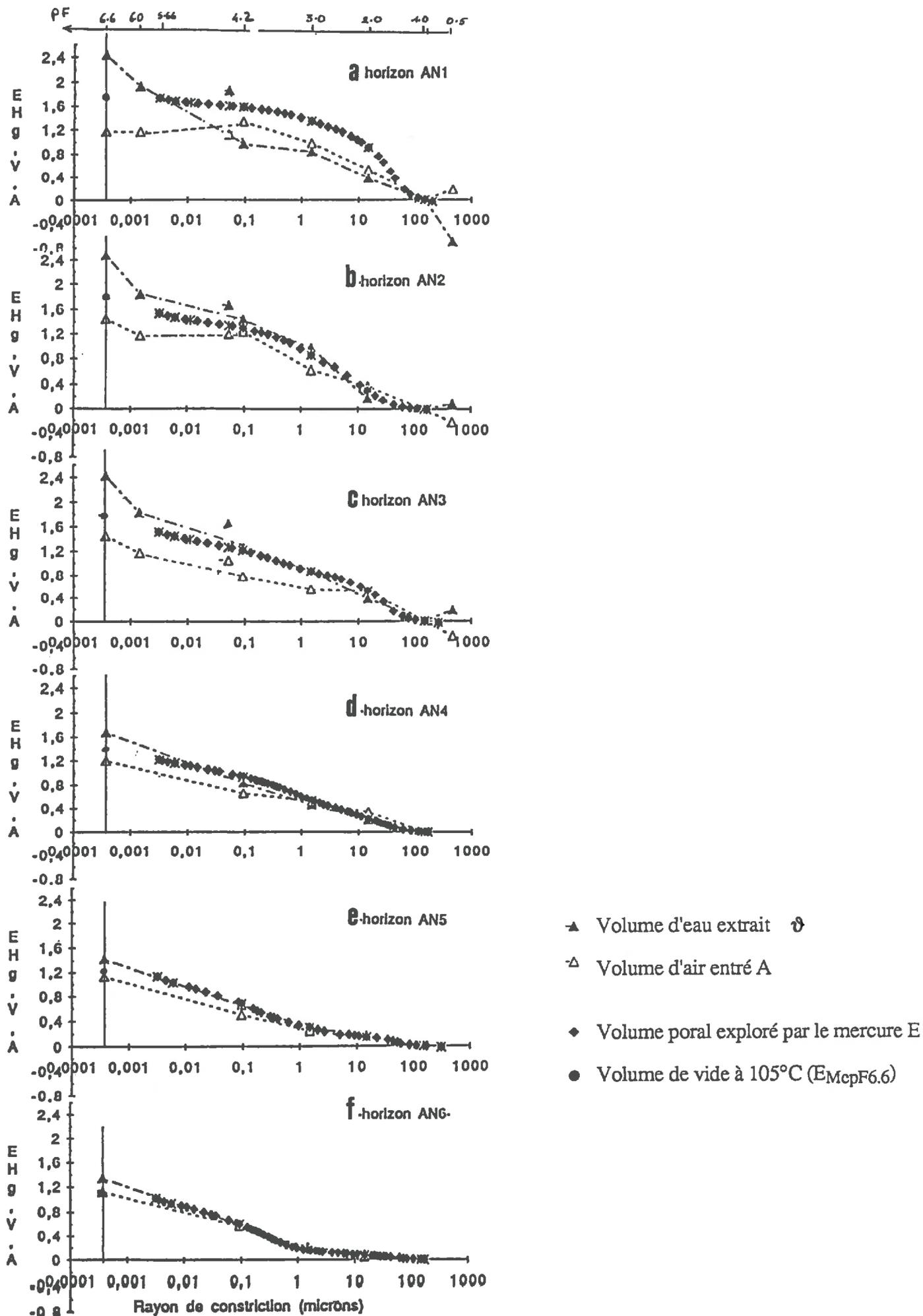
Au cours de la première phase de déshydratation, de pF1 à pF2, il y a vidange des pores inter-grappes et inter-microagrégats les plus grossiers, de Rc compris entre 150 et 15  $\mu\text{m}$ , et ce système de pores semble rigide puisque  $\Delta\text{EHg} = \Delta A = \Delta\vartheta$ .

Au cours d'une deuxième phase, de pF2 à pF3, les pores de 15 à 1,5  $\mu\text{m}$  qui correspondent aux pores inter-agrégats (intra-grappes) les plus fins se déforment lors de l'extraction d'eau et tendent à se refermer quasi-complètement ( $\Delta A = 0$ ). Ceci pourrait correspondre "à la vidange des franges capillaires" autour des microagrégats, provoquant un retrait dû aux forces de tension superficielles.

Au cours d'une troisième phase, de pF3 à pF4,2, l'eau est extraite des pores de 1,5 à 0,1  $\mu\text{m}$  qui correspondent aux pores intra-microagrégats, sans déformation. Ce système de pores semble rigide ( $\Delta\text{EHg} = \Delta A = \Delta\vartheta$ ).

Enfin, au cours de la quatrième phase, au dessus de pF4,2, lorsque l'eau est extraite des pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  qui correspondent aux pores intra-agrégats les plus fins et aux pores inter-particules élémentaires, il existe une importante déformation. Ces pores tendent à se refermer; cela entraîne un retrait des microagrégats et par suite une réapparition d'une gamme de pores inter-microagrégats de Rc compris entre 15 et 1,5  $\mu\text{m}$ .

Notons que les courbes  $\vartheta$  (obtenues en déshydratation) et EHg (obtenue par injection de mercure sur échantillon déshydraté à pF6,6) apparaissent finalement quasi-superposées de pF1 à pF4,2. Les volumes des pores de Rc compris entre 150 et 0,1  $\mu\text{m}$ , seraient donc identiques avant et après déshydratation à pF6,6; des réorganisations de ces pores lors de la déshydratation ont cependant été mises en évidence.



**Fig. VIII.3 :** Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait (a), du volume d'air entré (b) et du volume poral cumulé (c) en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 6 horizons de l'Andosol. (a : pour l'horizon AN1; b : pour l'horizon AN2; c : pour l'horizon AN3; d : pour l'horizon AN4; e : pour l'horizon AN5; f : pour l'horizon AN6).

## 2.1.2 Les autres horizons des sols andiques

La figure VIII.3 illustre les résultats pour chaque horizon de l'andosol, de bas en haut depuis l'horizon le plus profond (Fig.VIII. 3f) vers l'horizon de surface (Fig.VIII. 3a). La figure VIII.4 présente les résultats pour les horizons des rankers andiques.

Les figures en annexes VIII.2 et VIII.1 présentent de plus les intervalles de confiance pour chaque point  $\theta$  et A des mesures hydriques et les valeurs extrêmes pour les points EHg correspondant aux mêmes rayons de constriction.

Selon l'allure relative des 3 courbes, 4 groupes sont distingués : les horizons profonds AN6 et AN5; l' horizon AN4; l'horizon AN2 dont le comportement se rapproche de AN3; l' horizon superficiel de l'andosol : AN1.

### 2.1.2.1 Les horizons profonds (AN6 et AN5)

#### 1) Les volumes totaux

$E_{MepF6,6}$ ,  $E_{Hg}$  et  $A_T$  ne sont pas significativement différents (Fig.VIII.3e, 3f).

Le volume d'air entré dans l'échantillon de pF1 à 6,6 ( $A_T$ ) est quasi-équivalent au volume poral total existant dans ce même échantillon à pF6,6 ( $E_{MepF6,6}$ ) (ce volume comprenant aussi les pores de  $R_c > 150\mu m$ ), et au volume de pores appréhendé par la porosimétrie à mercure ( $E_{Hg}$ ) (ce dernier volume ne comprenant pas les pores de  $R_c < 3,25\text{ nm}$ )

L'égalité  $E_{MepF6,6} = A_T$  s'explique bien par le fait que ces horizons profonds ne présentent qu'une faible porosité de  $R_c > 150\mu m$  ( $A_{pF1} = 0$  à  $0,07$ ).

Pour expliquer l'égalité  $E_{Hg} = A_T$ , on peut envisager qu'il n'existe pas de pores de  $R_c < 3,25\text{ nm}$  dans les échantillons séchés à  $105^\circ C$ , et que par suite, le volume total de pores existant à pF6,6 est appréhendé par la méthode de porosimétrie à mercure ( $E_{MepF6,6} = E_{Hg}$ ).

$\theta_T$  est faiblement supérieur à  $A_T$ , indiquant un léger retrait.

#### 2) comparaison des 3 courbes

Pour ces horizons profonds AN6 et AN5 (Fig.VIII.3f et 3e), 2 grandes phases peuvent être distinguées.

\* Les 3 courbes sont superposables au moins sur la gamme de pores de  $R_c > 0,1\mu m$ . Le volume poral déterminé par l'intrusion de mercure sur échantillon déshydraté à pF6,6 est équivalent au volume d'eau extrait et au volume d'air entré lors du processus de déshydratation.

Pour ces horizons profonds, les pores de  $R_c$  compris entre  $150$  et  $0,1\mu m$ , correspondent en partie à des pores inter-agrégats fissuraux et de cavités et aux pores intra-agrégats. Ce système poral n'est pas ou peu affecté par la déshydratation sur la gamme de contraintes hydriques allant de pF1 à pF6,6 et il paraît rigide, contrairement au système poral lié à l'assemblage des microagréats de l'horizon AN3.

\* Pour les pores de  $R_c < 0,1\mu m$ , la pente de la courbe d'entrée d'air est légèrement inférieure à la pente de la courbe d'extraction d'eau, elle même égale à la pente de la courbe  $E_{Hg}$ . Au dessus de pF4,2, il existe donc un retrait partiel qui est probablement dû à un réarrangement des particules élémentaires. Ce retrait n'entraîne pas de réorganisation perceptible pour une autre gamme de pores.

Puisque  $E_{Hg}$  et  $A_T$  sont égaux, et que, d'autre part, les mesures de teneur en eau sur sol tamisé à  $2\text{ mm}$  montrent que les valeurs d'indices d'eau sont très peu modifiées selon que les mesures sont faites sur sol conservé humide ou sur sol séché à l'air (pF6,0) (Ann.VIII.6), on peut supposer que la porosité n'est pas déformée et s'est comportée comme un système rigide de pF1 à pF6,0, puis que le volume de pores de  $R_c < 1,5\text{ nm}$  diminue au dessus de pF6,0.

### 2.1.2.2 L' horizon AN4

L'horizon AN4 présente des caractéristiques intermédiaires entre celles de l'horizon AN3 et celles des horizons profonds (Fig. VIII.3d).

### 1) Les volumes totaux

Comme pour les horizons profonds,  $E_{MepF6,6}$  est comparable à  $E_{tHg}$  et à  $A_T$ . Par contre,  $\vartheta_T$  leur est largement supérieur témoignant d'un retrait macroscopique.

### 2) Comparaison des courbes

Trois phases peuvent être distinguées lors de la déshydratation.

\* Pour  $150 \mu\text{m} > R_c > 1,5 \mu\text{m}$  (pF1 à pF3), le volume d'eau extrait est égal au volume d'air entré dans l'échantillon; de plus pour cette gamme de pores, le volume poral exploré par le mercure est comparable :  $\Delta\vartheta = \Delta A = \Delta E_{Hg}$ . Cette gamme de pores, qui correspond à la porosité inter-agrégats, semble donc réellement rigide tout au long de la déshydratation. La déformation des pores inter-agrégats les plus fins constatée dans le volume AN3 n'est ici plus observée.

\* L'extraction d'eau des pores de  $R_c$  compris entre  $1,5$  et  $0,1 \mu\text{m}$  (pF3 à pF4,2) qui correspondent à des pores intra-agrégats, entraîne l'apparition d'un volume d'air inférieur au volume d'eau extrait ( $\Delta\vartheta < \Delta A$ ). Ces pores seraient partiellement déformés entre pF3 et pF4,2. Or, la courbe de porosimétrie à mercure met en évidence un volume poral  $\Delta E_{Hg} > \Delta A$  dans les échantillons déshydratés sur cette même gamme de taille de pores. Des pores de  $R_c$  compris entre  $1,5$  et  $0,1 \mu\text{m}$  seraient donc créés au delà de pF4,2.

\* Au delà de pF4,2, le volume d'eau extrait de pores de  $R_c < 0,1 \mu\text{m}$  est supérieur au volume d'air entré.  $\Delta\vartheta > \Delta A$ ; par ailleurs, la pente de la courbe  $E_{Hg}$  est inférieure à celle du volume d'air entré. A de telles contraintes hydriques, le réarrangement des particules élémentaires pourrait être partiellement compensé par l'ouverture de pores de  $R_c$  compris entre  $1,5$  et  $0,1 \mu\text{m}$ .

Ces différentes observations permettent de proposer des interprétations quant à l'évolution du système poral lors de la déshydratation pour cet horizon AN4:

Dans cet horizon, la porosité de  $R_c$  compris entre  $150$  et  $1,5 \mu\text{m}$  correspond à la fois à des pores inter-grappes et/ou inter-microagregats proches de ceux du volume AN3, et à des pores fissuraux correspondant aux domaines à agrégation plus proche des volumes profonds; d'autre part par rapport à AN4, la sur-structure en polyèdres des microagregats est plus importante. Il est envisageable que ce réseau de polyèdres associés aux microagregats puisse, en quelque sorte, constituer une armature qui expliquerait la rigidité de l'ensemble des pores de  $R_c$  compris entre  $150$  et  $1,5 \mu\text{m}$  liés aux assemblages des agrégats.

La porosité intra-agrégats de  $R_c$  compris entre  $1,5$  et  $0,1 \mu\text{m}$  semble par contre se déformer faiblement de pF3 à pF4,2; puis alors que l'eau est extraite des pores les plus fins (pF > 4,2), la réduction du volume de pores de  $R_c < 0,1 \mu\text{m}$ , produirait la réapparition d'un volume poral sur la gamme de pores intra-agregats de  $R_c$  compris entre  $1,5$  et  $0,1 \mu\text{m}$ .

#### 2.1.2.3 L'horizon AN2

##### 1) les volumes totaux

Pour cet horizon AN2, on retrouve les observations faites dans le cas de AN3 pour les volumes totaux :  $E_{MepF6,6} > E_{tHg}$ , et  $\vartheta_T > E_{tHg} \approx A_T > A_t$ , avec un fort retrait à l'échelle macroscopique (Fig. VIII.3b)

##### 2) comparaison des 3 courbes

Comme dans l'horizon AN3, 4 phases peuvent être distinguées selon l'allure relative des 3 courbes et sur chacune d'elles l'allure relative des 3 courbes est comparable à celle décrite pour l'horizon AN3. La même interprétation de l'évolution du système poral lors de la déshydratation que celle envisagée pour l'horizon AN3, peut donc être ici aussi proposée.

#### 2.1.2.4. L'horizon superficiel AN1

##### 1) Volumes totaux

Cet horizon AN1 se distingue des autres horizons par une quantité d'air entrée dans l'échantillon de

pF1 à pF6,6, ( $A_T \approx 1,17$ ), bien inférieure au volume poral appréhendé par la porosimétrie à mercure ( $E_{tHg} = 1,73$ ).

Ce volume  $E_{tHg}$  est par ailleurs égal au volume total de pores existant dans la motte à pF6,6 ( $E_{MepF6,6} = 1,79$ ), ce qui signifierait que la totalité du volume poral existant à l'échelle de la motte à pF6,6 peut être exploré par l'expérience d'injection de mercure; il n'y aurait donc plus de pores de  $R_c > 150 \mu m$ , ni de pores de  $R_c < 3,25 \text{ nm}$  dans l'échantillon déshydraté. Le fait que le volume d'air entré de pF1 à pF6,6,  $A_T (1,17)$ , soit inférieur au volume de pores explorés par le mercure,  $E_{tHg} (1,73) (\approx E_{MepF6,6})$ , peut traduire que des pores qui étaient initialement de  $R_c > 150 \mu m$  ont été refermés à des  $R_c < 150 \mu m$  et sont alors accessibles par le mercure. Des pores de  $R_c > 150 \mu m$  sont mis en évidence à pF1; leur volume peut être estimée par la valeur  $A_{pF1}$ .

En outre, le fait que les différentes valeurs  $A_T$ ,  $E_{tHg}$  et  $E_{MepF6,6}$  soient toutes largement inférieures au volume d'eau extrait de l'échantillon de pF1 à 6,6 ( $\vartheta_T = 2,44$ ) (Fig.VIII.3a) traduit le fort retrait macroscopique affectant cet horizon superficiel lors de la déshydratation.

## 2) Comparaison des 3 courbes

Cet horizon se distingue de tous les horizons sous-jacents par la différence existant entre les résultats des mesures hydriques et de porosimétrie à mercure pour la gamme de pores la plus grossière. Trois phases peuvent être distinguées selon l'allure relative des 3 courbes.

\* De pF1 à pF 2, l'extraction d'eau des pores de  $R_c$  compris entre 150 et 15  $\mu m$ , entraîne l'apparition d'un volume d'air équivalent au volume d'eau extrait ( $\Delta\vartheta = \Delta A$ ). Le système poral est apparemment rigide.

Or, sur cette même gamme de pores, la porosimétrie à mercure met en évidence un volume poral  $\Delta E_{tHg}$  beaucoup plus important que les volumes déduits des mesures physico-hydriques ( $\Delta\vartheta_1 = \Delta A_1 < \Delta E_{tHg}$ ). C'est notamment cette différence qui induit l'inégalité  $E_{tHg} > A_T$ .

Ceci peut s'expliquer par une réduction de la taille des pores les plus grossiers (initialement de  $R_c > 150 \mu m$ ) qui finalement les rendrait accessibles à la porosimétrie à mercure. Cette gamme de pores ainsi affectée par les déformations correspond aux pores inter-pellets observés au microscope optique. Lors de la déshydratation, le volume des pores de  $R_c > 15 \mu m$  serait ainsi conservé mais la taille des pores les plus grossiers de  $R_c > 150 \mu m$ , serait réduite à des pores de  $R_c$  compris entre 150 et 15  $\mu m$ . Les pores en larges cavités polyconcaves caractéristique de cet horizon AN1 apparaissent ainsi très sensibles aux variations de contraintes hydriques.

Rappelons qu'un gonflement "idéal" avec forte entrée d'eau, sans réduction du volume d'air a été observé lors de l'hydratation de pF1 à pF 0,5; ceci a été interprété comme étant dû à l'augmentation du volume des pores de  $R_c$  compris entre 460 et 150  $\mu m$  inter-pellets. Cette même porosité serait aussi déformée lors de la déshydratation.

\* Pour des  $R_c$  compris entre 15 et 0,1  $\mu m$  (pF2 à pF4,2), les 3 courbes sont superposables.. Cette gamme de pores, qui correspond essentiellement dans cet horizon superficiel à la plus fine porosité inter-agrégat, et à une porosité intra-agrégats de très faible volume, serait donc rigide lors de la déshydratation.

\* Pour des  $R_c < 0,1 \mu m$ , la forte extraction d'eau n'entraîne aucune entrée d'air. Par ailleurs la pente de la courbe EHg est très faible. Au dessus de pF4,2, les particules de la taille des argiles tendent donc vers un assemblage extrêmement compact qui se traduirait dans cet horizon superficiel très organique par la quasi-disparition des pores de  $R_c < 0,1 \mu m$  qui apparaissent ici quasiment idéalement déformables.

Pour tous les échantillons de cet andosol, on constate une égalité notable des volumes d'eau extraits et des volumes poraux de mercure intrusés sur la gamme de  $R_c$  compris entre 150 et 0,1  $\mu m$ . Les réorganisations qui sont mises en évidence par les courbes de retrait ne sont donc pas appréhendables par la seule comparaison des courbes de rétention d'eau et des courbes de volume poral cumulé. Dans ces horizons de l'andosol, le volume des pores accessibles à des  $R_c$  compris entre 150 et 0,1  $\mu m$  et sa répartition sur les 3 domaines de pores ( $R_c$  150 à 15  $\mu m$ ;  $R_c$  15 à 1,5  $\mu m$ ;  $R_c$  1,5 à 0,1  $\mu m$ ) est identique aux faibles pF et sur échantillon séché à 105°C, et c'est la porosité la plus fine, de rayons de constriction inférieur à 0,1  $\mu m$  lié à l'arrangement des particules fines qui est très réduite en volume sur échantillon déshydraté à 105°C; cette réorganisation se produit au dessus de pF4,2. Elle entraîne un retrait macroscopique important, dont l'intensité est fonction de la nature et du mode d'arrangement préalable des particules de la taille des argiles; on note qu'il semble d'autant plus important que l'échantillon est riche en matière organique.

### 2.1.3 Résumé et conclusion pour les sols andiques

#### *Evolution des organisations et notamment de la porosité lors de la déshydratation*

Le volume et la géométrie (taille) des pores de Rc compris entre 150 et 0,1  $\mu\text{m}$  peut être fortement affecté lors de la déshydratation. La comparaison des 3 courbes permet de mettre en évidence des comportements différents de l'espace poral en fonction des organisations observées. Les interprétations qui peuvent être proposées sont ici résumées.

