

Facteurs biotiques et mécanismes de lessivage particulaire dans les sols

L'exemple des toposéquences caractéristiques des Andes de Colombie

Pierre Faivre⁽¹⁾ et Clara Chamarro⁽²⁾

1 : Université de Savoie - CISM - 73376 - Le Bourget du lac - France

2 : Universidad nacional - Bogota - Colombie

RÉSUMÉ

L'étude des clima-topo-séquences pédologiques développées sur cendres volcaniques et caractéristiques des milieux intrandins montre que le lessivage du complexe argilo-humique s'accroît progressivement d'amont vers l'aval, c'est à dire des régions humides vers les régions sèches, entraînant une différenciation progressive des profils.

La comparaison analytique et expérimentale du terme occupant la partie médiane des séquences (Brunizem) moyennement lessivé avec celui situé le plus à l'aval qui l'est au contraire très fortement (Planosol) permet de conclure que les variations morphologiques observées ne sont pas liées à un changement de nature et de comportement du complexe argilo-humique susceptible d'être lessivé : même type d'argile, l'halloysite, associé à une fraction organique fortement humifiée formant un ensemble hautement dispersable donc lessivable.

Ces différences s'expliquent davantage par le facteur biotique lié étroitement aux variations d'humidité et à ses effets sur l'organisation structurale des sols :

- Présence d'une macrofaune beaucoup plus importante et active dans le Brunizem que dans le planosol dont l'effet est double : a) homogénéisation du profil qui annule au moins partiellement l'effet des migrations particulières, b) régénération perpétuelle d'une structure grumeleuse qui maintient les particules susceptibles d'être lessivées au sein d'agrégats les soustrayant ainsi à l'action du lessivage.
- Matière organique plus riche en biomolécules dans l'horizon superficiel du Brunizem conjugant son action à celle de la mésofaune pour exercer une action favorable sur la structuration du sol.

Ces effets disparaissent dans la région sèche occupée par les Planosols. Les particules peuvent alors exprimer pleinement leur capacité à la dispersion et à la migration.

Mots clés

Sols lessivés, lessivage, sols volcaniques, sols tropicaux, structure du sol, Andes, Colombie, faune du sol.



SUMMARY

TITRE ANGLAIS

The study of pedological clima-topo-sequences developed on volcanic ashes typical of the inner parts of Andes shows that the lixiviation of humic-clay complex increases progressively uphill to downhill, that is to say from humid regions to dry regions, progressively

carrying along a differentiation of profiles.

Analytical and experimental comparison of the moderately lixiviated term occupying the middle part of the sequences (Brunizem, PI 1, ph.1) with the lixiviated one which is situated the most downhill (Planosol, PI 2, ph.3) allows us to conclude that observed morphological variations are not due to a change of composition or behaviour of the humic-clay complex able to be lixiviated: same type of clay, halloysite, associated to a high-humified organic fraction, forming an easy to disperse then to lixiviate complex.

These differences can better be explained by a biotic factor (Tab. 4), highly bound to the variations of humidity (Fig 8) and its effects on the structural organization of soils (PI 2, ph 1 to 4 - Tab 3) :

-Presence of a higher and more active macrofauna (Fig. 9) in the Brunizem than in the Planosol, with a double effect a) homogenization of the profile which cancels at least partly the effect of migrations of particles. b) permanent maintenance of a granular structure which keeps likely to be lixiviated particles into aggregates protecting them from lixiviation

- The organic material is richer in biomolecules in the upper horizon of Brunizem, joining its action to mesofauna to play a favourable role on the soil structure;

These effects disappear in the dry region occupied by the planosols, particles can then fully express their ability to dispersion and migration.

Key-words

Alfisol, lixiviation, volcanic soils, tropical soils, Andes mountains, Colombia, soil fauna.