#### Les horizons profonds AN5 et AN6 :

Dans les horizons profonds, les pores de Rc compris entre 150 à 0,1  $\mu\text{m}$  peuvent être considérés comme rigides tout au long du processus de déshydratation (superposition des 3 courbes EHg,  $\vartheta$ , A). Le système poral ne présente aucune déformation pour des contraintes hydriques inférieures à pF4,2. Au dessus de pF4,2 (et probablement à pF > 5,7), une déformation partielle affecte les pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  qui diminuent de volume sans que cela entraîne de modification perceptible du volume poral correspondant à une autre gamme de taille de pores..

L'interprétation qui peut être proposée en rapport avec l'organisation est la suivante : les fissures inter-agrégats polyédriques, comme la porosité de cavités intra-agrégats qui correspondent à la porosité la plus grossière (accessible à des Rc de 60 à 50  $\mu\text{m}$  en porosimétrie à mercure) *apparaissent totalement rigides* lors du processus de déshydratation de pF1 à pF6,6.

La porosité intra-agrégats la plus fine (classe 2 de volume important de la porosimétrie à mercure) serait elle aussi apparemment peu déformable. Seule la porosité la plus fine liée à l'assemblage des particules élémentaires apparaît partiellement déformable dans ces horizons profonds.

#### Les horizons AN3 et AN2, à structure microagrégée

L'étude de l'horizon AN3 montre que les courbes peuvent se décomposer en 4 domaines :

La porosité la plus grossière de Rc 150 à 15  $\mu\text{m}$  liée à l'arrangement des microagréats, d'où l'eau est extraite de pF1 à pF2, semble peu déformable lors de la déshydratation ( $\Delta\vartheta = \Delta A = \Delta E_{\text{Hg}}$ )

La porosité inter-agrégats plus fine de Rc 15 à 1,5  $\mu\text{m}$  diminue nettement de volume de pF2 à pF3 ( $\Delta\vartheta < \Delta A$ ) mais un nouveau volume poral est recréé sur cette gamme de pores ( $\Delta A < \Delta E_{\text{Hg}}$ ) pour des pF > 4,2, suite au retrait des microagréats

La porosité de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  qui correspond à la porosité intra-agrégats d'où l'eau est extraite de pF3 à pF4,2, se comporte à nouveau comme une gamme de pores rigide.

Aux pF > 4,2, lorsque l'eau est extraite des pores les plus fins, il se produit un réarrangement des particules élémentaires fines entraînant un retrait des microagréats et la réouverture d'une gamme de pores de Rc compris entre 15 et 1,5  $\mu\text{m}$ .

#### L'horizon AN4

La comparaison des 3 courbes montre un comportement intermédiaire entre celui des volumes profonds et le volume AN3.

Les pores inter-agrégats, de Rc compris entre 150 et 1,5  $\mu\text{m}$ , d'où l'eau est extraite de pF1 à pF3 apparaissent rigides ( $\Delta\vartheta = \Delta A = \Delta E_{\text{Hg}}$ ) tout au long de la déshydratation. Cette rigidité des pores inter-agrégats est attribuée à la moindre généralisation de la structure microagrégée, à l'existence d'un réseau de polyèdres qui pourrait réduire les déformations en constituants en quelque sorte une armature.

#### L'horizon AN1

Cet horizon qui présente une organisation composée d'un assemblage lâche de pellets a encore un comportement différent avec 3 phases :

La porosité la plus grossière inter-pellets (de Rc > 15  $\mu\text{m}$ ) apparaît très déformable. Ceci est attesté à la fois : - par un volume poral beaucoup plus élevé sur échantillon déshydraté ( $\Delta E_{\text{Hg}} > \Delta A = \Delta\vartheta$ ) pour les pores de Rc compris entre 150 et 15  $\mu\text{m}$  qui est interprété comme dû à la réduction de taille de pores initialement plus grossiers; - et par le gonflement intervenant lors de l'hydratation (chap.VII).

Les pores les plus fins inter-pellets et les pores intra-pellets de Rc compris entre 15 et 0,1  $\mu\text{m}$  seraient peu affectés par la déshydratation.

Quant aux pores les plus fins (Rc < 0,1  $\mu\text{m}$ ), ils sont nettement déformés au dessus de pF4,2, alors que les particules élémentaires tendent vers un assemblage très compact.

## 2.2 Cas des échantillons du sol brun acide

Comme pour les sols andiques, nous décrirons en détail le volume microagrégé BA3, puis plus sommairement les autres horizons du sol brun acide.

### 2.2.1 Caractérisation du volume microagrégé BA3

La figure VIII.4 présente les 3 courbes moyennes pour cet horizon microagrégé du sol brun acide. La figure présentée en annexe VIII.4 présente de plus les intervalles de confiance pour chaque point  $\vartheta$  et A des mesures hydriques et les valeurs extrêmes pour les points  $E_{Hg}$  correspondant aux mêmes rayons de constriction.

#### 1) Comparaison des volumes totaux déterminées selon les différentes méthodes

Dans cet horizon BA3 (Fig. VIII.4), les volumes d'eau extrait et d'air entré dans l'échantillon lors de la déshydratation de pF1 à pF6,6 ne sont pas significativement différents; d'autre part les courbes  $\vartheta$  et A sont quasiment superposées tout au long de la déshydratation de pF1 à pF6,6 et le système poral est donc "apparemment rigide" sur cette gamme de contraintes hydriques.

Or le volume poral total exploré par le mercure dans l'échantillon déshydraté à 105°C ( $E_{tHg} \approx 1,10$ ) est largement supérieur au volume d'eau extrait ( $\vartheta_T = 0,83$ ) lors de la déshydratation de pF1 à pF6,6.

Par ailleurs, le volume  $E_{tHg}$  est comparable au volume poral total  $E_{MepF6,6}$  (0,99), qui comprend les pores grossiers de  $R_c > 150 \mu m$  et les pores les plus fins de  $R_c < 3,25 \text{ nm}$  non pris en compte par  $E_{tHg}$ . Il faudrait donc admettre que l'ensemble des pores existant dans l'échantillon à pF6,6 sont des pores de  $R_c$  compris entre  $150 \mu m$  et  $3,25 \text{ nm}$ .

La différence  $E_{tHg} - \vartheta_T = 0,27$  ( $\approx E_{tHg} - A$ ) peut s'expliquer de la manière suivante :

- par le fait que la déshydratation entraîne une réorganisation des pores grossiers de  $R_c > 150 \mu m$  en les amenant à des  $R_c < 150 \mu m$  qui seront alors pris en compte par la porosimétrie à mercure alors qu'ils n'ont pas été comptabilisés dans le volume d'air entré de pF1 à pF6,6. Ces pores ont été quantifiés à pF1 ( $A_{pF1} = 0,21$ ).

- et/ou par le fait qu'au delà de pF5,66 ( $R_c \approx 3,25 \text{ nm}$ ), il y a ouverture d'une gamme de pores de  $R_c > 3,25 \text{ nm}$  qui seront comptabilisés dans le volume  $E_{tHg}$ .

#### 2) Comparaison des 3 courbes

Quatre phases peuvent être distinguées selon l'allure relative des courbes (Fig. VIII.4)

\* La comparaison des courbes  $\vartheta$  et A montre que, de pF1 à pF2, le volume d'eau extrait de pores de  $R_c$  compris 150 et  $15 \mu m$  est très faible et égal au volume d'air entré dans l'échantillon ( $\Delta\vartheta = 0,027 = \Delta A = 0,025$ ).

Or, l'expérience d'injection de mercure révèle l'existence d'un fort volume  $\Delta E_{Hg1}$  (0,34) sur la gamme de pores de  $R_c$  compris entre 150 et  $15 \mu m$ . Les mesures hydriques montrent qu'à pF1, il existe un volume de pores non occupé par l'eau correspondant à des pores de  $R_c > 150 \mu m$  ( $A_{pF1} = 0,21$ ). Un volume de pores comparable à celui mis en évidence par la porosimétrie à mercure pour des  $R_c$  compris entre 150 et  $15 \mu m$  sur échantillon déshydraté à pF6,6, existait donc au début du processus de déshydratation mais ce volume correspondait alors à des pores plus grossiers de  $R_c > 150 \mu m$  occupés par l'air à pF1.

Le volume des pores de  $R_c > 15 \mu m$ , qui correspond aux pores inter-agrégats, est donc globalement conservé lors de la déshydratation mais il a fait l'objet d'une réorganisation : on peut envisager que les pores de  $R_c > 150 \mu m$  présents dans l'échantillon aux faibles contraintes hydriques évoluent vers des pores de  $R_c$  compris entre 150 et  $15 \mu m$  lors de la déshydratation sans modification du volume apparent; le système se comportant comme un système apparemment rigide.

\* De pF 2 à pF3, soit pour les pores de  $R_c$  compris entre 15 et  $1,5 \mu m$ , le volume d'eau extrait est égal au volume d'air entré, et sur cette même gamme de pores le volume de mercure leur est équivalent ( $\Delta\vartheta = \Delta A = \Delta E_{Hg}$ ). Le système de pores de  $R_c$  compris entre 15 et  $1,5 \mu m$ , qui correspond aux pores inter-agrégats les plus fins et à une partie de la porosité intra-agrégats se comporte donc comme un système rigide.

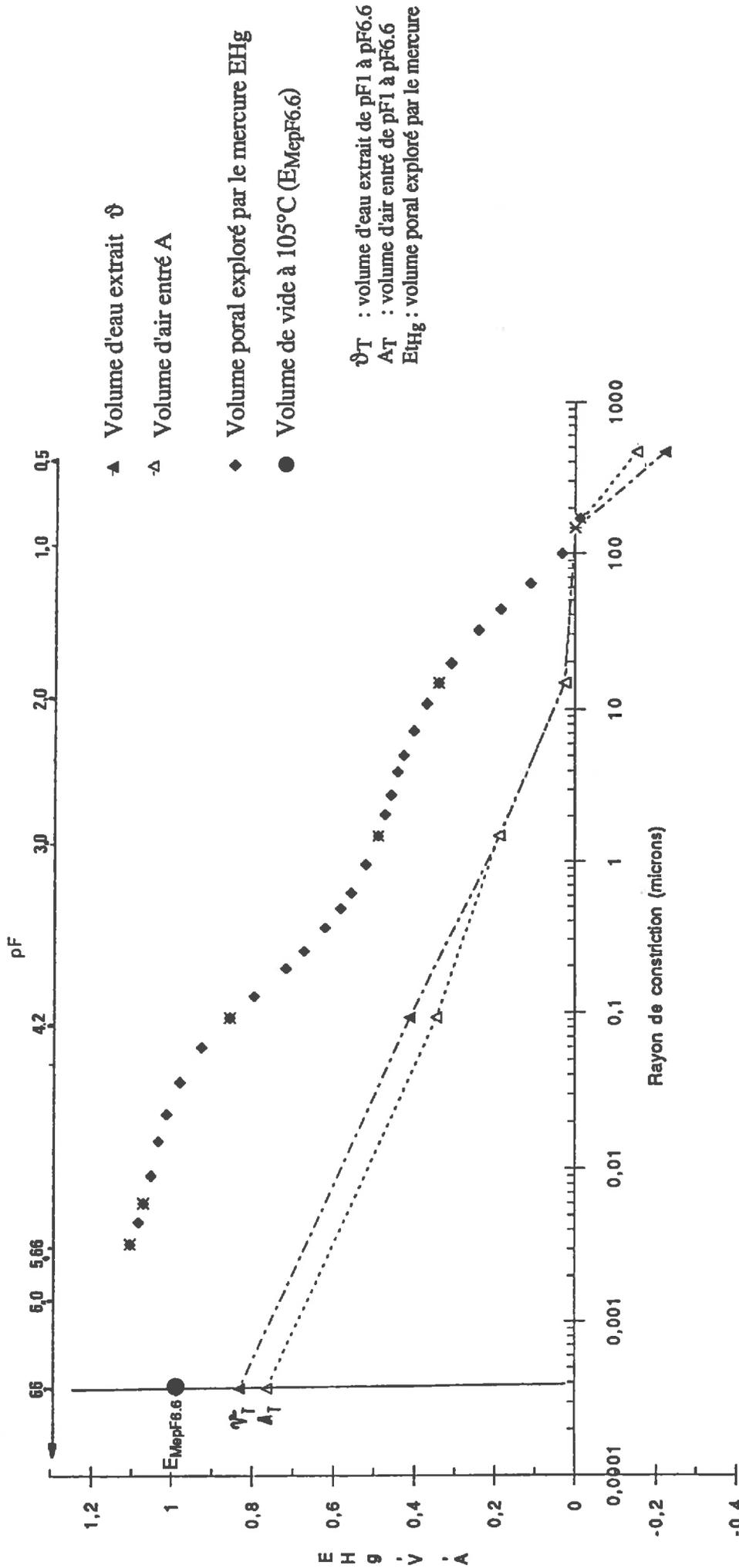


Fig.VIII.4 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait (a), du volume d'air entré (b) et du volume poral cumulé (c) en fonction de la valeur du rayon de constriction pour l'horizon le plus microagrégé BA3 du sol Brun Acide.

\* Pour la gamme de pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$ , lors du processus de déshydratation (pF3 à pF4,2), on observe un volume d'eau extrait ( $\Delta\vartheta \approx 0,22$ ) proche du volume d'air entré ( $\Delta A \approx 0,17$ ) et le système est apparemment proche de la rigidité. Or sur cette même gamme de pores, la porosimétrie à mercure révèle, dans l'échantillon déshydraté à 105°C, l'existence d'un volume  $\Delta E_{Hg}$  supérieur ( $\Delta E_{Hg} \approx 0,37$ ).

Des pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$ , dont le volume poral peut être estimé à au moins 0,15 unités ( $\Delta E_{Hg} - \Delta\vartheta$ ), ont donc été créés à des contraintes hydriques correspondant à des pF > 4,2.

\* Pour des pF > 4,2, le volume d'eau extrait correspond au volume d'air entré dans l'échantillon ( $\Delta\vartheta = \Delta A$ ) ; il n'y a pas de diminution du volume poral et le système poral est "apparemment rigide". En fait, il est probable que lors de cette phase de la déshydratation, un volume poral représenté par des pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  ait été créé. L'extraction d'eau des pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  entraînerait ainsi l'apparition d'un volume d'air dont une partie serait due à la création de pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$ . Le volume d'eau extrait des pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  serait ainsi supérieur au volume d'air entré dans ces mêmes pores, mais cette déformation partielle serait compensée par l'évolution du volume poral représenté par les nouveaux pores créés.

On peut ainsi envisager que pour des contraintes hydriques supérieures à pF4,2, les pores (de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$ ) associés à l'assemblage des particules élémentaires diminuent au fur et à mesure que ces particules tendent vers un assemblage plus compact. Cette diminution de volume poral serait entièrement compensée par le développement d'un réseau de pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$ , mis en évidence par la porosimétrie à mercure. Ces pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  pourraient correspondre à des pores créés autour des particules grossières de la taille des limons (mica, quartz) en limite avec la phase argileuse, ou même au sein de la phase argileuse. rappelons qu'ils correspondent au pic de la classe 2 du spectre poral analysé par porosimétrie à mercure.

#### *En résumé pour cet horizon BA3*

Les mesures hydriques, de part la superposition des volumes d'eau extrait et d'air entré dans l'échantillon de pF1 à 6,6, rendaient plausible l'hypothèse d'un système poral rigide pour cet échantillon BA3; mais la comparaison avec les mesures de porosimétrie à mercure fait apparaître une réorganisation importante de cet espace poral.

On note ainsi une réorganisation des pores inter-agrégats les plus grossiers (de Rc > 15  $\mu\text{m}$ ); la gamme de contraintes hydriques sur laquelle a lieu cette réorganisation n'a pu être déterminée.

Au dessus de pF4,2, les particules élémentaires tendent vers un assemblage plus compact mais cette diminution de volume poral des pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  est entièrement compensée par le développement de pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  ; ceci alors que le système poral reste apparemment rigide à l'échelle macroscopique.

### 2.2.2 Les autres horizons du sol Brun Acide

La figure VIII.5 illustre les résultats pour chaque horizon du sol brun acide de bas en haut depuis l'horizon le plus profond (Fig.VIII.5f) vers l'horizon de surface (Fig VIII.5a). La figure présentée en annexe VIII.5 présente de plus les intervalles de confiance pour chaque point  $\vartheta$  et A des mesures hydriques et les valeurs extrêmes pour les points  $E_{Hg}$  correspondant aux mêmes rayons de constriction.

Si on considère, les résultats issus des mesures hydriques 3 groupes peuvent être distingués:

\* Les horizons BA3, BA4, BA5, BA6 qui présentent une quasi superposition des courbes  $\vartheta$  et A et donc un comportement apparemment rigide.

La comparaison avec la courbe  $E_{Hg}$ , révèle :

- une réorganisation probable des pores de rayons supérieurs à 15  $\mu\text{m}$  dans l'horizon BA3 tandis que cette gamme de pores peut-être considérée comme rigide dans les autres horizons .

- une création de pores de Rc compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  dans les horizons BA3, BA4, BA6. Ces pores apparaîtraient pour des contraintes hydriques supérieures à pF4,2, alors que le volume apparent ne varie pas. Ce nouveau volume poral compense la diminution du volume des pores de Rc < 0,1  $\mu\text{m}$  alors que les particules élémentaires tendent vers un assemblage plus compact.

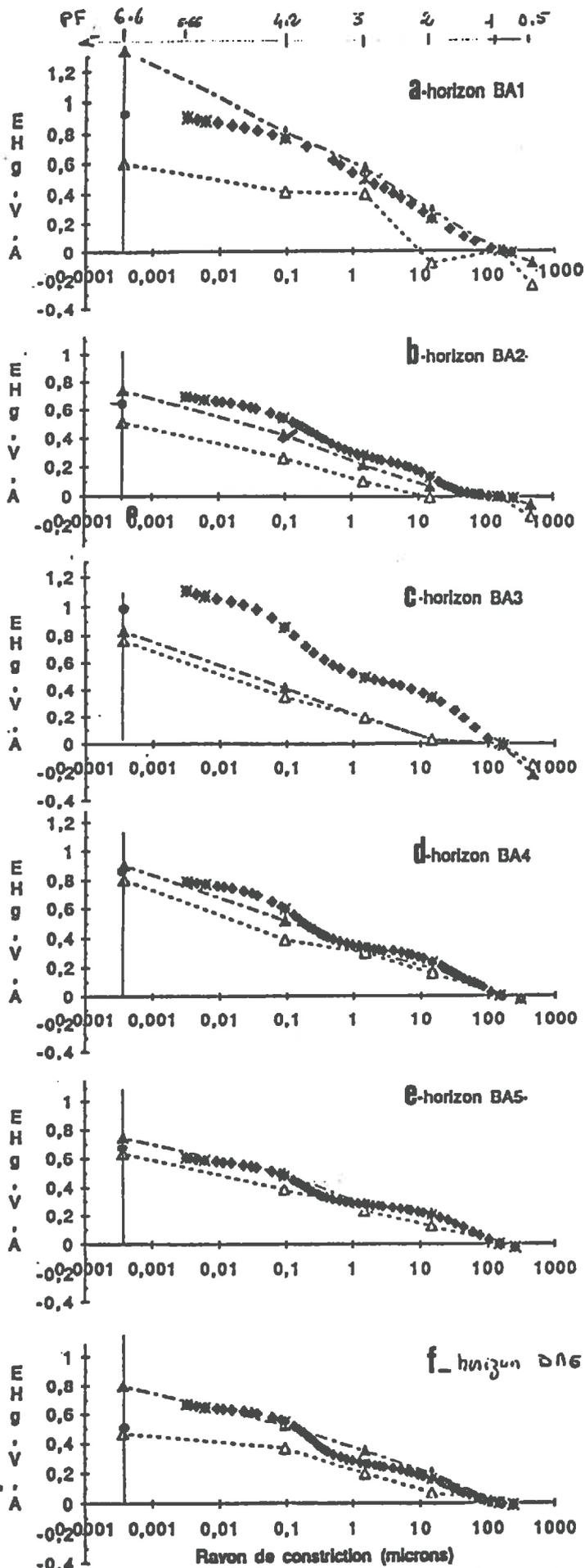


Fig.VIII.5 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait (a), du volume d'air entré (b) et du volume poral cumulé (c) en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 6 horizons du Sol Brun Acide.(a : pour l'horizon BA1; b : pour l'horizon BA2; c : pour l'horizon BA3; d : pour l'horizon BA4; e : pour l'horizon BA5; f : pour l'horizon BA6).

\* L'horizon BA2 montre un volume d'eau extrait  $\vartheta_T$  supérieur à la quantité d'air entré AT, de pF1 à pF6,6, traduisant une diminution de l'espace poral total lors de la déshydratation. Ce retrait macroscopique se manifeste essentiellement au dessus de pF4,2.; la diminution du volume des pores de  $R_c < 0,1\mu\text{m}$  intervenant au dessus de pF4,2 ne serait ici pas totalement compensée par la création du volume de pores de rayons compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$  qui est toujours mis en évidence.

Enfin l'horizon BA1 montre un volume d'eau extrait très supérieur à la quantité d'air entré et au volume poral exploré par le mercure. Il est caractérisé par une superposition des courbes  $E_{Hg}$  et  $\vartheta$  pour une large gamme de pores, et par une forte diminution du volume poral au dessus de pF4,2 attribuée à une importante réduction du volume des pores de  $R_c$  inférieurs à 0,1  $\mu\text{m}$ , alors que les particules élémentaires tendent vers un assemblage plus compact.

### 3.Synthèse et conclusion

#### Synthèse des résultats et comparaison globale du comportement des 2 types de sol

° Dans l'andosol, les courbes  $\vartheta$  et A présentent entre elles des différences importantes; ces différences mettent en évidence des modifications de l'espace poral, au cours de la déshydratation, qui sont perceptibles à l'échelle du volume poral mesuré sur motte (retrait des mottes). La comparaison de ces 2 courbes avec la courbe  $E_{Hg}$  a permis d'analyser l'évolution du système poral et de proposer des interprétations en relation avec l'organisation.

A partir de ce mode de représentation (comparaison des 3 courbes), on a pu notamment discuter de la dynamique de l'espace poral inter-agrégats et montrer des comportements différents selon le mode d'agrégation de chaque horizon.

Dans les horizons microagregés, AN3 notamment, c'est la porosité inter-microagregats la plus fine qui apparait très sensible à la déshydratation. Son volume diminue nettement de pF 2 à pF3; au delà de pF4,2, la réorganisation des particules fines vers un assemblage plus compact, entraîne un retrait des microagregats et la réapparition de pores fins inter-microagregats ( $R_c$  compris entre 15 et 0,1  $\mu\text{m}$ ).

Pour les horizons profonds, le système poral le plus grossier de fissures inter-agregats et cavités intra-agregats apparait, quant à lui, rigide tout au long du processus de déshydratation.

Dans l'horizon superficiel AN1, les pores les plus grossiers inter-pellets paraissent les plus affectés par la déshydratation.

Tous ces horizons subissent des déformations au delà de pF4,2. L'extraction d'eau des pores les plus fins entraîne une diminution du volume de ces pores induite par la réorganisation des particules élémentaires. Selon les horizons et leur mode d'agrégation, cette évolution induit ou non une réorganisation à des échelles supérieures.

° Dans le sol brun acide, notamment pour les horizons BA3 à BA6, les courbes  $\vartheta$  et A sont globalement superposables et le système poral est donc apparemment proche de la rigidité. Mais ces 2 courbes issues des mesures physico-hydriques diffèrent de la courbe  $E_{Hg}$ ; des réorganisations du système poral lors de la déshydratation sont ainsi mises en évidence.

La comparaison des 3 courbes permet notamment de montrer qu'un volume de pores de  $R_c$  compris entre 1,5 et 0,1  $\mu\text{m}$ , correspondant à des microfissures au sein des agrégats, se crée au dessus de pF4,2, alors qu'il n'y pas de variation de l'indice de vide et que le volume poral ne varie pas à l'échelle de la motte (absence de retrait). L'apparition de ce volume poral vient compenser la diminution du volume des pores les plus fins liés à l'assemblage des particules élémentaires au dessus de pF4,2.

Elle montre aussi que les pores inter-agregats de l'horizon le plus microagregé BA3 apparaissent très sensibles à la déshydratation.

Ainsi dans les horizons du sol brun acide, contrairement à ce que laissaient présager les mesures physico-hydriques, des évolutions importantes du système poral au cours de la déshydratation sont ainsi mises en évidence.

Intérêt de la comparaison - Limites dans l'analyse des comportements - Perspectives

Apport de la comparaison des données de porosimétrie et des résultats issus des mesures physicohydriques.

Ces résultats montrent l'intérêt d'une analyse combinée des données de porosimétrie à mercure et des données du comportement physico-hydrigue, menées conjointement à une description des organisations.

Chacune des 2 méthodes présente un intérêt en elle-même, si elle est utilisée de manière isolée, mais c'est l'analyse comparée des résultats qui permet de discuter de la dynamique des organisations et de l'espace poral associé lors de la déshydratation, d'établir des relations entre l'espace poral du matériau déshydraté et celui du matériau à différents états d'hydratation.

Les données de porosimétrie à mercure fournissent des informations sur la distribution quantitative du système poral en fonction de la taille des pores à l'état déshydraté. Ces résultats peuvent être comparés aux observations qualitatives menées sur échantillons déshydratés (au microscope). Ces résultats sont directement utilisables dans le cas de matériau rigide pour lesquels l'organisation de l'échantillon déshydraté et celle de l'échantillon dans un état d'hydratation donné sont identiques. Ils sont cependant d'un intérêt limité dans le cas des matériaux qui ont un espace poral à géométrie variable, puisqu'ils ne peuvent être directement utilisés pour le matériau à un autre état d'hydratation, sauf si l'on peut établir des relations entre l'organisation des échantillons déshydratés et celle de l'échantillon à un état d'hydratation donné. C'est là l'intérêt de mener parallèlement une étude du comportement physico-hydrigue par l'analyse des données des courbes de rétention d'eau et des courbes de retrait.

Les données issues du comportement physico-hydrigue sont souvent utilisées indépendamment des résultats de porosimétrie à mercure (Rosello, 1984; Robain et Curmi, 1986, Van Oort et Dorel, 1988 ) pour discuter l'espace poral et son évolution lors de la déshydratation.

Les courbes de rétention d'eau traduisent l'affinité pour l'eau des matériaux et renseignent sur la localisation de l'eau lors de l'extraction. Elles permettent de comparer les systèmes poreux de plusieurs échantillons et peuvent être corrélées aux variations de structures et/ou aux variations de constituants, comme nous l'avons montré pour les échantillons étudiés (chap. VII).

Les courbes de retrait donnent une image de l'évolution de l'indice de vide total en fonction de l'état d'hydratation. Or, cette évolution est le résultat cumulé de modifications qui peuvent conjointement ou non, intervenir pour différentes classes de pores. L'utilisation isolée d'une courbe de retrait ne permet que de déceler un comportement global (variation totale de l'indice de vide), et plusieurs interprétations peuvent être proposées pour chaque allure de la courbe de retrait entre 2 états d'hydratation (Bruand, 1986).

La comparaison de ces résultats issus des mesures hydriques avec ceux issus de la porosimétrie peut alors permettre de trancher.

Nous rappellerons ici simplement le cas où l'échantillon passe d'un état hydrigue à l'autre sans variation de l'indice de vide total ( $\Delta E = 0$ ) : c'est à dire où l'extraction d'eau entraîne l'apparition d'un volume d'air équivalent au volume d'eau extrait ( $\Delta \vartheta = \Delta A$ ); l'espace poral a alors un comportement "apparemment rigide".

La rigidité peut être réelle comme cela semble le cas pour les pores fissuraux inter-agrégats des échantillons profonds de l'andosol notamment ( $\Delta \vartheta = \Delta A = \Delta E_{Hg}$ ).

La rigidité peut n'être qu'apparente : c'est le cas pour l'horizon BA3, pour des  $pF > 4,2$ , la diminution du volume des pores de  $R_c < 0,1 \mu m$  qui se vident de leur eau, est entièrement compensée par l'apparition d'un volume de pores de  $0,1 \mu m < R_c < 1,5 \mu m$  si bien que l'indice de vide apparaît constant. Ceci a pu être mis en évidence par l'existence, dans l'échantillon déshydraté à  $105^\circ C$ , d'un volume poral exploré par le mercure, qui est supérieur au volume d'air entré et au volume d'eau extrait lors de la déshydratation pour des  $R_c$  compris entre  $0,1 \mu m$  et  $1,5 \mu m$  ( $pF3$  à  $pF4,2$ ).

Difficultés rencontrées - Intérêt de poursuivre cette étude par des données complémentaires - Perspectives.

Pour l'analyse des courbes, nous nous sommes heurtés à la *difficulté d'analyser la contribution réelle de chaque type de pores* à la variation d'indice de vide en fonction de l'état d'hydratation. Cette difficulté fait apparaître la *nécessité de raisonner l'échantillonnage* pour aller plus loin dans l'analyse, en choisissant des échantillons mieux déterminés par leur morphologie ou par leur taille. En supprimant certains niveaux d'organisation, l'analyse des courbes en serait simplifiée.

Pour un horizon, on peut ainsi envisager de mener des expériences de mesures hydriques et de porosimétrie sur des échantillons ne comprenant qu'un des types d'assemblages mis en évidence au microscope optique :

- pour l'horizon le plus microagrégé BA3 du sol brun acide, les mesures pourraient être menées sur des échantillons sélectionnés : comprenant une dominance de microagrégats d'une part, comprenant une dominance de polyèdres d'autre part. Ceci permettrait de mieux distinguer le comportement particulier à chaque type d'espace poral associé à ces 2 agrégations (fissures ou pores polyconcaves).

- pour l'horizon microagrégé AN3 de l'andosol, les différents types d'échantillons sélectionnés pourraient correspondre aux différents types d'assemblage de microagrégats. Ceci pourrait permettre de mieux analyser la contribution des différents types d'espace poraux liés aux assemblages de microagrégats (porosité inter-grappes, porosité inter-microagrégats (intra-grappes)).

Par ailleurs, on peut envisager de travailler sur des échantillons de taille différente.

On notera l'intérêt que présenterait par ailleurs des *caractérisations qualitatives (forme, isotropie..)* et *quantitatives des pores selon l'état d'hydratation*; ceci semble envisageable tout au moins pour la porosité inter-agrégats par l'analyse d'image sur des échantillons menés à différents états d'hydratation.

## Conclusion générale

Notre objectif était de comparer deux sols à structure microagrégée: les andosols et les sols bruns acides. Nous avons cherché en premier lieu à comparer l'organisation de ces deux types de sol à différentes échelles d'observation, depuis l'échelle du paysage à l'échelle microscopique. Nous avons ensuite caractérisé leur comportement physico-hydrigue en relation avec ces organisations et la nature des constituants.

Cette étude a été menée sur des sites de l'Aubrac où figurent des sols andiques et des sols bruns acides le long de lithoséquences.

Plusieurs points peuvent être dégagés de cette étude.

### 1) La structure microagrégée est plus nettement développée dans les sols andiques

La comparaison macromorphologique montre une certaine convergence des structures à l'échelle macroscopique, pour les horizons médians des deux types de sols "à structure microagrégée". La caractérisation plus fine de l'organisation montre cependant que la structure microagrégée est généralisée dans le cas de l'andosol, alors qu'elle est localisée et associée à des polyèdres dans le cas du sol brun acide. Par ailleurs la taille des microagrégats est deux fois plus petite et les pores inter-agrégats apparaissent plus fins et de volume plus important dans le cas de l'andosol par rapport au cas du sol brun acide. Les microagrégats de l'andosol sont composés de constituants très fins non reconnaissables par microscopie au contraire du sol brun acide.

### 2) Les études menées sur les constituants montrent des différences notables

Les andosols sont caractérisés par leur richesse en matière organique, une mauvaise cristallinité de la fraction argileuse avec une présence peu abondante d'halloysite et métahalloysite, une forte teneur en éléments amorphes notamment en aluminium amorphe: ils sont composés de complexes organo-minéraux. Dans les horizons du sol brun acide, la quantité d'Al amorphe est nettement plus faible et la fraction argileuse bien cristallisée est constituée d'un mélange de kaolinite dominante, d'argiles micacées et de minéraux à 14 Å.

### 3) Les résultats de la porosimétrie (sur la gamme de taille comprise entre 150 µm à 3 nm) montrent que sur échantillon déshydraté, le volume des pores est beaucoup plus important dans les horizons de l'andosol et que la distribution de ce volume en fonction de la taille des pores varie fortement selon les 2 types de sol

Le volume poral appréhendé par la porosimétrie à mercure correspond essentiellement à des pores inter-microagrégats pour les horizons supérieurs microagrégés de l'andosol; la participation des pores intra-agrégats est faible. Pour les horizons du sol brun acide, notamment l'horizon microagrégé, la distribution est nettement bimodale: le volume poral appréhendé par la porosimétrie à mercure est réparti de manière égale en 2 classes: une classe de pores inter-agrégats, et une classe de pores intra-agrégats ou inter-particules grossières.

### 4) Les courbes de rétention d'eau sont bien corrélées aux structures observées et aux constituants

L'évolution de ces courbes d'un horizon à l'autre d'un même profil a pu être corrélée à la structure telle qu'elle avait été appréhendée au microscope optique. Ainsi pour l'andosol, l'augmentation du volume d'eau extrait aux faibles contraintes hydriques (de pores de rayons de constriction supérieur 1,5 µm) est bien corrélée avec le développement de la structure microagrégée et de la porosité associée. De même, le caractère plus ou moins dense de l'assemblage des microagrégats est appréhendable par ces courbes.

Le jeu de la quantité et des caractéristiques des particules élémentaires des fractions argileuses sur la rétention d'eau aux fortes contraintes hydriques apparaît nettement: la rétention en eau aux fortes contraintes hydriques est très bien corrélée à la valeur de la capacité d'échange cationique qui intègre à la fois les teneurs et la nature des constituants élémentaires (fraction < 2 µm).

### 5) Les courbes de retrait soulignent un comportement très différent des deux types de sol vis à vis des contraintes hydriques avec un fort retrait macroscopique pour les horizons microagrégés de l'andosol opposé à un comportement apparemment rigide des horizons microagrégés du sol brun acide.

6) La confrontation des résultats des mesures physico-hydriques aux résultats de porosimétrie à mercure permet une meilleure appréhension de l'évolution du système poral au cours de la déshydratation.

Pour les horizons microagrégés de l'andosol, la gamme des pores les plus grossiers inter-agrégats apparaît quasiment rigide lors de la déshydratation, tandis qu'il existe une déformation importante de la porosité inter-microagrégats la plus fine qui disparaît aux faibles contraintes hydriques (pF2 à pF3). Aux fortes contraintes hydriques (pF>4,2), l'extraction d'eau au niveau des particules élémentaires entraîne un réarrangement de ces particules qui induit un retrait des microagrégats et la réapparition d'une porosité fine inter-agrégats.

Contrairement à la porosité inter-microagrégats, la porosité de fissures et cavités des horizons profonds de l'andosol apparaît réellement rigide, et un faible retrait probablement dû au réarrangement des particules élémentaires n'est perceptible qu'aux plus fortes contraintes hydriques.

D'après les mesures physico-hydriques, les horizons du sol brun acide ne présentent pas de retrait macroscopique. Or la confrontation avec les données de porosimétrie montre qu'il existe une certaine déformation des pores inter-agrégats grossiers. D'autre part, au delà de pF4,2, alors que l'eau est extraite des pores les plus fins, il se produit une réorganisation avec ouverture de pores de 1,5 à 0,1  $\mu\text{m}$  autour des particules de la taille limons ou sables venant compenser un retrait dû au rapprochement des particules élémentaires de la taille des argiles. Ceci alors que le matériau est apparemment rigide.

Deux points importants semblent finalement à dégager de cette étude :

- la nécessité de mener des études fines des structures, complémentaires aux observations macroscopiques
- l'intérêt de comparer les résultats issus de techniques différentes pour mieux appréhender l'évolution réelle des organisations en fonction des contraintes hydriques.

Il serait intéressant de mener une étude de ce genre sur d'autres types de sol à structure microagrégée (oxisols ....) pour avoir une idée plus précise du rôle des organisations et des constituants sur le comportement physico-hydrique de ces sols.

## Bibliographie

- AUROSSEAU, P., 1976. *Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan*. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université de Rennes, multigr., 177 p.
- AUROSSEAU, P., CURMI, P. et BRESSON, L.M., 1985. *Microscopy of the Cambic Horizon*. In : Soil Micromorphology and Soil Classification, L.A. DOUGLAS et M.L. THOMPSON (Ed), Proceedings of a symposium sponsored by Divisions S-5 and S-9 of the Soil Science Society of America in Anaheim, CA, 28 Nov.-3 Dec., 1982, Soil Science Society of America, Special Publication N°15, 49-62.
- AZZAOUI, M., 1984. *Etude du gonflement d'une illite sodique*. D.E.A. de Pédologie. Université de Paris VII, 33 p.
- BALENT, G., DURU, M., CRANSAC, Y. et DALMIERES, A., 1988. *Référentiels floristiques et de croissance sur les prairies de la vallée de l'Aveyron et de la zone basaltique de l'Aubrac*. Rapport intermédiaire INRA-URSAID Toulouse et Chambre d'Agriculture de l'Aveyron, non publié, 10 p.
- BARNISHIEL, R.I., 1977. *Chlorites and Hydroxy Interlayered Vermiculite and Smectite*. In : Minerals in Soil Environments, DIXON J.B et WEED S.B.(Ed), Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, U.S.A., 331-356.
- BARNISHIEL, R.I. et RICH, C.I., 1963. *Gibbsite formation from aluminium-interlayers in Montmorillonite*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 27, 632-635.
- BONFILS, P. et MOINEREAU, J., 1971. *Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques du sud du Massif Central*. Cah. ORSTOM, série Pédol., 9, 345-363.
- BOURLET, M. et FIES, J.C., 1981. *Technique d'échange de l'eau de gros échantillons de sol par l'acétone en phase vapeur*. Bulletin de l'A.F.E.S. Science du Sol, 4, 293-304.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1951. *Planzensozologie*. Wien, Springer, 651p.
- BRINDLEY, G.W ET BROWN, G. (Ed.), 1980. *Cristal structures of clay minerals and their X-Ray identification*. Mineralogical Society, Monograp. 5, Londres, 495 p.
- BROUSSE R., 1961. *Analyses chimiques des roches volcaniques tertiaires et quaternaires de la France*. Bull. Serv. Carte Géol. Fr., t. LVIII, 263, 140 p.
- BRUAND, A., 1985. *Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois*. Thèse de 3ème cycle, Université de Paris VII, 226 p.
- BRUAND, A., 1986. Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. Science du Sol, 24 (4), 351-362.
- BRUAND, A. et PROST, R., 1987. *Effect of water content on the fabric of a soil material : an experimental approach*. Journal of Soil Science, 38, 461-472.
- BRUAND, A., TESSIER, D. et BAIZE, D., 1988. *Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse*. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Sér. II, 1937-1941.
- BRUCKERT, S., 1979. *Analyse des complexes organo-minéraux des sols*. In : Pédologie, Tome 2 : Constituants et propriétés du sol, Masson, Paris, 187-209.
- BRUCKERT, S. et METCHE, M., 1972. *Dynamique du fer et de l'aluminium en milieu podzolique : caractérisation des complexes organo-métalliques des horizons spodiques*. Bull. Ecole Nat. Sup. Agron. Ind. Alimen., 14, 263-275.
- BRUCKERT, S. et SOUCHIER, B., 1975. *Mise au point d'un test de différenciation des horizons cambiques et spodiques*. C.R. Acad. Sci. Paris, 280 D, 1361-1364.
- BULLOCK, P., FEDOROFF, N., JONGERIUS, A., STOOPS, G., TURSINA, T., 1985. *Handbook for soil thin section description*. Wayne Research Publication, 152 p.
- CALMELS, G. et COSTE, H., 1929. *L'Aubrac*. Rodez, Impr. Carrère.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DE L'AVEYRON, Service références 12 C.D.A., Centre de Machinisme Agricole de Rieupeyroux, I.T.C.F., 1988. *Expérimentation de rénovation de prairies naturelles sans labour, Nord-Aveyron et vallée de l'Aveyron-Levezou (Campagne 1988)*. Relance Agronomique, F.I.D.A.R., 43 p.
- C.D.A.N.A., 1987. *Dossier "l'herbe, j'aime"; fiches techniques*. Fourrages Mieux Nord-Aveyron, Espalion, Aveyron.
- C.D.A.N.A. (Comité de Développement Agricole Nord-Aveyron - Chambre d'Agriculture de l'Aveyron), 1988a. *Sol, Zone basaltique, Résultats d'analyses des sols*. De los Coumbos ol Sucs, 29, 15-16.
- C.D.A.N.A. (Comité de Développement Agricole Nord-Aveyron - Chambre d'Agriculture de l'Aveyron), 1988b. *Terres, Zone granitique, Résultats d'analyses des sols*. De los Coumbos ol Sucs, 30, 14-15.
- CHRETIEN, J., 1986. *Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales*. Thèse de l'Université de Dijon. Publ. INRA, Paris, 412 p.
- CHURCHMAN, G.J., WHITTON, J.S., CLARIDGE, G.G.C. et THENG, B.K.G., 1984. *Intercalation method using formamide for differentiating halloysite from kaolinite*. Clays and Clay Minerals, 32, (4), 241-248.