Le rôle du facteur biotique et plus particulièrement de la macrofaune sur l'évolution de certaines propriétés physiques ou chimiques des divers compartiments des sols est bien connu (Bouche, 1971 - Duchaufour, 1977 - Toutain, 1984 - Rafidison, 1982 - Garnier-Sillam *et al*, 1988- Bachelier 1978 - Lavelle *et al*, 1992 et 1994). Il peut également avoir des effets beaucoup plus globaux sur la dynamique des profils pédologiques et l'acquisition de leurs caractères morphologiques (Eschenbrenner, 1986). Il joue, entre autre, un rôle important dans le contrôle des transferts particuliers des produits minéraux ou organo-minéraux. Son effet antagonique des processus de lessivage a été notamment reconnu (Høeksema et Edelman, 1960 - Hole, 1981:

ζ soit directement, par brassage des horizons et remontée des particules entraînées en suspension,

ζ soit indirectement, grâce à un ensemble de phénomènes qui s'opposent à la mise en suspension et au transport des produits potentiellement dispersables, par exemple en jouant un rôle mécanique dans la formation d'agrégats, ou de façon plus complexe en provoquant des apports à proximité de la surface d'éléments chimiques qui favorisent le maintien à l'état floclulé des éléments colloïdaux.

Cette double action, directe et indirecte, sur les mécanismes gouvernant le lessivage est bien illustrée dans les couvertures pédologiques qui caractérisent de nombreux versants de la région interne des Andes de Colombie. Il y existe des variations à courte distance qui opposent des volumes for-

tement lessivés à d'autres qui le sont beaucoup moins. C'est l'explication de ces contrastes dans l'intensité des redistributions particulières qui est tentée ici grâce à une démarche essentiellement comparative.

LE MILIEU ET LES SOLS

Répartition et organisation des séquences pédologiques

Les rapides variations climatiques qui se succèdent dans le vaste espace «intrandin» colombien peuvent être mises en relation avec l'existence d'une organisation particulière de la couverture pédologique caractérisée par des climatoposéquences qui se répètent d'un compartiment à l'autre du massif (vallées ou bassins internes) indépendamment de l'altitude absolue de chacun d'eux.

Sur les versants bordant ces accidents les vents locaux résultant d'effets foehniques ou de courants de convection induisent de très fortes variations climatiques qui opposent les régions hautes toujours humides, souvent brumeuses, à celles occupant le bas des pentes ainsi que les fonds de vallées qui sont soumis à des conditions climatiques beaucoup plus sèches et ensoleillées. Ainsi s'établit un gradient d'humidité décroissant de l'amont vers l'aval.

Ces variations climatiques se traduisent fortement au

niveau du paysage végétal. Les hauts de pentes sont occupés par des forêts très humides, dites forêts subandines (de 1 000 à 2 300-2 500 m) puis andines (jusque vers 3 200-3 500m) (Cuatrecasas, 1958). Le fond des dépressions et le bas des versants sont au contraire caractérisés par une végétation naturelle beaucoup plus ouverte : steppes de graminées parsemées d'arbres et arbustes adaptés aux conditions de sécheresse. Au niveau de l'étage andin la végétation forestière semble avoir toujours été absente au cours des derniers millénaires des régions qui bénéficient à l'époque actuelle d'un climat xérique (Guillet *et al.*, 1988).

Les volcans qui dominent l'ensemble du massif andin ont recouvert ces versants d'épais dépôts pyroclastiques généralement de nature daciadésitique à partir desquels s'est développée la couverture pédologique.

Le domaine amont où les conditions pédoclimatiques sont caractérisées par une absence de déficits hydriques ou par de très courtes périodes de sécheresse qui n'affectent même pas l'ensemble du profil (régimes de type PERUDIC à UDIC-U.S.D.A., 1975) correspond à celui des sols présentant des profils non ou très peu différenciés mais à forts caractères humifères : Andosols (DYSTRANDEPTS) relayés vers l'aval par des sols bruns plus ou moins andiques et possédant fréquemment un horizon de type SOMBRIQUE : SOMBRITROPEPTS voire SOMBRIHUMULTS (U.S.D.A., 1975).