- COLIN, F., 1971. *Etude géologique du volcanisme basaltique de l'Aubrac (Massif Central français)*. Thèse de doctorat, 1966, Clermont-Ferrand. Mémoires B.R.G.M., n°62, 250 p., carte géologique.
- COULON, E. et BRUAND, A., 1989. *Effects of compaction on the Pore Space Geometry in Sandy Soils*. Soil & Tillage Research, 15, 137-152.
- C.P.C.S., 1967. *Classification des sols*. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Doc. Multigr., I.N.R.A., 87 p.
- CURMI, P., 1987. *Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosité différente*. In : Soil Compaction and Regeneration, MONNIER G. et GOSS M.J. (Ed), Proceedings of the Workshop on Soil Compaction : Consequences and Structural Regeneration Processes. Avignon 17-18 Sept. 1985, France, Commission of the European Communities, Balkema (Pub.), 53-58.
- DEJOU, J., 1980. *Aperçu sur les caractéristiques chimiques des sols du Nord-Aveyron*. Multigr., 9 p.
- DIDIER, J. ET LAMEYRE, J., 1971. *Les roches granitiques du Massif-Central*. In: Symposium J. Jung : Géologie, géomorphologie et structure profonde du Massif Central français; Plein Air Service Ed., Clermont-Ferrand, 377-478.
- DIXON, J.B. et Mc KEE, T.R., 1974. *Internal and external morphology of tubular and spheroidal particles*. Clays Cl. Miner., 22, 127-137.
- DUCHAUFOUR, P., 1970. *Précis de pédologie*. Masson, Belgique, 481 p.
- DUCHAUFOUR, P., 1988. *Abrégé de pédologie*. Masson, 224 p.
- DUPIAS, G. ET LAVERGNE, D., 1968. *Carte de la Végétation de la France au 1/200.000, Aurillac*. Feuille N° 58, Publ.C.N.R.S.
- DUPUIS, J., 1966. *Carte pédologique de la France à l'échelle du millionième*. INRA, Commission de la carte pédologique de la France.
- ESPIAU, P., 1986. *Contribution à l'étude du complexe absorbant des sols acides à charges mixtes. Application aux andosols du Velay*. Thèse de doctorat, Université.Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 338 p.
- ESTIENNE, P., 1956. *Recherches sur le climat du Massif Central français*. Mémorial de la météorologie nationale, 43, 242 p.
- FEY, M.V. et LE ROUX, J., 1977. Properties and quantitative estimation of poorly crystalline components in sesquioxidic soil clays. Clays and Clay Minerals, 25, 285-294.
- FIELDES, M. et PERROTT, K.W., 1966. *The nature of allophane in soils. Part 3. Rapid field and laboratory test for allophane*. N.Z. J. Sci., 9, 623-629.
- FIES, J.C., 1984. *Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure*. Agronomie, 4, (9), 891-899.
- FLACH, K.W., HOLZHEY, C.S., DE CONINCK, F. et BARTLETT, R.J., 1980. *Genesis and Classification of Andepts and Spodosols*. In : Soils with variable charge. B.K.G. THENG (Ed.), Soil Bureau, Dept. Sci. Ind. Res., New Zealand Soc. of Soil Sci., 411-426.
- GARCIA-RODEJA E., SILVIA B.M. et MACIAS F., 1987. *Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain*. Journal of Soil Science, 38, 573-591.
- GOER de HERVE, A., et MERGOIL, J., 1971. *Structure et dynamique des édifices volcaniques tertiaires et quaternaires*. In: Symposium J. Jung : Géologie, géomorphologie et structure profonde du Massif Central français; Plein Air Service Ed., Clermont-Ferrand, 345-376.
- GRIMALDI, M., 1981. *Contribution à l'étude du tassement des sols : évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques*. Thèse de docteur-ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 221 p.
- HERBILLON, A.-J., 1983. *Apports des approches expérimentales à la connaissance des constituants minéraux du sol à "organisation cristalline à courte distance"*. Bull.de l'A.F.E.S., Science du Sol, 3-4, 153-161.
- HETIER, J.M., 1975. *Formation et évolution des andosols en climat tempéré*. Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, 194 p.
- HILLEL, D., 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York, 413 p.
- JACKSON, M.L., LEVEL, T W., SYERS, J.K., REX, R.W., CLAYTON, R.N., SHERMAN, G.D. et UEHARA, G., 1971. *Geomorphological relationships of tropospherically derived quartz in the soils of the Hawaiian islands*. Soil Sci. Am. Proc., 35, 515-525.
- JEANROY, E., 1983. *Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mössbauer*. Thèse de Doctorat d'Université, Université de Nancy I, 157 p.
- KAWASAKI, H. et AOMINE, S., 1966. *So called 14 Å clays minerals in some Ando soils*. Soil Sci. Plant Nutr., 12, 144-150.
- KIEFFER, G., 1971. *Aperçu sur la morphologie des régions volcaniques du Massif central*. In : Symposium J. Jung : Géologie, géomorphologie et structure profonde du Massif Central français; Plein Air Service Ed., Clermont-Ferrand, 479-510.
- KUBOTA, T., 1972. *Aggregate formation of allophanic soils : Effect of drying on the dispersion of the soils*. Soil Sci. Plant Nutr., Tokyo, 18, 79-87.
- LAWRENCE, G.P., 1977. *Measurement of pores sizes in fine-textured soils : a review of existing techniques*. Journal of Soil Science, 28, 527-540.

- LEAMY, M.L., SMITH, G.D., COLMET-DAAGE, F. et OTOWA, M., 1980. *The Morphological Characteristics of Andisols*. In : Soils with variable charge B.K.G. THENG (Ed), Soil Bureau, Dept. Sci. Ind. Res., New Zealand Soc. of Soil Sci., 17-34.
- LOZET, J. et MATHIEU, C., 1986. *Dictionnaire de Science du sol*. Technique et Documentation, Lavoisier, 269 p.
- LULLI, L., BIDINI, D., DABIN, B. et QUANTIN, P., 1983. *Etude de deux sols andiques dérivés de roches volcaniques d'Italie du Sud (Monts Roccamonfina et Vulture), à caractère cryptopodzolique; 1. Environnement, morphologie et caractères des constituants minéraux; 2. Formes de la matière organique et du phosphore; interprétation générale*. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XX, 1, 27-61.
- MAEDA, T., TAKENAKA, H. et WARKENTIN, B.P., 1977. *Physical properties of allophane soils*. Adv. in Agron., 29, 229-264.
- MASUI, J. et SHOJI, S., 1967. *Some problems on clays minerals of volcanic ash-soil*. Pedologist., 11, 33-45.
- MC KEAGUE, J.A., BRYDON, J.E. et MILES, N.M., 1971. *Differentiation of forms of extractible iron and aluminium in soils*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35, 33-38.
- MEHRA, O.P. et JACKSON, M.L., 1960. *Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate*. Clays and Clay Miner., 7, 317-327.
- MILLOT, G., 1964. *Géologie des argiles*. Masson, Paris, 499 p.
- MIZOTA, C., 1976. *Relationships between the primary mineral and the clay mineral compositions of some recent Andosols*. Soil Sci. Plant Nutr., 22, 257-268.
- MIZOTA, C., KAWASAKI, I. et WAKATSUKI, T. 1988. *Clay Mineralogy and Chemistry of Seven Pedons Formed in Volcanic Ash, Tanzania*. Geoderma, 43, 131-141.
- MOINEREAU, J., 1974a. *Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns. Séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France); 1ère Partie : Evolution et différenciation des profils*. Science du Sol, 3, 173-191.
- MOINEREAU, J., 1977. *Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay - Vivarais - Coirons)*. Thèse Université Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 139 p.
- MOINEREAU, J., 1980. *Les Andosols*. Laboratoire de Science du sol de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Multigr, 16 p.
- MOINEREAU, J. et ROGER, L., 1975. *Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns. Séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France); 3ème partie : Nature et évolution de la fraction argileuse*. Science du Sol, 4, 295-314.
- MONNIER, G., STENGEL, P. et FIES, J.C., 1973. *Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de système de porosité du sol*. Ann. Agron., 24, (5), 553-545.
- MURPHY, C.P., 1982. *A comparative study of three methods of water removal prior to resin impregnation of two soils*. Journal of Soil Science, 33, 719-735.
- MURPHY, C.P., BULLOCK, P. et TURNER, R.H., 1977. *The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis. Part I : Principles and techniques; Part II : Applications*. Journal of Soil Science, 28, 498-518.
- OKAMURA, Y. et WADA, K., 1983. *Electric charge characteristics of horizons of Ando (B) and Red-Yellow B soils and weathered pumices*. Journal of Soil Science, 34, 287-295.
- PARFITT, R.L., 1980. *Chemical Properties of variable charge soils*. In : Soils with variable charge. B.K.G. THENG (Ed.), Soil Bureau, Dept. Sci. Ind. Res., New Zealand Soc. of Soil Sci., 167-94.
- PARFITT, R.L., RUSSEL, M. et ORBELL, G.E., 1983. *Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite*. New Zealand. Geoderma, 29, 41-57.
- PARFITT, R.L. ET WILSON, A.D., 1985. *Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand*. In : Volcanic soils : weathering and landscape relationships on soils tephra and basalt. E. FERNANDEZ CALDAS & DAN H. YAALON (Ed.), Catena supplement, 7, 1-8.
- PEDRO, G., 1983. *Les constituants amorphes des sols. Eléments d'introduction*. Bull. de l'A.F.E.S., Science du Sol, 3-4, 137-152.
- PEDRO, G., JAMAGNE, M. et BEGON, J.C., 1978. *Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions*. Geoderma, 20, 173-189.
- PEDRO, G. et TESSIER, D., 1983. *Importance de la prise en compte des paramètres texturaux dans la caractérisation des argiles*. 5th Meeting of the European Clay Group, Prague, 417-418.
- PELLERIN, F.M., 1980. *La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches*. Bull. Liais. Lab. des Ponts et Chaussées, 106, 105-116.
- QUANTIN, P., 1972. *Les Andosols - Revue bibliographique des connaissances actuelles*. Cah. ORSTOM, série Pédol., 10, (3), 273-302.
- QUANTIN, P., 1974. *Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical. Evolution de la pédogenèse initiale en milieu bien drainé sur roche volcanique*. Cah. ORSTOM, Série Pédol., XII, 1, 1-12.
- QUANTIN, P., 1982. *Les Andosols. Cours de DEA de Pédologie*. Multigr., ORSTOM, Bondy.

- QUANTIN, P., 1991. *Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg. 494 p. Doc. offset. Publication en cours, prévue pour 1992.
- QUANTIN, P. et BOULEAU, A., 1983. *Détermination des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par HCl et NaOH*. Bull. de l'A.F.E.S., Science du Sol, 3-4, 217-232.
- RICHARDS, L.A., 1941. *A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution*. Soil Science, 51, 377-386.
- ROBAIN, H. et CURMI, P., 1986. *Rôle de la structure pédologique sur le comportement hydrique du sol aux faibles pF*. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 303, Série II, 6, 509-514.
- ROBERT, M. et TESSIER, D., 1974. *Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques*. Ann. Agron., 25, 859-882.
- ROMERO DE CARVALHO, S., 1990. *Tassement des sols ferralitiques mis en culture. Apport d'une analyse compartimentale de l'espace poral de sols "podzolicos" (Etat de Rio de Janeiro, Brésil)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, 200 p.
- ROSELLO V., 1984. *Les sols Bruns des Hauts (Ile de la Réunion). Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement*. Thèse de l'Université de Paris VII, 200 p.
- ROUIRE, J. et ROUSSET, C., 1980. *Causses, Cévennes, Aubrac*. Guides géologiques régionaux, 2<sup>e</sup> Ed. Masson.
- R.P.F., 1990. *Référentiel Pédologique Français; 3ème Proposition*. Publié par l'Association Française d'Etude des Sols, 279 p.
- SCHWERTMANN, U., 1964. *Differenzierung der Eisenoxide des Boden durch Extraktion mit Ammoniumoxalat Lösung*. Zeitsch. Pflanzenern. Bodenkde, 105, 194-202.
- SCHWERTMANN, U., 1966. *Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxyde*. Nature, London, 212, 645-646.
- SEDDOH, F et PEDRO, G., 1974. *Caractérisation des différents stades de transformation des biotites et biotites chloritisées dans les arènes granitiques du Morvan*. Bull. Gr. Fr. Argiles, t. XXVI, 107-125.
- SHERMAN, G.D., MATSUSAKA, Y., IRAVA, H. et VEHARA, G., 1964. *The rôle of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils*. Agrochim., 8, (2), 148-162.
- SHERMAN, G.D., MATSUSAKA, Y., 1965. *Occurrence of gibbsite nodules in the Koolau family of Kailua*. J. Sediment. Petrol., 35, 504-507.
- SHOJI, S., YAMADA, I. et KURASHIMA, K., 1981. *Mobilities and related factors of chemical elements in the topsoils of Andosols in Tohoku, Japan : 2. Chemical and mineralogical compositions of size fractions and factors influencing the mobilities of major chemical elements*. Soil Science, 132, 330-346.
- SHOJI, S., FUJIWARA, Y., YAMADA, I. et SAIGUSA, M., 1982. *Chemistry and clay mineralogy of ando soils, brown forest soils, and podzolic soils formed from recent Towada ashes, northeastern Japan*. Soil Science, 133, 2, 69-86.
- SHOJI, S. et FUJIWARA, Y., 1984. *Active aluminium and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan : their forms, properties, and significance in clay weathering*. Soil Science, 137, 4, 217-226.
- SHOJI, S., TAKAHASHI, T., ITO, T. et PING, C.L., 1988. *Properties and classification of selected volcanic ash soils from Kenai peninsula, Alaska*. Soil Science, 145, 6, 395-413.
- SIEFFERMAN, G., 1973. *Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun*. Thèse Sci. Nat. Université Strasbourg, 1969, Mémoires ORSTOM N° 66, 186 p.
- SIEFFERMAN, G. et MILLOT, G., 1969. *Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroon : allophanes, halloysite, métahalloysite, kaolinite, gibbsite*. International Clay Conference Tokyo, 1, 417-430.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soils Surveys*. Soil Conservation Service. - U.S Department of Agriculture, I.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., Agriculture Handbook No. 436, 754 p.
- STOOPS, G. (Ed.), 1986. *Multilingual translation of the terminology used in the Handbook for thin section description*. Pédologie, Gand, 3, 337-349.
- TAMM, O., 1922. *Um best ämning ow de oorganiska komponenterna i markens gelcomplex*. Medd. Statens Skogsförsökanst., 19, 385-404.
- TARDY, Y., 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr., Strasbourg, 31, 199 p.
- TAVERNIER, R. et LOUIS, A. (Compilers), 1980-81. *Soil Map of the European Communities au 1/1 000 000*. Commission of the European Communities D.G.V.I, Land Resource Evaluation Expert Sub-group, Publ. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg.
- TESSIER, D., 1984. *Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse de doctorat, Université de Paris VII, 361 p.

- TESSIER, D. et BERRIER, J., 1979. *Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols soumis à différents pF*. Bull. A.F.E.S., Science du sol, 1, 67-82.
- TRICHET, J., 1970. *Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques*. Thèse Sci. Nat., Paris, Ecole Nationale Supérieure, Travaux du laboratoire de Géologie, 4, 153 p.
- THOREZ, J., 1975. *Phyllosilicates and clay minerals. A laboratory handbook for their X-Ray diffraction analysis*. Ed. G. LELOTTE, Belgique, 578 p.
- VACHIER, P., CAMBIER, P. et PROST, R., 1979. *Structure d'un milieu poreux : la craie*. Ann. Agron., 39, 3, 247-263.
- VAN VLIET - LANOE, B., 1988. *Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest. Processus et héritages*. Thèse de doctorat d'état de géographie, 1987, Université de Paris I-Sorbonne; Centre de géomorphologie du C.N.R.S. Ed. Van Vliet-Lanoe, Caen, 854 p.
- VAN OORT, F. et DOREL, M., 1988. *Physico-chemical and physical properties of halloysite rich soils in Guadeloupe*. Proceedings of the XXIVth annual C.F.C.S. Meeting, Ocho Rios, Jamaica.
- VICENTE, M.A., RAZZAGHE, M. et ROBERT, M., 1977. *Formation of aluminium hydroxyvermiculite (Intergrade) and smectite from mica under acidic conditions*. Clay Minerals, 12, 101-111.
- WADA, K., 1977. *Allophane et Imogolite*. In : Minerals in Soil Environments, DIXON J.B. and WEED S.B.(Ed), Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, Wis., 603-638.
- WADA, K., 1980. *Mineralogical characteristics of Andisols*. In : Soils with variable charge B.K.G. THENG (Ed), Soil Bureau, Dept. Sci. Ind. Res., New Zealand Soc. of Soil Sci., 87-107.
- WADA, K., 1985. *The distinctive properties of Andosols*. Adv. in Soil Sci., 2, 174-229.
- WARKENTIN, B.P. et MAEDA, T., 1980. *Physical and mechanical characteristics of Andisols*. In : Soils with variable charge, B.K.G. THENG (Ed), Soil Bureau, Dept. Sci. Ind. Res., New Zealand Soc. of Soil Sci., 281-301.
- WESLEY, L.D., 1973. *Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia*. Geotechnique, 23, 471-494.
- WILSON, M.J. et TAIT, J.M., 1977. *Halloysite in some soils from north-east Scotland*. Clays Minerals, 12, 59-66.
- YAMADA, I. et SHOJI, S., 1983. *Alteration of volcanic glass of recent Towada ash in different soil environments of the northeastern Japan*. Soil Sci., 135, 316-321.

## LISTE DES ANNEXES

### Chapitre I : Caractérisation générale du milieu

Ann I.1 : Données climatiques de la station de Laguiole et calcul du bilan hydrique du sol à partir d'une réserve en eau utile : 1) de 50 mm; 2) de 20 mm.....II

### Chapitre III : Approche macroscopique. Séquences et volumes de références

Ann III.1 Description des volumes substrat de la séquence Puech Roux .....III

### chapitre VII : Comportement physico-hydrique.

Ann. VII.1.: Andosol (horizons AN1 à AN6) : Valeurs d'Indice de vide, Indice d'eau, Indice d'air moyennes, intervalles de confiance et coefficient de variation aux différentes contraintes hydriques appliquées. .... VI

Ann. VII.2. Rankers andiques (horizons K1, K2) : Valeurs d'Indice de vide, Indice d'eau, Indice d'air : moyennes, intervalles de confiance et coefficient de variation aux différentes contraintes hydriques appliquées. .... VII

Ann. VII.3. Sol Brun Acide (horizons BA1 à BA6) : Valeurs d'Indice de vide, Indice d'eau, Indice d'air : moyennes, intervalles de confiance et coefficient de variation aux différentes contraintes hydriques appliquées. .... VIII

### Chapitre VIII : Comparaison des données du comportement physico-hydrique et des données de porosimétrie.

Ann VIII.1 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour l'horizon microagrégé AN3 de l'Andosol, avec les intervalles de confinement .....IX

Ann VIII.2 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 6 horizons de l'Andosol, avec les intervalles de confiance .....X

Ann VIII.3 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 2 horizons du Ranker andique, avec les intervalles de confiance. ....XI

Ann VIII.4 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour l'horizon le plus microagrégé BA3 du sol Brun Acide, avec les intervalles de confiance. ....XII

Ann VIII.5 : Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 6 horizons du Sol Brun Acide, avec les intervalles de confiance. ....XIII

Ann. VIII.6 : Mesures d'indice d'eau sur sol tamisé (pF 3 et 4,2) conservé humide et séché à l'air.....XIV

Annexe I.1 : Données climatiques de la station de Laguiole et calcul du bilan hydrique du sol à partir d'une réserve en eau utile : 1) de 50 mm; 2) de 20 mm.

DONNEES LAGUIOLE 1979-1987		Avril	Mai	Juin	Juillet	Aôut	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Année
DONNEES CLIMATI- -QUES	T (°C)	5,9	8,75	13,3	16,7	15,5	14,1	9,5	4,6	2,15	-0,5	0,85	2,5	7,8
	ETP Penman (mm)	69,2	83,5	104,1	125,4	105,8	67,6	38	15,4	8	9,4	18,1	37,8	682,3
	P (mm)	116,5	161,9	115,1	72,3	96,2	97,9	184,8	119,5	192	162,3	114,5	147,3	1580,3
BILAN HYDRIQUE POTENTIEL	Q=P-ETP (mm)	47,3	78,4	11	-53,1	-9,6	30,3	146,8	104,1	184	152,9	96,4	109,5	898,0
	Ip =(P-ETP)>0	47,3	78,4	11	0	0	30,3	146,8	104,1	184	152,9	96,4	109,5	960,7
	Déficit hydrique D	0	0	0	-53,1	-9,6	0	0	0	0	0	0	0	-62,7
ESTIMATION DE LA RESERVE DU SOL R à 50 mm début Avril														
BILAN HYDRIQUE EN TENANT COMPTE DU SOL	R début mois (mm)	50	50	50	50	0	0	30,3	50	50	50	50	50	—
	ETR (mm)	69,2	83,5	104,1	122,3	96,2	67,6	38	15,4	8	9,4	18,1	37,8	669,6
	dR (mm)	0	0	0	-50	0	30,3	19,7	0	0	0	0	0	—
	R fin mois (mm)	50	50	50	0	0	30,3	50	50	50	50	50	50	—
	Excédent (mm) =lr	47,3	78,4	11	0	0	0	127,1	104,1	184	152,9	96,4	109,5	910,7
	Déficit (mm) = d	0	0	0	3,1	9,6	0	0	0	0	0	0	0	12,7
ESTIMATION DE LA RESERVE DU SOL A 20 mm début Avril														
BILAN HYDRIQUE EN TENANT COMPTE DU SOL	R début mois (mm)	20	20	20	20	0	0	20	20	20	20	20	20	—
	ETR (mm)	69,2	83,5	104,1	92,3	96,2	67,6	38	15,4	8	9,4	18,1	37,8	639,6
	dR (mm)	0	0	0	-20	0	20	0	0	0	0	0	0	—
	R fin mois (mm)	20	20	20	0	0	20	20	20	20	20	20	20	—
	Excédent (mm) =lr	47,3	78,4	11	0	0	10,3	146,8	104,1	184	152,9	96,4	109,4	940,6
	Déficit (mm) = d	0	0	0	33,1	9,6	0	0	0	0	0	0	0	42,7

avec T : températures; P : précipitations; ETP : évapotranspiration potentielle  
avec Q : "recharge"=P-ETP; Ip : "infiltration potentielle"= (P-ETP)>0; D : "Déficit hydrique"=(P-ETP)<0.  
avec R : réserve en eau du sol estimée selon  $RU = ((WpF3 - WpF4,2) \cdot D.A.)$  épaisseur explorée par les racines). R.U. ainsi calculée est :  
pour l'Andosol : RU=41mm pour 59 cm exploré par les racines;  
pour le sol brun acide : RU=51mm pour 73 cm exploré par les racines;  
pour le ranker andique : RI=21mm pour 20 cm exploré par les racines.  
avec ETR : "évapotranspiration réelle"; lr : "Excédent dans le sol ou infiltration réelle"; d : "Déficit hydrique dans le sol".

## Annexe III.1

### DESCRIPTION DES VOLUMES DU SUBSTRAT de LA SEQUENCE "PUECH ROUX"

#### ZONE AMONT : LE BASALTE ; SES DIFFERENTS MODES DE FACIES et DE DEBIT à l'AFFLEUREMENT

Le basalte constitue le substrat de toute la zone amont et de la partie amont de la zone de transition.

##### Basalte sain (Substrat Ia)

C'est le volume 9 de la séquence.

Il est présent dans la zone amont et au début amont de la zone de transition de la séquence.

Il a pu être décrit en coupe de route et sur fosse (fosse F1a). Une analyse totale a été réalisée (Tab.III.1).

C'est un basalte très peu altéré, très dur, à cassure conchoïdale, à patine brun-jaune 10YR 5/6. Il présente une pâte de couleur gris très foncé 2,5Y 3,5/0 avec de rares phénocristaux (5 à 10 %) de 1 à 7 mm, et un cortex d'altération de 2 à 4 mm de large et de couleur brun-jaune 10YR 5/6. Selon la terminologie de Colin (1966), c'est un basalte sans enclaves, oligoporphyrique (0 à 10 % de phénocristaux), mésocrate (40 à 60 % de minéraux non-blancs dans la pâte).

Il se présente sous forme de prismes plus ou moins grossiers de 30 cm de large en moyenne (10 à 60 cm) dont l'axe est incliné de 30 à 45° Est par rapport à la verticale. Ces prismes sont eux-mêmes débités en articles de formes irrégulières à contours de forme bien ajustée. Entre les différents articles et les différents prismes, figurent des fissures. Ces fissures sont de 1 à 3 cm de large et elles sont occupées par des volumes sol (Vol.1c) dans la fosse F1a.

En coupe de route, on observe sur 8 à 10 m l'évolution suivante depuis l'amont vers la zone de transition : dans la zone la plus amont les prismes de basalte sain sont quasiment jointifs et les fissures très peu larges 0 à 1 cm. Puis la largeur des fissures augmente (3 à 5 cm) : elles sont d'abord remplies de cailloux de basalte aplatis et anguleux en écailles (Substrat Ib); près de la zone de transition la largeur s'accroît encore (5 à 7 cm) : les parois internes sont alors tapissées de ces mêmes cailloux de basalte (Substrat Ib) et remplies de volumes rouge jaunâtre meuble (Substrat Ic); les fissures sont alors fréquemment prolongées par de larges cavités de 20 à 30 cm dans lesquelles le basalte plus altéré est débité en petites boules (Substrat Id) séparées par les volumes rouge-jaunâtre (Substrat I.c). Plus à l'aval encore, ces boules de basalte et la matrice associée forment l'essentiel du substrat.

##### Cailloux de basalte aplatis et anguleux (Substrat I b)

Ce sont des cailloux de basalte en écailles remplissant les fissures entre les prismes de basalte sain ou tapissant les fissures remplies de volumes rouge jaunâtre.

Le basalte est alors plus altéré que celui qui compose les prismes; moins dur, il peut être cassé à la main. Sa couleur est plus claire : gris clair 10YR 5/1, et il présente un cortex en fin liseré (1 à 2 mm) de couleur gris-clair à blanc.

##### Basalte en boules (Substrat I.d)

A l'amont de la zone de transition, le basalte est débité en petites boules de 5 à 10 cm qui présentent en surface une croûte qui se desquame facilement. Le basalte est peu dur (se casse à la main), de couleur gris (7,5YR 5 à 6 / 0) et a un cortex en liseré millimétrique gris clair.

Ce basalte en boules est présent d'abord en volumes discontinus dans les grosses cavités qui prolongent les fissures entre les prismes de basalte sain; il est alors bordé de cailloux de basalte en écaille (Substrat I.b); plus à l'aval, il forme le substrat principal sur 5 à 6 m : les boules de basalte constituent alors 80 à 90 % du volume et sont emballées par les volumes rouge-jaunâtre (Substrat I.c).

Cette structuration du basalte est du type pillow-lava. Ce sont des structures caractéristiques des laves refroidies rapidement au contact de l'eau. Par suite, il est fort probable que, en ce lieu, la coulée de lave se soit épanchée dans une paléo-vallée contemporaine de l'éruption volcanique (De Goër, communication orale, 1989).

##### Volumes meubles rouge jaunâtre (Substrat I.c)

Il est présent dans les fissures à l'aval de la zone amont et constitue la matrice de la structure de type pillow-lavas entre les boules de basalte.

C'est un volume meuble, discontinu; il présente une couleur rouge-jaunâtre 5YR 4/6 à 6/8 humide; sa texture est argilo-limoneuse à limono-argileuse; on note l'absence de tout élément grossier.

### **ZONE DE TRANSITION : SUBSTRAT COMPLEXE ET VARIE**

La zone de transition est très perturbée. Sur 15 à 20 m, elle présente des volumes-substrat, discontinus, de couleur, texture, compacité très variés, probablement essentiellement d'origine granitique, mais comprenant aussi des éléments de roche volcanique (bombes volcaniques, pierres de basalte).

Nous décrivons ici succinctement les principaux volumes observés.

#### **L'arène jaune-rougeâtre sableuse (Substrat II.f)**

C'est le volume-substrat principal de cette zone de transition. Il constitue en quelque sorte l'encaissant des autres volumes-substrat présents dans cette zone.

Il présente une couleur jaune-rougeâtre à jaune-brunâtre humide (7,5YR à 10YR 6/8); sa texture est sablo-limoneuse faiblement argileuse; il contient environ 40 % de gravillons : gravillons de quartz très anguleux de 2 à 3 mm et gravillons blancs (10YR 8/1) friables (de nature indéterminée). Localement, sont présents en faible quantité (< 5%) des éléments volcaniques notamment des bombes volcaniques. Sa structure est massive avec une faible porosité vacuolaire.

#### **L'arène grise argileuse (Substrat II.d)**

Elle constitue un volume discontinu en large bande verticale de 1,5 à 2 m de large présentant à son sommet un volume bordeaux induré (Substrat II.g).

De couleur gris-brunâtre clair, 2,5Y 6/2, elle présente une texture argilo-limono-sableuse (ALS). Elle contient des gravillons de nature diverse : 20 % de gravillons de quartz anguleux, 10 % de gravillons blancs très friables, et des paillettes de micas noirs (< 5%). Sa structure est massive avec une faible porosité vacuolaire millimétrique.

#### **L'arène blanche diaclasée (Substrat II.e)**

Non décrite de façon précise. De couleur gris pâle 10YR 7/2, elle présente le même faciès que le volume bordeaux induré (II.g) avec lequel elle est en contact; elle comprend de nombreuses diaclases remplies de ces mêmes volumes bordeaux.

#### **L'arène sableuse grise (Substrat II.i)**

C'est un volume discontinu en poches concaves vers le haut, sableux, meuble, peu représenté, situé à la base des volumes pédologiques organiques. Alors le volume bordeaux induré (Substrat II.g) lui est sous-jacent.

#### **Volume bordeaux induré (Substrat II.g)**

Ce volume est présent sur une assez grande largeur mais de manière discontinue dans cette zone de transition : soit entre 20 et 40 cm de profondeur, à la base des volumes pédologiques, soit à plus grande profondeur (environ 1 m à 1 m 50). Il est toujours localisé en contact de l'arène blanche diaclasée (II.e).

C'est un volume dur, compact, de couleur dominante rouge pâle à jaune rougeâtre (2,5YR à 5YR 6/6) présentant des bandes ou traînées de 1 à 7 cm de large de couleur gris-pâle 10YR 7/2 à très faible porosité. Humidifié, il a une texture argilo-limono-sableuse. On reconnaît de nombreux gravillons de quartz (40 à 50 %) anguleux. Des charbons de bois sont présents en faible quantité.

C'est probablement un volume d'origine granitique, peut-être un volume d'altération de type latéritique.

#### **Volume rouge induré (Substrat II.g')**

Il est présent sur l'aval de la zone de la zone de transition. C'est un volume discontinu sous forme de bande de 50 à 100 cm de large sur quasiment toute la hauteur de la coupe de route à partir de 50 cm de profondeur, selon un axe incliné de 30 à 45° Ouest par rapport à la verticale. Il est bordé à l'est par le volume bordeaux foncé en plaquette (II.h).

C'est un volume induré de couleur rouge 2,5 YR 5/8; humidifié, il présente une texture argileuse. Il comprend de nombreux gravillons de quartz et de petits volumes blanchâtres.

Comme le volume précédent, c'est probablement un volume d'origine granitique, peut-être un volume d'altération de type latéritique.

#### **Volume bordeaux foncé en plaquettes (Substrat II.h)**

Il borde le volume rouge induré g', à l'ouest, sous forme d'une bande irrégulière de 3 à 10 cm d'épaisseur. C'est une roche dure, en plaquettes feuilletées (feuilletés irréguliers de 1 à 3 mm d'épaisseur), de couleur rouge jaunâtre 5YR 5/6, apparemment très altérée. On reconnaît de rares grains de quartz très altérés. Les faces des plaquettes présentent des placages jaune-rougeâtre (5YR 6/8) ou rouge (2,5YR 4/6) probablement d'oxydes. Au contact de ce volume, le volume rouge g' présente des gravillons/concrétions de couleur noire.

Il pourrait s'agir d'un cuirassement latéritique.

### **ZONE AVAL L'ARENE GRANITIQUE "classique" (Substrat III)**

C'est le volume 8 de la séquence.

Depuis la zone de transition vers la zone aval, le substrat passe progressivement de l'arène ocre sableuse à une arène grise graveleuse. Cette dernière constitue le substrat de toute la zone aval. Une analyse totale a été réalisée (Tab.II.1.1).

Elle a pu être décrite sur sondages et sur coupe de route. Cette arène du granite de la Margeride affleure notamment en coupe de route à l'aval de la séquence sous forme d'une arène à architecture conservée. Elle est parcourue de filons d'aplite et de nombreuses diaclases de couleur rouille. Le toit de l'arène présente des ondulations importantes de 1 à 1m 50 d'amplitude.

Elle présente une couleur générale gris clair (5 YR 7/1), localement plus rosée brun rougeâtre clair (5YR 6/3). Sa texture est graveleuse à sableuse. On note la présence de grands phénocristaux pluri-centimétriques de feldspath alcalins sub-automorphes (d'où le nom de granite à "dents de cheval"), de nombreux quartz, des micas des 2 types : biotite et muscovite et la présence de cordiérite subautomorphe. La structure est massive ou particulière avec une porosité inter-grains assez importante.

Ann. Tab. VII.1 Andosol (horizons AN1 à AN6) : Valeurs d'Indice de vide, Indice d'eau, Indice d'air : moyennes, intervalles de confiance et coefficient de variation aux différentes contraintes hydriques appliquées.

ANDOSOL	pF	Nbre	Indice de vide				Indice d'eau				Indice d'air				Sat
			Moy.	I.C.	Coef. Var.	Test égal.	Moy.	IC.	Coef. Var.	Test égal.	Moy.	IC	Coef. Var.	Moy.	
Horizons		d'éch.													
	0,5	10	3,9254	0,2470	8,8%		3,1345	0,2540	11,3%		0,7909	0,2000	35,4%	79,9%	
	1	6	3,0533	0,3008	9,4%	+	2,4363	0,0854	3,3%		0,6170	0,3336	51,5%	80,4%	
AN1	2	14	3,2045	0,2867	15,5%	N.S.	2,0626	0,0889	7,5%		1,1419	0,2182	33,1%	65,2%	
	3	10	3,1969	0,3229	14,1%	N.S.	1,6079	0,1666	14,5%		1,5890	0,1933	17,0%	50,4%	
	4,2	8	3,4288	0,3491	12,2%	N.S.	1,4756	0,0959	7,8%		1,9532	0,2607	16,0%	43,2%	
	6,6	10	1,7901	0,1347	10,5%	+			--		1,7901	0,1347	10,5%		
	0,5	10	2,5363	0,0804	4,4%		2,3877	0,0794	4,6%		0,1486	0,0146	13,7%	94,1%	
	1	10	2,8428	0,1094	5,4%	+	2,4781	0,0854	4,8%		0,3647	0,0426	16,3%	87,2%	
AN22	2	12	3,0412	0,1384	7,2%	+	2,3069	0,0485	3,3%		0,7343	0,1080	23,2%	76,1%	
	3	9	2,4950	0,1138	5,9%	+	1,5031	0,0536	4,6%		0,9919	0,0924	12,1%	60,3%	
	4,2	7	2,6410	0,2096	8,6%	N.S.	1,0414	0,2165	22,5%		1,5996	0,2217	15,0%	39,4%	
	6,6	10	1,8168	0,0509	3,9%	+			--		1,8168	0,0509	3,9%		
	0,5	8	2,3232	0,3452	17,8%		2,2494	0,3315	17,6%		0,0738	0,0226	36,6%	96,9%	
	1	9	2,7381	0,1707	8,1%	+	2,4250	0,1326	7,1%		0,3131	0,0597	24,8%	88,6%	
	2	9	2,8622	0,1812	8,2%	N.S.	2,0445	0,0920	5,9%		0,8177	0,1831	29,1%	71,8%	
	3	10	2,4267	0,1370	7,9%	+	1,5645	0,0618	5,5%		0,8622	0,1259	20,4%	64,7%	
AN31	4,2	9	2,3529	0,1505	8,3%	N.S.	1,1327	0,0354	4,1%		1,2202	0,1422	15,2%	48,4%	
	6,6	9	1,7663	0,1368	10,1%	+			--		1,7663	0,1368	10,1%		
AN3103	4,2	10	2,2305	0,1382	12,9%	+	1,1378	0,0362	6,6%		1,0027	0,1262	24,0%	51,7%	
	6,6	9	1,7663	0,1368	10,1%	+			--		1,7663	0,1368	10,1%		
	0,5														
	1	10	1,8300	0,1838	14,0%		1,6735	0,1405	11,7%		0,1565	0,0528	47,1%	91,7%	
AN4	2	10	1,9685	0,2039	14,5%	N.S.	1,4755	0,1117	10,6%		0,4931	0,1059	30,0%	75,4%	
	3	16	1,8955	0,0893	8,8%	N.S.	1,2163	0,0519	8,0%		0,6791	0,0451	12,5%	64,2%	
	4,2	10	1,6579	0,1219	10,3%	+	0,8431	0,0642	10,7%		0,8148	0,0785	13,5%	50,9%	
	6,6	7	1,3591	0,2052	16,3%	+			--		1,3591	0,2052	16,3%		
	0,5														
	1	8	1,4892	0,0248	2,0%		1,4174	0,0253	2,1%		0,0718	0,0128	21,3%	95,2%	
AN5	2	10	1,4691	0,0614	5,8%	N.S.	1,2584	0,0370	4,1%		0,2107	0,0484	32,1%	85,8%	
	3	9	1,4299	0,0336	3,1%	N.S.	1,1189	0,0186	2,2%		0,3110	0,0292	12,2%	78,3%	
	4,2	19	1,3441	0,0564	8,7%	+	0,7750	0,0160	4,3%		0,5691	0,0577	21,0%	58,1%	
	6,6	8	1,2013	0,0927	9,2%	+			--		1,2013	0,0927	9,2%		
	0,5														
	1	8	1,3205	0,0479	4,3%		1,3312	0,0425	3,8%		-0,011	0,0113	-127%	101%	
AN6	2	8	1,3627	0,0776	6,8%	N.S.	1,2864	0,0760	7,1%		0,0763	0,0262	41,1%	94,4%	
	3	8	1,3634	0,0448	3,9%	N.S.	1,1606	0,0432	4,5%		0,2028	0,0444	26,2%	85,2%	
	4,2	7	1,2873	0,0512	4,3%	+	0,7303	0,0212	3,1%		0,5570	0,0639	12,4%	56,8%	
	6,6	8	1,1095	0,0391	4,2%	+			--		1,1095	0,0391	4,2%		

**Ann. Tab. VII.2 Rankers andiques (horizons K1, K2) : Valeurs d'Indice de vide, Indice d'eau, Indice d'air : moyennes, intervalles de confiance et coefficient de variation aux différentes contraintes hydriques appliquées.**

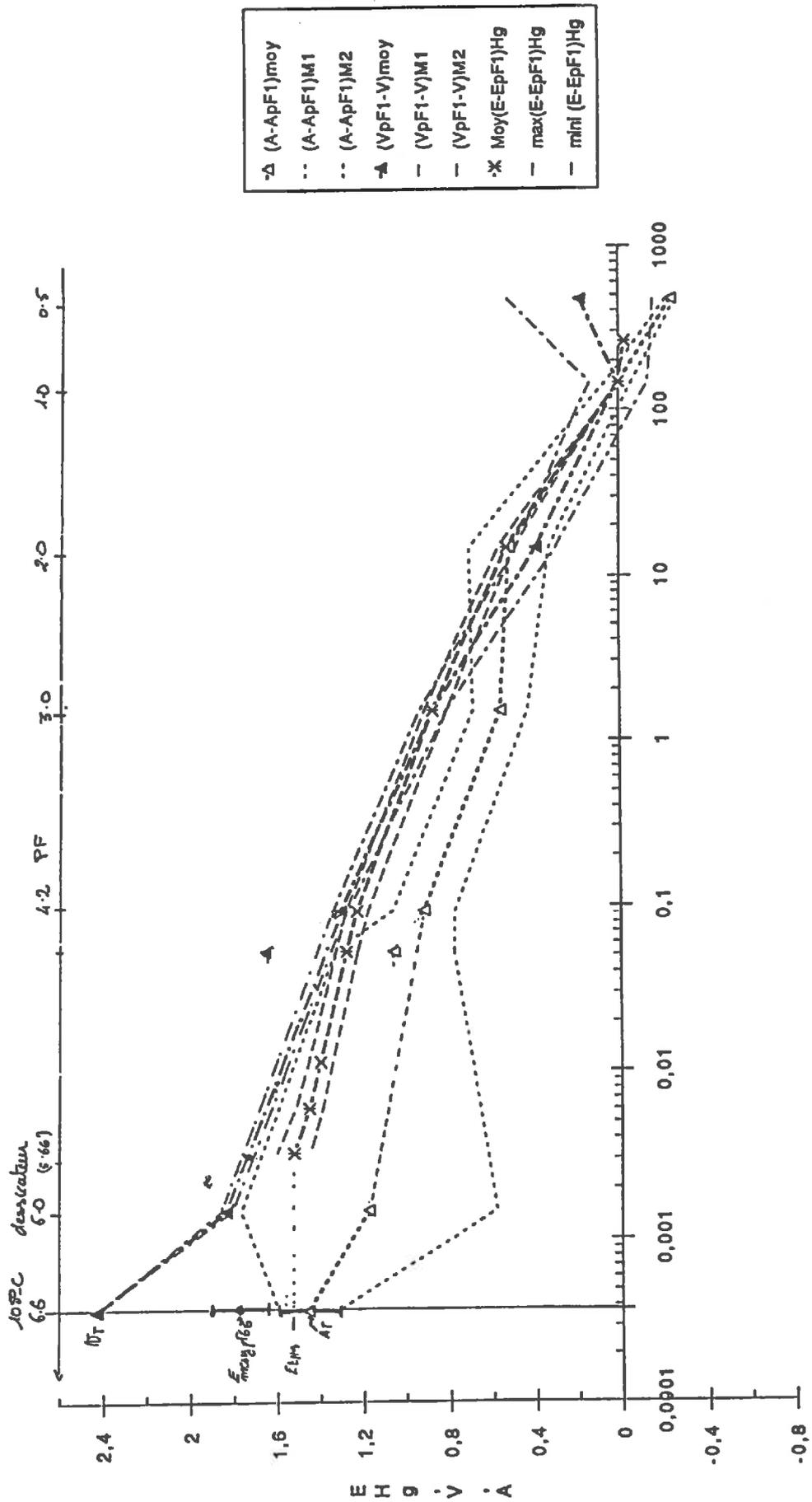
RANKER			Indice de vide				Indice d'eau				Indice d'air			Sat
ANDIQUE	pF	Nbre			Coef.	Test			Coef.	Test			Coef.	
Horizons		d'éch.	Moy.	I.C.	Var.	égal.	Moy.	IC.	Var.	égal.	Moy.	IC	Var.	Moy.
	0,5	10	3,6589	0,4999	19,1%		2,8296	0,3112	15,4%		0,8294	0,2443	41,2%	77,9%
	1	9	2,6373	0,4474	22,1%	+	2,1618	0,3089	18,6%		0,4755	0,1589	43,5%	82,6%
K1	2	10	2,8211	0,4619	22,9%	N.S.	1,6727	0,1555	13,0%		1,1484	0,3226	39,3%	60,4%
	3	10	2,9031	0,3994	19,2%	N.S.	1,3221	0,1177	12,4%		1,5810	0,3179	28,1%	46,2%
	4,2	9	3,4082	0,3451	13,2%	+	1,3296	0,1314	12,9%		2,0786	0,2327	14,6%	39,1%
	6,6	10	1,9187	0,2632	19,2%	+			--		1,9187	0,2632	19,2%	
	0,5	8	2,3711	0,1916	9,7%		2,1089	0,1556	8,8%		0,2623	0,1044	47,6%	89,1%
	1	10	2,6066	0,2365	12,7%	N.S.	2,0907	0,1752	11,7%		0,5159	0,1071	29,0%	80,4%
K2	2	10	2,4366	0,2518	14,4%	N.S.	1,5732	0,0584	5,2%		0,8634	0,2293	37,1%	65,5%
	3	10	2,2044	0,1628	10,3%	N.S.	1,2377	0,0562	6,3%		0,9667	0,1279	18,5%	56,4%
	4,2	9	2,4957	0,3463	18,1%	N.S.	1,2107	0,1169	12,6%		1,2850	0,2564	26,0%	49,1%
	6,6	10	1,7062	0,1481	12,1%	+			--		1,7062	0,1481	12,1%	