Le domaine aval dans lequel les effets des époques de sécheresse sont de plus en plus accentués lorsque l'altitude diminue (régime d'humidité passant rapidement d'un type UDIC à USTIC ; U.S.D.A., 1975), est celui des sols ayant perdu tout caractère andique mais marqués par des redistributions particulières organo-argileuses, d'abord modérées immédiatement en aval des sols bruns où apparaissent des profils de type Brunizems (Frei, 1964) (ARGIUDOLLS, ARGJUSTOLLS), qui s'accroissent ensuite très fortement donnant origine à des Planosols (FAO-UNESCO, 1975) eutriques ou solodiques (HAPLUSTALFS, NATRUSTALFS). Tous ces sols se caractérisent par des horizons d'accumulation «argiliques» (U.S.D.A., 1975) qui possèdent une couleur noire en raison de l'existence d'épais organo-ferri-argilanes eux-mêmes très noirs qui recouvrent de façon plus ou moins continue la surface des éléments structuraux.

Mais même au sein de ce dernier domaine les processus de lessivage et de redistribution particulaire sont loin d'avoir la même intensité entre ces deux types de sols malgré leur proximité géographique (quelques hectomètres) et de nombreuses caractéristiques, qui restent pratiquement constantes notamment un cortège minéralogique.

Profils de références

A la suite d'un vaste échantillonnage qui a porté sur l'ensemble du massif (Fraivre, 1988) deux profils, un Brunizem et

un Planosol, sélectionnés dans la région de Bogota (vers 2 600 m d'altitude) ont fait l'objet d'une série d'études plus approfondies.

Aspects morphologiques et micromorphologiques

Brunizems (Photo 1, planche 1)

Dans cette région ce type de sol occupe généralement une frange altitudinale située approximativement entre 2 700 et 2 800 m. La végétation forestière naturelle a été remplacée par une végétation buissonnante dans laquelle se détache une proportion importante d'éricacées.

L'horizon superficiel (Ah), épais de 35 cm, présente une couleur d'ensemble très foncée (Munsell : 10YR 2/1 en surface passant progressivement à N 2/0 en profondeur). La structure (Photo 2, planche 1) correspond à un mélange d'éléments fins grumeleux dans la majorité des cas, souvent identifiables comme des fragments de turricules, et polyédriques beaucoup plus minoritaires qui se situent notamment au niveau de l'enchevêtrement racinaire. En raison de cette structure construite, il rappelle certains types d'horizons molliques caractéristiques des régions à chernozems (Sandborn et Pawluk, 1989). Il correspond à un humus de type «Mull grenu épais» (Delecour, 1980) et peut répondre au concept «d'horizon vermique» (U.S.D.A., 1975).

Il n'y a pas dans ce sol d'horizon éluvial de type A2 ou E morphologiquement distinct du Ah.

L'horizon B est au contraire caractérisé par une structure de fragmentation en polyèdres moyens, bien développés dont la couleur d'ensemble est brun rougeâtre (Munsell : 5YR4/4).

Les éléments structuraux sont recouverts de façon discontinue (environ 50% de leur surface externe) par des revêtements noirs qui observés en lame mince au microscope optique polarisant après inclusion dans la résine apparaissent comme des organo-ferri-argilanes, épais de 0,5 à 1,5 mm.

Des revêtements du même type, quoique souvent plus minces, tapissent les pores particulièrement ceux de plus gros diamètres. Ces figures attestent de redistributions particulières organo-argileuses depuis l'horizon superficiel vers l'horizon B qui possède tous les caractères d'un horizon Bt «argilique» (U.S. D. A., 1975).

Un caractère commun aux horizons Ah et B est l'existence de nombreux pédotubules (Brewer, 1964). Ces figures sont produites par le remplissage de chenaux d'origine biologique. Il existe dans la grande majorité des cas une opposition de couleur très nette entre les produits constituant la garniture de ces tubules, toujours assez dense, et la matrice qui les entoure, phénomène qui atteste d'un transfert de matière entre les horizons (métatubules). Dans l'horizon Ah les pédotubules ont la couleur brun-rougeâtre caractéristique de l'horizon B, traduisant ainsi des remontées à partir de ce dernier.

Dans celui-ci, au contraire, les tubules tranchent sur la

PLANCHE 1

Photo 1 - Profil de Brunizem.

Photo 2 - Brunizem : Aspect de la microstructure de l'horizon Ah observé en lame mince.