**Ann. Tab. VII.3 Sol Brun Acide (horizons BA1 à BA6) : Valeurs d'Indice de vide, Indice d'eau, Indice d'air : moyennes, intervalles de confiance et coefficient de variation aux différentes contraintes hydriques appliquées.**

SOL BRUN			Indice de vide				Indice d'eau				Indice d'air			Sat
ACIDE	pF	Nbre		Coef.	Test			Coef.	Test			Coef.		
Horizons		d'éch.	Moy.	I.C.	Var.	égal.	Moy.	IC.	Var.	égal.	Moy.	IC	Var.	Moy.
	0,5	9	1,5465	0,1619	13,6%		1,4258	0,1433	13,1%		0,1207	0,0496	53,5%	92,3%
	1	8	1,5930	0,1864	14,0%	N.S.	1,2944	0,1224	11,3%		0,2986	0,0725	29,0%	81,7%
BA1	2	8	1,4077	0,1664	14,1%	N.S.	1,0860	0,0885	9,7%		0,3217	0,1094	40,7%	77,7%
	3	8	1,5359	0,1615	12,6%	N.S.	0,7792	0,0695	10,7%		0,7567	0,1023	16,2%	50,9%
	4,2	10	1,3072	0,1060	11,3%	+	0,5385	0,0392	10,2%		0,7687	0,0939	17,1%	41,5%
	6,6	10	0,9651	0,0665	9,6%	+			--		0,9651	0,0665	9,6%	
	0,5	9	0,8053	0,0356	5,8%		0,7945	0,0319	5,2%		0,0108	0,0179	215%	98,7%
	1	10	0,8858	0,0539	8,5%	+	0,7410	0,0255	4,8%		0,1448	0,0360	34,8%	84,0%
BA2	2	8	0,8109	0,0642	9,5%	N.S.	0,6733	0,0260	4,6%		0,1376	0,0450	39,1%	83,4%
	3	9	0,7740	0,0505	8,5%	N.S.	0,5246	0,0182	4,5%		0,2493	0,0377	19,7%	68,0%
	4,2	9	0,7242	0,0517	9,3%	N.S.	0,3169	0,0219	9,0%		0,4073	0,0332	10,6%	43,8%
	6,6	10	0,6567	0,0488	10,4%	+			--		0,6567	0,0488	10,4%	
	0,5	10	1,1159	0,0773	9,7%		1,0500	0,0662	8,8%		0,0660	0,0143	30,2%	94,2%
	1	10	1,0459	0,0767	10,2%	N.S.	0,8310	0,0645	10,8%		0,2149	0,0402	26,2%	79,5%
BA3	2	9	1,0437	0,0489	6,1%	N.S.	0,8036	0,0479	7,7%		0,2401	0,0187	10,1%	76,9%
	3	10	1,0490	0,0926	12,3%	N.S.	0,6430	0,0447	9,7%		0,4060	0,0589	20,3%	61,6%
	4,2	19	0,9807	0,0417	8,8%	N.S.	0,4195	0,0152	7,5%		0,5611	0,0373	13,8%	43,0%
	6,6	10	0,9782	0,0438	6,3%	N.S.			--		0,9782	0,0438	6,3%	
	0,5													
	1	9	0,9806	0,0530	7,0%		0,9062	0,0435	6,2%		0,0744	0,0151	26,4%	92,5%
BA4	2	10	0,9483	0,0813	12,0%	N.S.	0,7156	0,0453	8,8%		0,2328	0,0387	23,3%	75,7%
	3	9	0,9597	0,0711	9,6%	N.S.	0,5861	0,0348	7,7%		0,3737	0,0431	15,0%	61,2%
	4,2	9	0,8765	0,0512	7,6%	+	0,3903	0,0076	2,5%		0,4863	0,0527	14,1%	44,8%
	6,6	10	0,8799	0,0336	5,3%	N.S.			--		0,8799	0,0336	5,3%	
	0,5													
	1	10	0,7943	0,0264	4,7%		0,7458	0,0263	4,9%		0,0485	0,0060	17,4%	93,9%
BA5	2	9	0,7091	0,0235	4,3%	+	0,5342	0,0144	3,5%		0,1749	0,0112	8,3%	75,4%
	3	10	0,7422	0,0272	5,1%	N.S.	0,4595	0,0192	5,9%		0,2828	0,0151	7,5%	61,9%
	4,2	10	0,6870	0,0186	3,8%	+	0,2524	0,0106	5,9%		0,4345	0,0165	5,3%	36,8%
	6,6	9	0,6870	0,0201	3,8%	N.S.			--		0,6870	0,0201	3,8%	
	0,5													
	1	9	0,8275	0,0770	12,1%		0,7994	0,0774	12,6%		0,0282	0,0094	43,4%	96,6%
BA6	2	9	0,6987	0,0579	10,8%	+	0,6004	0,0580	12,6%		0,0984	0,0144	19,1%	85,8%
	3	10	0,6778	0,0535	11,0%	N.S.	0,4510	0,0274	8,5%		0,2268	0,0547	33,7%	67,2%
	4,2	10	0,6749	0,0472	9,8%	N.S.	0,2795	0,0199	9,9%		0,3955	0,0343	12,1%	41,5%
	6,6	9	0,4946	0,0478	12,6%	(+)??			--		0,4946	0,0478	12,6%	

Annexe VIII.1

Andosol-horizon AN31 - Volume d'eau extrait, d'air entré et Volume poral cumulé moyennes et intervalles de confiance.

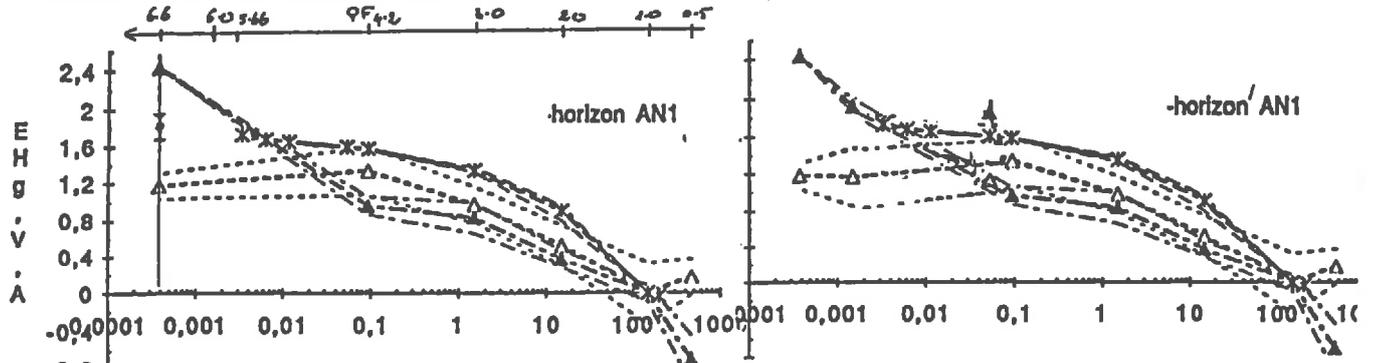


Rayon de constriction (microns)

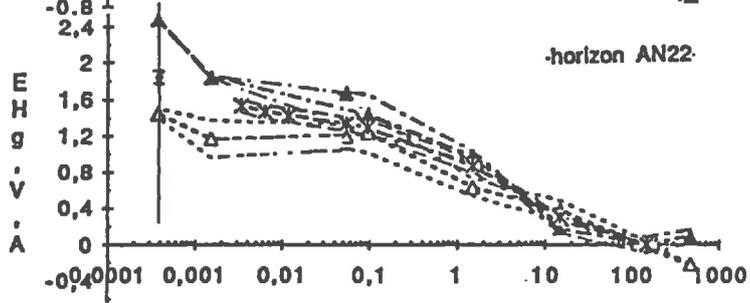
Annexe VIII.2

Andosol - Volume d'eau extrait, d'air entré et Volume poral cumulé - moyennes et Intervalles de confiance

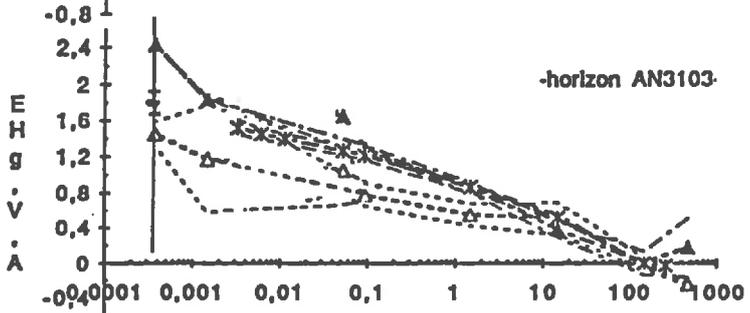
a



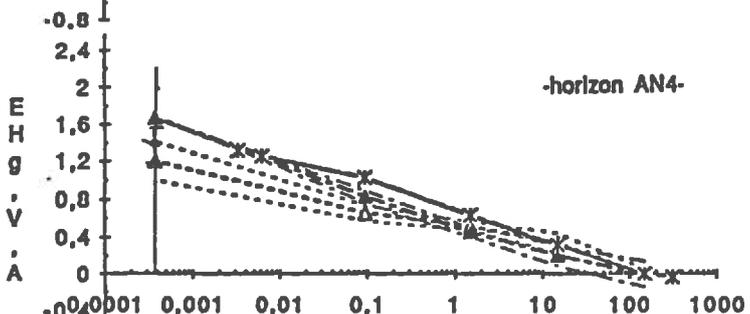
b



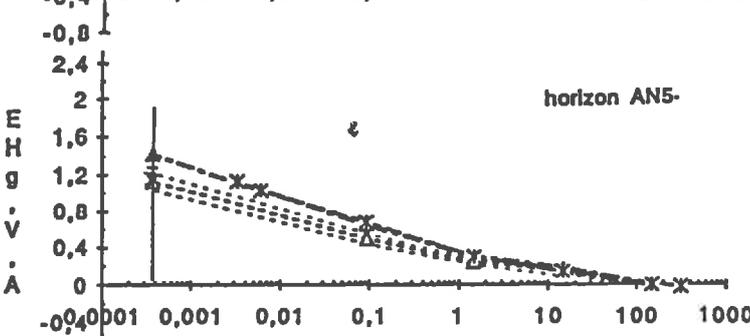
c



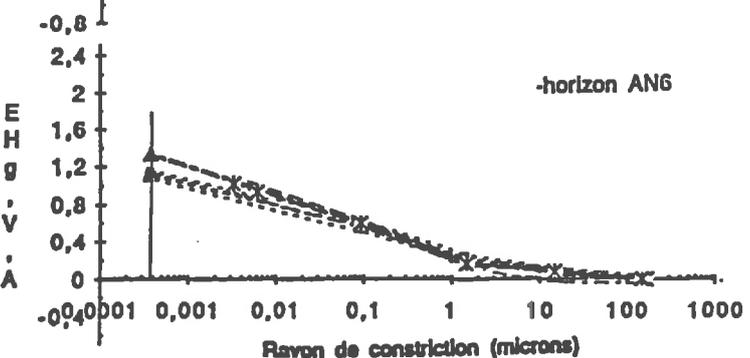
d



e



f



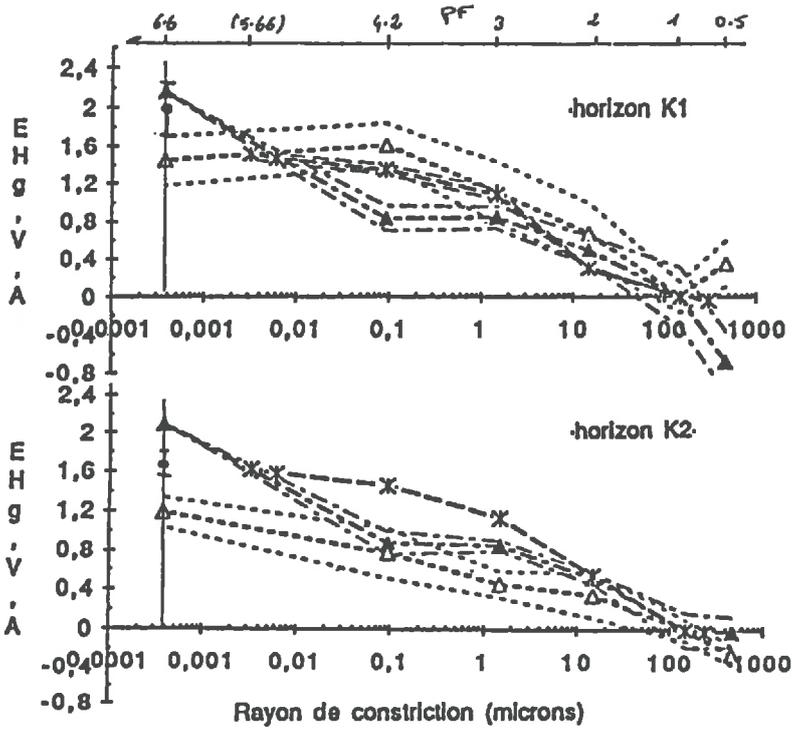
- △ (A-ApF1)moy
- .. (A-ApF1)M1
- .. (A-ApF1)M2
- △ (VpF1-V)moy
- (VpF1-V)M1
- (VpF1-V)M2
- x Moy(E-EpF1)Hg
- max(E-EpF1)Hg
- mini (E-EpF1)Hg

± Ep66 et IC (moyens et intervalles de confiance)

Annexe VIII.3

Ranker Andique-Volome d'eau extrait, d'air entré et Volome poral cumulé

et Intervalle de confiance.

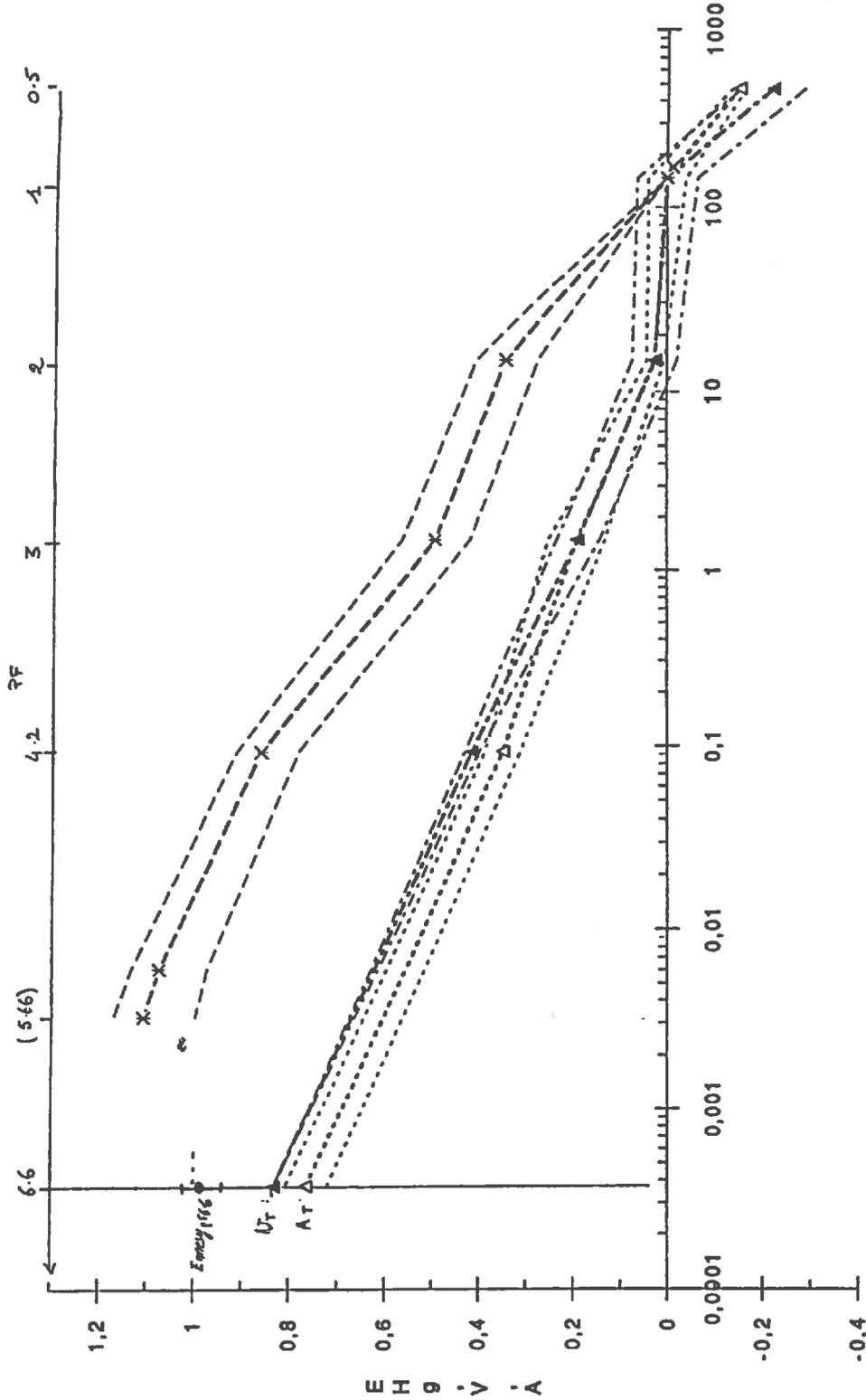


- |                     |                        |                  |
|---------------------|------------------------|------------------|
| Mesure<br>Hydraires | Volume<br>Air<br>entré | -Δ (A-ApF1)moy   |
|                     |                        | -- (A-ApF1)M1    |
| Mesure<br>Porosim.  | Volume<br>Eau<br>sorti | -Δ (VpF1-V)moy   |
|                     |                        | -- (VpF1-V)M1    |
|                     |                        | -- (VpF1-V)M2    |
|                     |                        | * Moy(E-EpF1)Hg  |
|                     |                        | -- max(E-EpF1)Hg |
|                     |                        | -- min(E-EpF1)Hg |

⊠ E p 66 mesure au jetide

Annexe VIII.4

Brun Acide-horizon BA3-Volume d'eau extrait,d'air entré et Volume poral cumulé : moyennes et Intervalles de confiance.

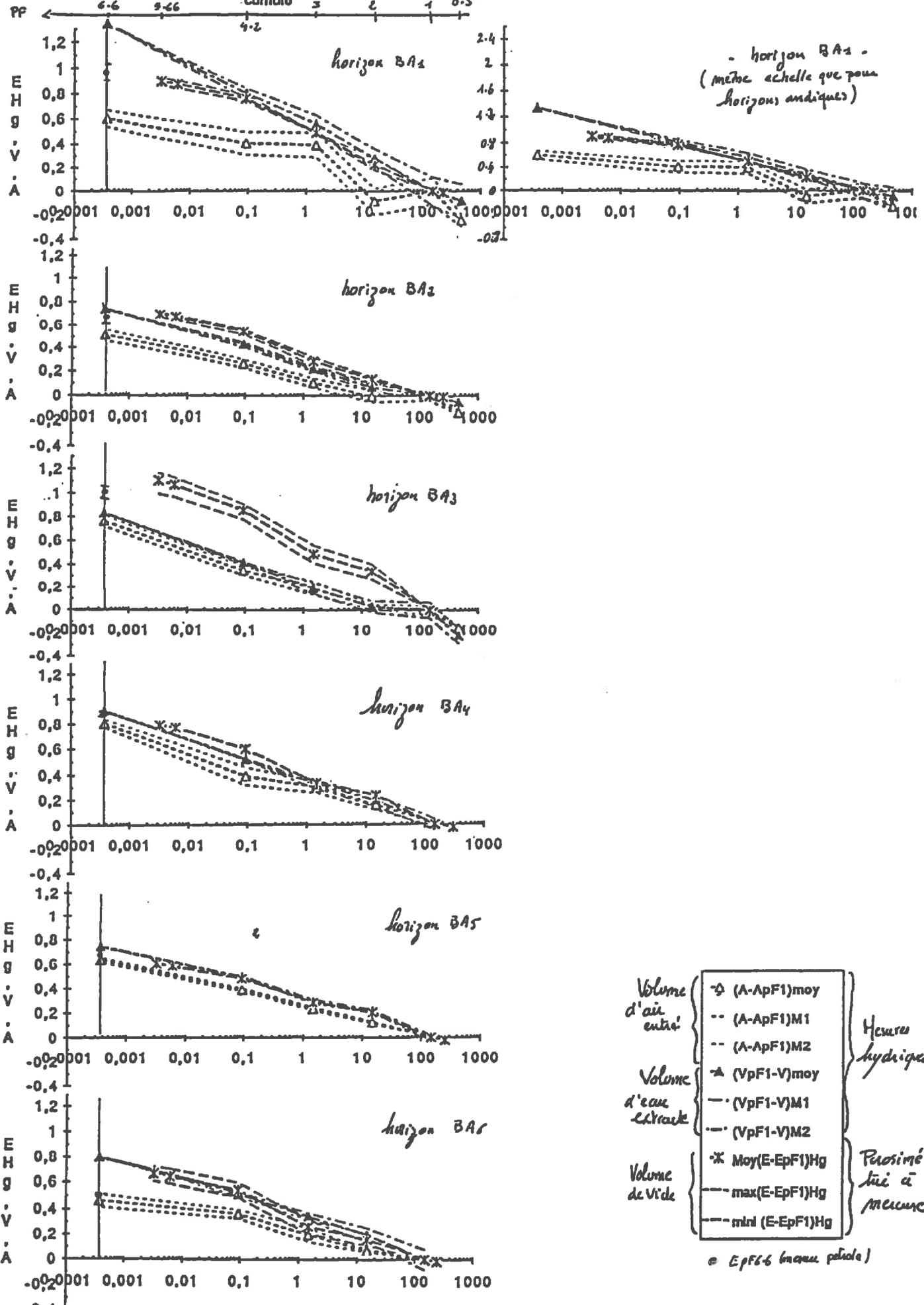


Rayon de constriction (microns)

Annexe VIII.5

Brun Acide-horizon BA - Volume d'eau extrait, d'air entré et Volume poral cumulé

et Intervalles de confiance



Echantillon	Indice d'eau sur sol conservé humide			Indice d'eau sur sol séché à l'air			variation de l'indice d'eau entre sol humide et séché			taux de variation par rapport au sol humide		
	pF3	pF4,2	pF3-pF4,2	pF3	pF4,2	pF3-pF4,2	pF3	pF4,2	pF3-pF4,2	pF3	pF4,2	pF3-pF4,2
AN1	1,5877	1,1387	0,4490	1,3848	1,2848	0,1000	0,2029	-0,1461	0,3490	12,8%	-12,8%	77,7%
AN2	1,9193	1,3988	0,5205	1,3835	1,2720	0,1115	0,5358	0,1268	0,4090	27,9%	9,1%	78,6%
AN3	1,7264	1,3677	0,3587	1,1354	0,9143	0,2211	0,5910	0,4534	0,1376	34,2%	33,2%	38,4%
AN4	1,2965	1,0578	0,2387	1,0077	0,7403	0,2674	0,2888	0,3175	-0,0287	22,3%	30,0%	-12,0%
AN5	1,1733	0,9516	0,2217	1,1123	0,8920	0,2203	0,0610	0,0596	0,0014	5,2%	6,3%	0,6%
AN6	1,0998	0,8729	0,2269	1,0889	0,8385	0,2504	0,0109	0,0344	-0,0235	1,0%	3,9%	-10,4%
K1	1,3877	1,0037	0,3840	1,1801	1,0670	0,1131	0,2076	-0,0633	0,2709	15,0%	-6,3%	70,5%
K2	1,4774	1,0769	0,4005	1,2288	1,1283	0,1005	0,2486	-0,0514	0,3000	16,8%	-4,8%	74,9%
BA1	0,9201	0,5866	0,3335	0,6887	0,5800	0,1087	0,2314	0,0066	0,2248	25,1%	1,1%	67,4%
BA2	0,6321	0,4581	0,1740	0,5650	0,4361	0,1289	0,0671	0,0220	0,0451	10,6%	4,8%	25,9%
BA3	0,7624	0,6117	0,1507	0,6371	0,5581	0,0790	0,1253	0,0536	0,0717	16,4%	8,8%	47,6%
BA4	0,6864	0,5607	0,1257	0,5725	0,4696	0,1029	0,1139	0,0911	0,0228	16,6%	16,2%	18,1%
BA5	0,5045	0,4035	0,1010	0,4509	0,3377	0,1132	0,0536	0,0658	-0,0122	10,6%	16,3%	-12,1%
BA6	0,4992	0,3889	0,1103	0,4515	0,3106	0,1409	0,0477	0,0783	-0,0306	9,6%	20,1%	-27,7%

Ann. VIII.6 : Andosol, Ranker andique et Sol Brun Acide : Mesures d'indice d'eau sur sol tamisé à 2 mm à pF3 et à pF4,2 partant de 2 états d'hydratation initiaux 1) sur sol conservé humide; 2) sur sol séché à l'air.

Liste des figures

**Chapitre I : Caractérisation générale du milieu**

Fig. I.1 : Localisation de l'Aubrac dans le Massif Central Français.....	2
Fig. I.2 : Les grandes régions naturelles de l'Aubrac.....	2
Fig. I.3 : La géologie de l'Aubrac (extrait de la carte géologique au 1/1.000.000 de France, complétée d'après Colin, 1971 ).....	5
Fig. I.4 : Coupe géologique de la Viadène aux Monts d'Aubrac passant par les 2 sites d'étude : site 1 "Puech Roux" et site 2 "Puech Montarquié".....	5
Fig. I.5 : Diagramme ombrothermique de la station de LAGUIOLE.....	7
Fig. I.6 : Carte pédologique de l'Aubrac : extrait de la carte pédologique de France au 1/1.000.000; Dupuis, 1966).....	10
Fig. I.7 : Carte pédologique de l'Aubrac : extrait de la carte pédologique de l'Europe au 1/1.000.000; F.A.O, Tavernier et Louis, 1980-81).....	11

**Chapitre III : Approche macromorphologique**

**Séquences et volumes de référence**

Fig. III.1 : Substrats variés de la séquence 1 Puech Roux (observés en coupe de route)	
a. Photographie; b : schéma correspondant .....	19
Fig. III.2 : Séquence 1 Puech Roux : Distribution bidimensionnelle des volumes .....	20
Fig. III.3 : Schéma de la tranchée F1 : Rankers andiques sur basalte sain (F1A) et sur altérite de basalte (F1B).....	22
Fig. III.4 : Schéma de la tranchée F2 : Sol Brun Acide sur arène granitique.	
Séquence Puech Montarquié.....	27
Fig. III.5 : Séquence 2 Puech Montarquié : Distribution bidimensionnelle des volumes.....	39
Fig.III.6 : Schéma de la tranchée F : "Andosol Montarquié".....	34
PLANCHE I, Fig. III.7 : Structure des volumes de l'andosol "Montarquié" : .....	42
PLANCHE I, Fig. III.8 : Structure des volumes du sol brun acide "Puech Roux".....	43

**Chapitre IV : Données physico-chimique et minéralogique**

Fig. IV.1 : Evolution verticale des teneurs en matière organique (1a) et des rapports C/N (1b) dans l'Andosol, le ranker andique et le sol brun acide.....	48
Fig. IV.2 : Comparaison des spectres granulométrique selon les 2 méthodes "Hu" (sol conservé frais et traité aux ultrasons) et "St" (sol séché à l'air; méthode classique).....	50
Fig. IV.3 : Distribution de la taille des particules de 2 sols allophaniques après déshydratation à différentes valeurs de succion (Kubota, 1972). .....	51
Fig.IV.4 : Profils granulométriques pour l'andosol (a), le ranker andique (b) et le sol brun acide (c). .....	52
Fig. IV.5 : Comparaison des profils de teneurs en matière organique et de teneurs en particules < 2µm pour l'andosol (a), le ranker andique (b) et le sol brun acide (c).....	52
Fig. IV.6 : Analyses totales : Evolution verticale des éléments majeurs (6.a) et des éléments mineurs (6.b).....	55
Fig. IV.7 : Diagrammes de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 µm pour les horizons BA6 à BA1 du Sol Brun Acide - traitement Mg .....	57
Fig.IV.8 : Diagrammes de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 µm pour les horizons supérieurs BA6, BA3, BA1 du Sol Brun Acide à différents traitements.....	58
Fig.IV.9 : Diagrammes de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 µm pour les horizons AN6 à AN1 de l'Andosol - traitement au Mg .....	63
Fig. IV.10: Diagrammes de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 µm pour les horizons K1 et K2 du Ranker - traitement au Mg .....	63
Fig. IV.11 : Diagrammes de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 µm pour les horizons AN6 à AN1 de l'Andosol à différents traitements.....	64
Fig.IV.12 :Diagrammes de diffraction de rayons X de la fraction inférieure à 2 µm pour les horizons K1 et K2 du Ranker - traitement au Mg .....	65
Fig. IV.13 : Evolutions verticales des formes de Al (1) et Fe "amorphes" (2) - en g pour 100 g de sol < 2 mm. ....	76
Fig.IV.14 : Evolutions verticales des différents extraits de Al (1) et Fe (2), respectivement en % de Al <sub>T</sub> et de Fe <sub>T</sub> .....	77
Fig. IV.15.: Evolution verticale des valeurs du pH eau et du pH KCl sur sol conservé frais.....	81
Fig. IV.16: Evolution verticale des valeurs du pH eau et du pH KCl sur sol séché à l'air.....	81

Fig. IV.17.: Variation de la capacité d'échange en fonction du pH.....	83
Fig. IV.18. : Evolution verticale de la CEC mesurée au pH du sol et des cations échangeables; et évolution verticale de la somme des bases échangeables, de l'Aluminium échangeable et de la valeur "CECsol - (S+Al)" en % de la CEC au pH du sol.....	86
Fig. IV.19 : Evolution verticale des valeurs de pH NaF .....	87
Fig. IV.20.: Corrélation entre pH NaF et Al extrait à l'oxalate.....	88
Fig. IV.21. : Capacité de rétention du phosphore (méthode Blackmore) : profils verticaux pour l'andosol, le ranker andique et le sol brun acide. ....	89
Fig. IV.22 : Relation entre rétention du phosphore et Al extrait à l'oxalate.....	89
Fig. IV.23 : Evolution verticale de la densité de solide .....	91
Fig. IV.24 : Evolution verticale de la densité apparente.....	91
Fig. IV.25 : Evolution verticale des volumes de solide, d'eau et d'air rapportées au volume de solide, au champ, au moment des prélèvements dans l'andosol (a) et le sol brun acide (b) - mesures au densitomètre à membrane sur des volumes de 300 cm <sup>3</sup> en moyenne.....	92
Fig. IV.26 : Corrélation entre la densité apparente et la teneur en eau mesurées au champ (densitomètre à membrane) pour les 14 échantillons étudiés.....	92

#### Chapitre V : Approche micromorphologique

Planche II : Horizon microagrégé AN3 de l'andosol.....	99
Planche III : Horizon microagrégé AN3 de l'andosol.....	101
Planche IV : Horizon microagrégé BA3 du sol brun acide.....	103
Planche V : Horizon microagrégé BA3 du sol brun acide.....	105

#### Chapitre . VI : Porosimétrie à mercure

Fig. VI.1 Schéma représentant la façon dont est définie une classe de pores, son volume poral, et le rayon de constriction modal correspondant .....	122
Fig. VI.2 : Indice de vide cumulé et spectre de porosité en fonction du rayon de constriction des pores pour les 6 horizons du sol brun acide : BA1 (a), BA2 (b), BA3 (c), BA4, (d), BA5 (e), BA6 (f) - moyennes et répétitions - Echantillons centimétriques déshydratés par séchage à 105°C.....	124
Fig. VI.3 : Indice de vide cumulé et spectre de porosité en fonction du rayon de constriction des pores pour les 6 horizons de l'andosol : AN1 (a), AN2 (b), AN3 (c), AN4, (d), AN5 (e), AN6 (f) - moyennes et répétitions - Echantillons centimétriques déshydratés par séchage à 105°C.....	125
Fig. VI.4 : Indice de vide cumulé et spectre de porosité en fonction du rayon de constriction des pores pour les 2 horizons du ranker andique :K1 (a), K2 (b)- moyennes et répétitions -. Echantillons centimétriques déshydratés par séchage à 105°C.....	126
Fig. VI.5 : Comparaison des indices de vide cumulés (a) et des spectres de porosité (b) des horizons les plus microagrégés de l'andosol (AN3) et du sol brun acide (BA3).....	131

#### Chapitre .VII : Comportement physico-hydrigue.

Fig.VII.1 : Profils porosimétriques : évolution verticale des indices de vide : mesuré au densitomètre à membrane (EHZ), sur motte fraîche (EMh), sur motte séché à 105°C .....	141
Fig.VII.2 : Profils porosimétriques : Evolution verticale des indices de vide en pour cent de l'indice de vide EHZ mesuré au densitomètre à membrane.....	141
Fig.VII.3 : Courbes de retrait pour chacun des horizons des sols andiques : andosol (AN1 à AN6) et ranker (K1, K2).....	146
Fig. VII.4 : Courbes d'évolution de l'indice de vide, de l'indice d'eau et de l'indice d'air en fonction du pF, pour chacun des horizons des sols andiques : andosol (AN1 à AN6) et ranker (K1, K2).....	148
Fig.VII.5. : Courbes de retrait pour chacun des horizons du sol brun acide (BA1 à BA6). ....	147
Fig. VII. 6 : Courbes d'évolution de l'indice de vide, de l'indice d'eau et de l'indice d'air en fonction du pF, pour chacun des horizons du sol brun acide (BA1 à BA6). ....	149
Fig.VII.7 : Les courbes de rétention d'eau superposées pour chacun des horizons des sols andiques : andosol (AN1 à AN6) et ranker andique (K1, K2) .....	154
Fig.VII.8 : Les courbes de rétention d'eau superposées pour chacun des horizons du sol brun acide BA1 à BA6) .....	155
Fig.VII.9 : Quantité d'eau retenue à pF 4,2 en fonction de la teneur en argile (a), de la capacité d'échange (b) et du volume de vide au moment du prélèvement (c).....	159
Fig.VII.10 : Comparaison des données du comportements hydriques entre les 2 horizons microagrégés de l'andosol (AN3) et du sol Brun Acide (BA3).....	162

**Chapitre VIII : Comparaison des données du comportement physico-hydrrique et des données de porosimétrie.**

**Fig. VIII.1 :** Comparaison entre la courbe de volume d'eau extrait, la courbe de volume d'air entré obtenues en mesures physico-hydriques et la courbe de volume poral cumulé obtenue en porosimétrie pour la craie (a), une argile gonflante (b) et un matériau argileux (c).....166

**Fig. VIII.2 :** Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait , du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour l'horizon microagrégé AN3 de l'Andosol. ....170

**Fig. VIII.3 :** Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 6 horizons de l'Andosol.....172

**Fig. VIII.4 :** Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 2 horizons du Ranker andique.....178

**Fig. VIII.5 :** Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait (a), du volume d'air entré (b) et du volume poral cumulé (c) en fonction de la valeur du rayon de constriction pour l'horizon le plus microagrégé BA3 du sol Brun Acide.....178

**Fig. VIII.6 :** Comparaison entre les courbes du volume d'eau extrait, du volume d'air entré et du volume poral cumulé en fonction de la valeur du rayon de constriction pour les 6 horizons du Sol Brun Acide .....180

Liste des tableaux

**Chapitre I : Caractérisation générale du milieu**

Tab. I.1 : Synthèse des analyses de la couche superficielle des sols sur basalte et sur granite (d'après C.D.A.N.A, 1988 et Dejou, 1980). .....12

**Chapitre III : Approche macromorphologique**

**Séquences et volumes de référence**

Tab. III.1 : Description morphologique succincte des volumes-substrats observés en coupe de route pour la Séquence Puech Roux.....18

Tab. III.2 : Analyses chimiques des substrats de la séquence Puech Roux : basalte amont et arène granitique aval. ....18

Tab. III.3 : Description macromorphologique des volumes observés sur la fosse F1A : Ranker andique sur basalte sain et sur la fosse F1B : Ranker andique sur altérite de basalte.....28

Tab III.4: Description macromorphologique des volumes observés sur la fosse F2 : Sol Brun Acide sur arène granitique .....29

Tab. III.5: Analyses chimiques totales des substrats de la séquence Puech Montarquié : basalte et tuffo-lave rouge. ....32

Tab. III.6 : Description macromorphologique des 6 volumes observés sur la fosse F : Andosol Montarquié.....35

**Chapitre IV : Données physico-chimiques et minéralogiques**

Tab. IV.1 : Sol Brun Acide: Estimation semi-quantitative des minéraux cristallisés identifiés aux rayons X .....60

Tab. IV.2 : Sols Andiques ; Estimation semi-quantitative des minéraux cristallisés identifiés aux rayons X; fraction < 2 µm .....66

Tab. IV.3 : Action comparée des réactifs utilisés sur les formes de l'aluminium, du fer et du silicium dans les sols.....71

Tab. IV.4 : Rapport Si/Al des "allophanes s.l." dits plutôt "Aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance" (Herbillon, 1983).....72

Tab. IV.5a : aluminium, fer, et silicium Totaux et extraits par le CBD, l'oxalate, le pyrophosphate et le tétraborate - *en g pour 100 g de sol < 2 mm.* .....74

Tab. IV.5b : *Rapports caractéristiques* pour l'aluminium, le fer et le silicium.....75

Tab.IV.5c: Rapports atomiques des extraits Al et Si à l'oxalate et Calculs des teneurs en allophanes S.L.....75

**Chapitre VI : Porosimétrie à mercure**

Tab. VI.1 : Sol Brun Acide - Rayon de constriction (Rc) modal et volume de pore (E) correspondant pour chacune des classes 1, 2 et 3. ....127

Tab. VI.2 : Andosol - Rayon de constriction (Rc) modal et volume de pore (E) correspondant pour chacune des classes 1, 2 et 3.....128

Tab. VI.3 : Ranker Andique - Rayon de constriction (Rc) modal et volume de pore (E) correspondant pour chacune des classes 1, 2 et 3.....129

**Chapitre. VII : Comportement physico-hydrlique.**

Tab VII.1a : - Niveaux énergétiques de l'eau dans le sol. et méthodes utilisées pour amener les échantillons à l'équilibre aux différents pF.....138

Tab. VII.1b : Chemin suivi pour amener les échantillons à l'équilibre aux différents pF. ....138

# Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I</b>	
<b>Caractérisation générale du milieu.....</b>	<b>3</b>
1. Choix de la région d'étude.....	3
2. Le cadre géographique et géomorphologique.....	3
La région des Monts d'Aubrac .....	3
La région Nord-Est.....	3
La région Sud-Occidentale .....	4
La Viadène .....	4
Le pays des Boraldes.....	4
Le pays d'Olt .....	4
3. Le substrat géologique.....	4
Les roches métamorphiques .....	4
Les roches plutoniques.....	4
Les roches volcaniques.....	6
Les roches sédimentaires .....	7
4. Le climat .....	7
Les températures.....	8
Les précipitations .....	8
Les vents .....	8
Evaporation et bilan hydrique.....	8
Conclusion : influence du climat sur le milieu physique.....	9
5. Végétation, occupation du sol - Economie.....	9
Végétation, occupation du sol .....	9
Economie.....	10
6. Les sols de la région : données cartographiques et agronomiques disponibles .....	11
6.1 Les cartes des sols au 1/1 000 000.....	11
6.2 Etudes effectuées par des organismes régionaux .....	11
6.2.1. Les Sols sur Basaltes.....	12
6.2.2. Les Sols sur Granite.....	12
Conclusion.....	12
<b>Chapitre II</b>	
<b>Analyse bibliographique :</b>	
<b>les caractères généraux des séquences associant les andosols à d'autres types</b>	
<b>de sols, dans le Massif Central Français .....</b>	<b>13</b>
1. Les facteurs principaux de l'andosolisation en régions tempérées .....	13
Les conditions pédoclimatiques.....	13
Les caractères physiques et chimiques de la roche-mère.....	13
Le facteur temps : l'âge des matériaux et la durée de la pédogenèse.....	13
2. Lithoséquences.....	14
2.1 Sols à propriétés andiques sur roches volcaniques basiques - Sols bruns acides sur roches pauvres en bases, acides (granites ou roches métamorphiques).....	14
2.2 Séquence Andosols - Sols podzoliques sur roches volcaniques respectivement basiques et acides .....	14
3. Séquences altitudinales.....	15
3.1 Sur roches volcaniques basiques .....	15
3.2 Sur roches volcaniques acides.....	15
4. Chronoséquences .....	15
L'âge des matériaux .....	15
La durée de la pédogenèse .....	16
5. Conclusion.....	16
<b>Chapitre III</b>	
<b>Approche macromorphologique</b>	
<b>Séquences et volumes de référence .....</b>	<b>17</b>
Introduction.....	17
1. Séquence Puech Roux.....	17
1.1. Description macromorphologique des volumes.....	18
1.2. Agencement des volumes.....	25
1.3. Synthèse et conclusion.....	30

Un domaine amont de rankers andiques.....	30
Un domaine aval de sols bruns acides.....	30
Une lithoséquence.....	31
Séquence représentative des sites de coexistence sols andiques - sols bruns acides.....	31
2. Séquence Puech Montarqué.....	31
2.1. Description macro-morphologique des volumes.....	32
2.2. Agencement des volumes.....	38
2.2.1 Agencement vertical des volumes.....	38
2.2.2 Agencement latéral des volumes.....	40
2.3. Synthèse et Conclusion.....	40
Sols exclusivement à caractères andiques : du "Ranker andique" à l'"Andosol".....	40
Sols représentatifs de l'Aubrac volcanique.....	41
3. Conclusion du chapitre III.....	41
3.1 Synthèse des deux séquences étudiées : Puech Roux et Puech Montarqué .....	41
3.2 Premiers éléments de comparaison entre sols andiques et sols bruns acides.....	45
Convergence.....	45
Divergence.....	45
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Données physico-chimiques et minéralogiques.....</b>	<b>47</b>
Introduction.....	47
1. Matière organique et granulométrie.....	47
1.1. La matière organique.....	47
1.2. Granulométrie.....	48
1.2.1 Comparaison des spectres granulométriques obtenus sur échantillons maintenus humides et sur échantillons séchés à l'air.....	49
1.2.1.2 Résultats.....	49
1.1.1.2 Discussion.....	49
1.2.2. Les profils granulométriques des sols andiques et du sol brun acide sur sol conservé frais.....	53
2. Analyse des constituants.....	53
2.1. Analyses Totales.....	54
2.1.1 Sols Andiques.....	54
2.1.1.1 L'Andosol.....	54
2.1.1.2 Le ranker andique.....	54
2.1.2 Sol Brun Acide.....	55
2.2 Identification des constituants minéraux cristallisés aux rayons X (fraction < 2 µm).....	55
2.2.1 Le sol brun acide.....	55
2.3.1.1 Nature des minéraux.....	59
2.2.1.2 L'évolution verticale.....	59
2.3.1.3 Origine et genèse des minéraux argileux de ce sol brun acide.....	61
2.2.2. Les sols andiques.....	62
2.3.2.1 Identification et évolution des minéraux cristallisés (fraction < 2 µm).....	62
2.3.2.2 Origine et évolution des minéraux.....	68
2.3.2.3 Conclusions.....	69
2.3. Etudes des formes de l'aluminium, du fer et du silicium par la méthode des extractions sélectives.....	70
2.3.1 Méthode.....	70
2.3.1.1. Réactifs utilisés et leur action.....	70
2.3.1.2. Estimation du pourcentage d'"allophanes s.l." ("aluminosilicates à organisation cristalline à courte distance").....	72
2.3.2. Résultats.....	73
2.3.2.1 Dans les Sols Andiques.....	73
2.3.2.2 Dans le Sol Brun Acide.....	78
2.3.3. Conclusion.....	79
3. Données physico-chimiques.....	80
3.1. pHH <sub>2</sub> O, pHKCl.....	80

3.1.1	Variation des valeurs du pH selon le mode de préparation de l'échantillon .....	80
3.1.2	Les valeurs du pH et leur évolution verticale dans les sols andiques et le sol brun acide.....	80
3.2	La capacité d'échange et les cations échangeables .....	82
3.2.1	La capacité d'échange cationique.....	82
3.2.1.1	Variation de la capacité d'échange cationique en fonction du pH .....	82
3.2.1.2	La capacité d'échange mesurée au pH du sol.....	84
3.2.2	Cations échangeables.....	85
3.3	pH NaF.....	85
3.4	Capacité de rétention du phosphore (méthode Blackmore) .....	88
3.5	Mesures physiques.....	90
3.5.1	Densité de solide.....	90
3.5.2	Densité apparente et proportions relatives des volumes de solide, d'eau et d'air mesurés au champ sur chaque horizon .....	90
4.	Synthèse et conclusion .....	93
<b>Chapitre V</b>		
<b>Analyse microscopique.....</b>		
	Introduction.....	95
1.	Méthodes et techniques utilisées - Echantillonnage.....	95
2.	L'organisation pour les horizons de l'andosol.....	96
2.1.	L'horizon microagrégé AN3.....	96
2.1.1	Les agrégats élémentaires .....	97
2.1.1.1	Le microagrégat. ....	97
2.1.1.2	Le "micropolyèdre " et/ou "pellet" .....	97
Le Pellet .....	97	
Le micro-polyèdre dense .....	97	
2.1.2	Les types d'assemblages des agrégats élémentaires.....	106
2.1.2.1	Assemblages de microagrégats : type A1, type A2 et type A3 .....	106
1)	Assemblage de type A1 : microagrégé en arrangement très lâche .....	106
2)	Assemblage de type A2 : microagrégé en arrangement lâche .....	106
3)	Assemblage de type A3 : microagrégé en arrangement dense et très dense .....	106
2.1.2.2	Assemblage de pellets : type A4.....	106
2.1.3.	Synthèse et Conclusion .....	107
2.2	L'évolution verticale des organisations dans l'Andosol .....	107
2.2.1	De l'horizon microagrégé aux horizons sous-jacents.....	107
2.2.1.1	Le volume AN4.....	107
2.2.1.2	Les volumes profonds AN5 et AN6 .....	108
1)	Le volume AN5.....	108
2)	Le volume AN6.....	109
2.2.2	De l'horizon microagrégé aux horizons de surface.....	110
2.2.2.1	Le volume AN2.....	110
2.2.2.2	Le volume superficiel AN1 .....	110
2.3.	Synthèse et conclusion sur l'organisation des horizons de l'andosol .....	110
3.	L'organisation dans les volumes du sol brun acide.....	111
3.1.	Le volume microagrégé BA3 .....	111
3.1.1	Les agrégats de base .....	112
3.1.1.1	Le microagrégat .....	112
3.1.1.2	Les polyèdres denses .....	112
1)	Polyèdres denses anguleux délimités par des fissures rectilignes.....	112
2)	Polyèdres denses sub-arrondis.....	112
3.1.2.	Les types d'assemblages des agrégats élémentaires.....	113
3.1.2.1	Assemblages de microagrégats .....	113
1)	Assemblage de type B1 : microagrégé en arrangement lâche, domaines nettement microagrégés.....	113

2) Assemblage de type B2 : microagrégé en arrangement serré ou "polyèdres peu nets poreux"	113
3.1.2.2 Assemblages de polyèdres denses	113
1) Assemblages de type B3 : assemblage de polyèdres anguleux denses	113
2) Assemblages de type B4 : en polyèdres sub-arrondis	114
3.1.3 Synthèse et Conclusion	114
3.2. Evolution verticale des organisations dans le sol Brun Acide	115
3.2.1 De l'horizon microagrégé aux horizons sous-jacents (BA4, BA5, BA6)	115
3.2.2.1 Le volume BA4	115
3.2.2.2. Les volumes profonds BA5, BA6	115
3.2.2 De l'horizon microagrégé aux horizons de surface (BA2 et BA1)	116
3.2.2.1.le volume BA2 : densification des structures	116
3.2.1.2 Le volume BA1 : place croissante de la biologie	117
3. 3. Synthèse et conclusion sur le sol Brun Acide	117
4. Synthèse et Comparaison des grands traits différenciant ou rapprochant les organisations des deux types de sol	118
4.1. Au niveau de l'unité structurale: le microagrégat	118
4.1.1 Taille	118
4.1.2 Assemblages des microagrégats et porosité associée	118
4.1.3 Structure interne du microagrégat	119
4.2 Au niveau de l'ensemble de l'organisation des volumes microagrégés	119
4.3. Au niveau de l'évolution verticale des structures au sein de chaque type de sol par rapport au volume microagrégé	119
4.3.1 Evolution vers le haut	119
4.3.2 Evolution vers le bas	120
<b>Chapitre VI</b>	
<b>Analyse du spectre poral par la porosimétrie à mercure</b>	121
1. Méthode et mode de présentation des résultats	121
1.1 Méthode	121
Principe	121
Echantillonnage et conditions de réalisation des mesures	121
1.2 Mode de présentation des résultats	122
1.3 Avantages et limites de cette technique	123
2. Analyse du spectre poral dans les deux types de sols	123
2.1 Grands traits distinctifs des sols andiques et du sol brun acide	123
2.1.1 Le volume poral total	123
2.1.2 L'allure du spectre poral, la répartition du volume poral	123
2.2. Comparaison des volumes les plus microagrégés des deux types de sol	130
2.2.1 La classe 1 : porosité inter-agrégat	130
2.2.2 La classe 2 : porosité intra-agrégats	130
2.2.3 La classe 3 : porosité liée aux particules élémentaires de la taille des argiles	130
2.3. Evolution verticale du spectre poral au sein des 2 types de sol	132
2.3.1 Dans l'andosol	132
2.3.2 Dans les rankers andiques	133
2.3.3 Dans le sol brun acide	134
3. Conclusion	135
<b>Chapitre VII</b>	
<b>Etude du comportement physico-hydrique</b>	137
Introduction	137
1. Méthode	137
Principe	137
Forme de l'échantillon	139
Mise à l'équilibre avec une contrainte hydrique donnée	139
Mesures	139
Présentation des résultats	140
Mesures complémentaires effectuées	140

2. Profils porosimétriques.....	140
2.1 Méthode : construction du profil porosimétrique.....	140
2.2 La porosité totale : valeurs comparées et évolution verticale pour les 2 types de sol.....	142
2.3 Evolution verticale des composantes de la porosité totale au sein de chaque type de sol.....	142
2.3.1 Dans l'andosol.....	142
2.3.2 Dans le sol Brun Acide.....	143
2.4 Conclusion.....	143
3. Caractérisation et évolution verticale des courbes de retrait et des courbes de rétention en eau au sein de chaque profil.....	144
3.1. Courbes de retrait.....	144
3.1.1 Les courbes de retrait pour les horizons de l'andosol.....	145
3.1.1.1 Résultats.....	145
1) Les horizons inférieurs AN6, AN5, AN4.....	145
2) Les horizons AN3 et AN2.....	145
3) L'horizon superficiel AN1.....	150
3.1.1.2 Interprétation du comportement aux faibles pF des 3 horizons supérieurs (AN3 à AN1)- Courbe de retrait lors de l'hydratation de pF1 à pF0,5.....	150
Premier cas : Retrait lors de l'hydratation : cas de AN3 et AN2.....	151
Deuxième cas : Gonflement "normal" lors de l'hydratation (cas de AN1 et de K1).....	151
3.1.2 Courbes de retrait dans le sol brun acide.....	151
1) Les horizons profonds BA6 et BA5.....	152
2) Les horizons intermédiaires BA4 et BA3.....	152
3) L'horizon de subsurface BA2.....	152
4) L'horizon superficiel BA1.....	153
3.2 Les courbes de rétention et la saturation aux faibles pF pour les sols andiques et les sols bruns acides.....	153
3.2.1 Résultats.....	153
3.2.1.1 Les courbes de rétention d'eau et la saturation aux faibles pF dans l'andosol (Résultats).....	153
1) Taux de saturation à pF1 et volume d'eau extrait de pF1 à pF3.....	153
2) Volume d'eau extrait au dessus de pF3.....	155
3.2.1.2 Les courbes de rétention d'eau et le taux de saturation à pF1 dans le sol brun acide.....	155
1) Le volume d'air à pF1 et le volume d'eau extrait de pF1 à pF3.....	156
2) Le volume d'eau extrait de pF3 à pF6,6.....	156
3.2.2. Les courbes de rétention d'eau : Discussion et interprétation.....	156
3.2.2.1 Interprétation des courbes de rétention d'eau pour l'andosol.....	157
1) Evolution de la porosité de $R_c > 1,5 \mu\text{m}$ : porosité inter-agrégat et porosité grossière, dans l'andosol.....	157
2) Evolution de la porosité fine et ultra-fine de $R_c$ inférieur à $1,5 \mu\text{m}$ dans l'andosol.....	157
3.2.2.2 Interprétation des courbes de rétention d'eau pour le sol brun acide.....	157
1) Evolution de la porosité de $R_c > 1,5 \mu\text{m}$ : porosité inter-agrégat et porosité grossière dans le sol brun acide.....	157
2) Porosité fine de $R_c$ inférieur à $1,5 \mu\text{m}$ ( $pF > 3$ ) dans le sol Brun Acide.....	158
3.2.3 Relation entre la teneur en eau à pF4,2 et les caractéristiques concernant les particules élémentaires les plus fines (de la taille des argiles).....	158
4. Synthèse et conclusion.....	160

<b>Comparaison des résultats de porosimétrie à mercure et du comportement physicohydraulique</b>	
<b>Relation avec l'organisation</b> .....	165
1. Mode de représentation et exemples d'interprétation .....	165
Trois exemples de représentation et d'interprétation.....	165
° Premier exemple : cas d'un matériau à espace poral rigide : la craie .....	167
° Deuxième exemple : cas d'un matériau à espace poral en partie idéalement déformable : l'Illite Na.....	167
° Troisième exemple : cas d'un matériau à espace poral en partie idéalement déformable, en partie apparemment rigide : échantillon micrométrique de la Terre d'Aubues .....	167
° Conclusion sur ces trois exemples .....	168
2. Résultats et interprétation.....	168
2.1 Cas des échantillons de l'Andosol .....	169
2.1.1 Cas de l'horizon microagrégé AN3 .....	169
2.1.2 Les autres horizons des sols andiques.....	173
2.1.3 Résumé et conclusion pour les sols andiques.....	176
2.2 Cas des échantillons du sol brun acide .....	177
2.2.1 Caractérisation du volume microagrégé BA3 .....	177
2.2.2 Les autres horizons du sol Brun Acide.....	179
3.Synthèse et conclusion .....	181
<b>Conclusion générale</b> .....	185
<b>Bibliographie</b> .....	187
<b>Liste des annexes</b> .....	I
<b>Annexes</b> .....	II
<b>Liste des figures et tableaux</b> .....	XV
<b>Table des matières</b> .....	XIV

## Résumé

L'étude de l'organisation et du comportement physico-hydrique de deux sols à structure microagrégée : sols andiques et sols bruns acides est menée à partir de caractérisations morphologiques et physiques. Ces sols couvrent une superficie importante dans le Massif Central.

Les méthodes mises en oeuvre, quelles soient morphologiques (observations macroscopiques, microscopiques), analytiques (analyses physico-chimiques) ou physico-hydriques (porosimétrie à mercure, courbes de rétention d'eau et courbes de retrait), permettent une comparaison de ces deux types de sol et en particulier de leurs horizons les plus nettement microagrégés. Cette étude permet de mieux connaître le jeu des constituants et des organisations sur le comportement physico-hydrique des sols.

Une reconnaissance de terrain montre que les deux types de sols coexistent sur une courte distance le long de lithoséquences, aux interfaces entre socle primaire (granite) et coulées volcaniques plus récentes. 14 volumes pédologiques sont décrits et échantillonnés sur trois verticales. Ils sont représentatifs des sols bruns acides, des rankers andiques et des andosols de la région. Après une caractérisation physico-chimique classique, une étude plus détaillée des constituants par dissolutions sélectives et analyses de rayons X, montre que dans les sols andiques ces constituants sont mal cristallisés, composés par une forte quantité de complexes organiques et caractérisés par l'abondance de l'aluminium amorphe, plutôt que par la quantité de minéraux allophaniques. Les fractions fines des sols bruns acides sont constituées d'un mélange kaolinite - argiles micacées et intergrades alumineux.

Différents types d'assemblages sont décrits au microscope, notamment pour les horizons les plus microagrégés. Ils sont à base de microagrégats en arrangement plus ou moins lâche dans l'andosol, tandis qu'ils sont constitués d'une association de polyèdres et de microagrégats dans le sol brun acide. Par ailleurs, les microagrégats sont plus fins et la porosité inter-agrégats est plus développée dans l'andosol. L'évolution verticale des structures est marquée par un caractère plus dense dans les horizons profonds et l'intervention de la biologie vers la surface, mais selon des modalités différentes dans les 2 types de sol.

Le volume poral est deux fois plus important dans l'andosol. Sa distribution analysée par porosimétrie à mercure montre que, sur échantillon déshydraté, l'espace poral est essentiellement constitué par une classe de pores inter-agrégats dans l'horizon microagrégé de l'andosol, alors qu'il est réparti également en pores inter-agrégats et intra-agrégats dans le sol brun acide. L'évolution verticale du spectre poral selon les horizons de l'andosol est nette et bien corrélée avec les structures caractérisées. Elle est peu marquée dans le sol brun acide.

Aux faibles contraintes hydriques, l'extraction d'eau est reliée à la structure, aux différents types d'assemblage d'agrégats mis en évidence. Aux fortes contraintes hydriques, la rétention d'eau est bien corrélée avec la quantité et la nature des constituants appréhendée par la capacité d'échange cationique.

C'est la comparaison des résultats issus de la porosimétrie et de ceux issus des courbes de rétention et des courbes de retrait qui permet de discuter la dynamique de l'organisation. Pour l'andosol, la porosité de l'horizon microagrégé apparaît déformable dès les faibles contraintes hydriques. Pour l'horizon microagrégé du sol brun acide, alors que la courbe de retrait traduit un comportement apparemment rigide, des déformations du système poral sont mises en évidence avec notamment une réorganisation des particules élémentaires et l'apparition de pores plus grossiers aux plus fortes contraintes hydriques.

**Mots-clés:** *Massif Central, Sols Bruns Acides, Sols Andiques, Structure microagrégée, Espace poral, Rétention d'eau, Retrait/gonflement, Porosimétrie à mercure, Microscopie, Dissolutions sélectives.*

Christine LASSAUSSE

*Thesis of University Paris VI in Soil Science*

---

**Comparison between the organization and the physical behaviour of two soils with microgranular structure: an andic soil and an acid brown soil in the Massif Central (France).**

---

Two soils with microgranular structure (fluffy), an andic soil and an acid brown soil, have been studied from a morphological and a physical point of view. The site was located in the Massif Central (France) where these two soils are commonly found.

The soil comparison is based on morphological, analytical, and physical methods. Comparison of microaggregate horizons is emphasized. The main point was to underline the specific role of the material (texture and mineralogy) and the structure (porosity and pedality) on the physical behaviour (shrinkage curve and water retention curve).

A field survey shows that both types of soils coexist over a short distance along lithosequences between granite and more recent volcanic flows. 14 pedological volumes have been described and sampled on 3 soil profiles; they correspond to the acid brown soils, the andic rankers and the andisols of this region. Following a physicochemical analysis, a more detailed study of the constituents by selective dissolution and X Ray diffraction shows poor constituent crystallinity in the andisols; they contain large quantities of organic complexes, characterised more by amorphous aluminium content than by allophanic mineral content. The clay fraction in the acid brown soils is a mixture of kaolinite, micaceous clay and aluminous intergrades.

Different types of organizations are described under microscope, especially for the most microgranular horizons. They are mainly made up of microaggregates more or less loosely bonded in the andisol and made up of an association of polyedric peds and microaggregates in the acid brown soil. Moreover, the microaggregates are finer and inter-aggregate porosity is more developed in the andisol. The structure changes along the profile with more massive structure at the bottom and biological features at the top; each of the two soils has a different vertical evolution.

The pore volume is twice as large in the andisol. Hg porosimetry analysis of pore size distribution shows that, on air-dried samples, porosity is mainly made up of inter-aggregate pores in the microaggregate horizon of the andisol, whereas inter and intra-aggregate pores are equally distributed in the acid brown soil. There is a clear vertical evolution of pore size distribution which clearly correlates with the identified structures in the andisol. In the acid brown soil, this vertical evolution barely appears.

At low suction range, extraction of water depends on the soil structure and the arrangements of the identified aggregates. At high suction range, water retention clearly correlates with the quantity and the type of the clay fraction characterized by their CEC.

Discussion of structure dynamics is based on the comparison of Hg porosimetry, retention curves and shrinkage curves results. For the andisol, the porosity of the microgranular horizon changes even at low suctions. For the acid brown soil, the shrinkage curves show an apparently rigid behaviour, but some deformations of the pore system appear mainly at high suction, with a reorganization of elementary components which induce development of large pores.

**Key Words:** *Massif Central, Acid brown soils, Andic soils, Microgranular Structure, Porosity, Water retention curves, shrinkage curves, Hg porosimetry, Microscopy, Selective dissolutions*