Photo 3 - Profil de Planosol.

Photo 4 - Planosol : Aspect de la microstructure de l'horizon E.

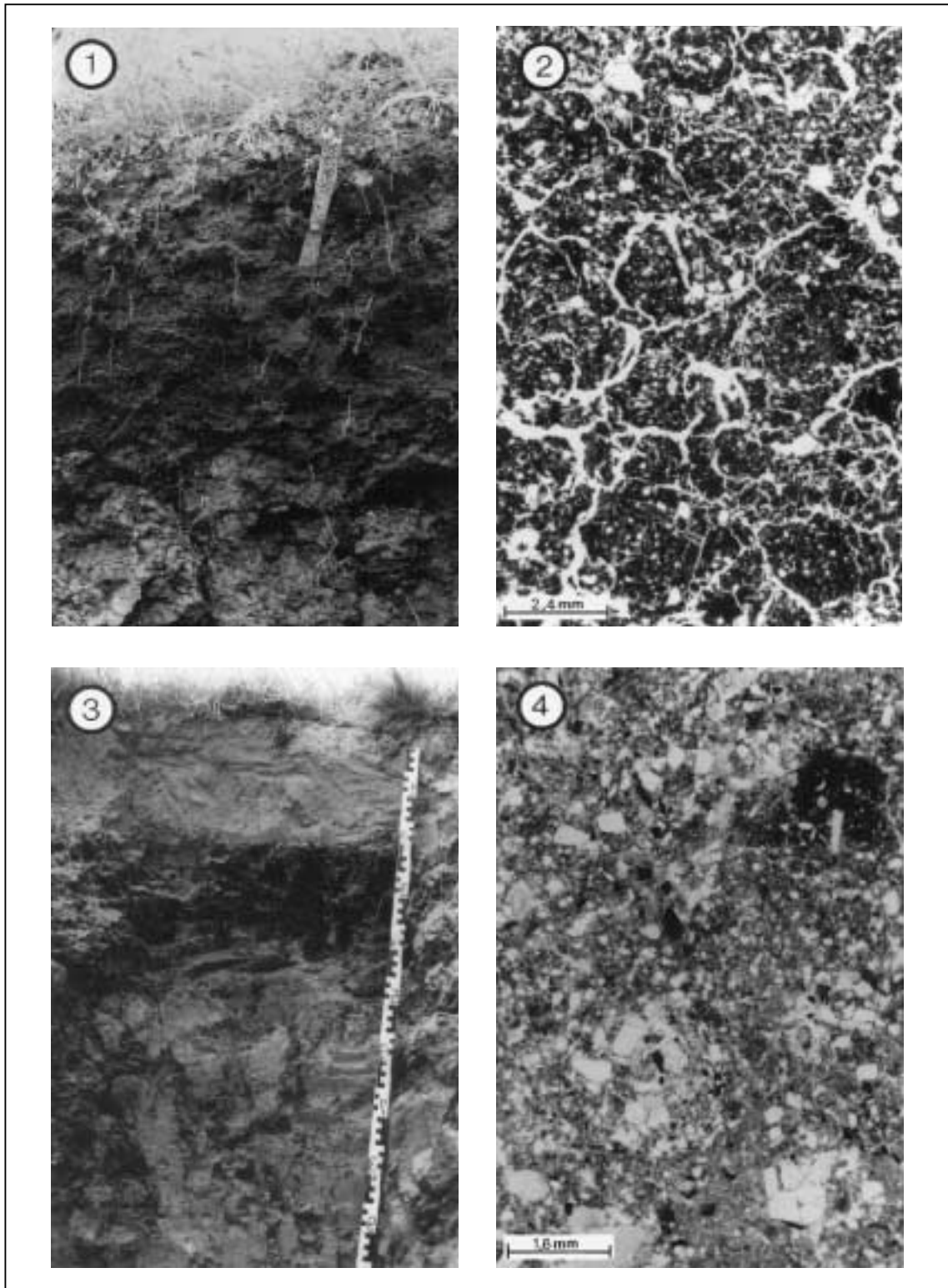


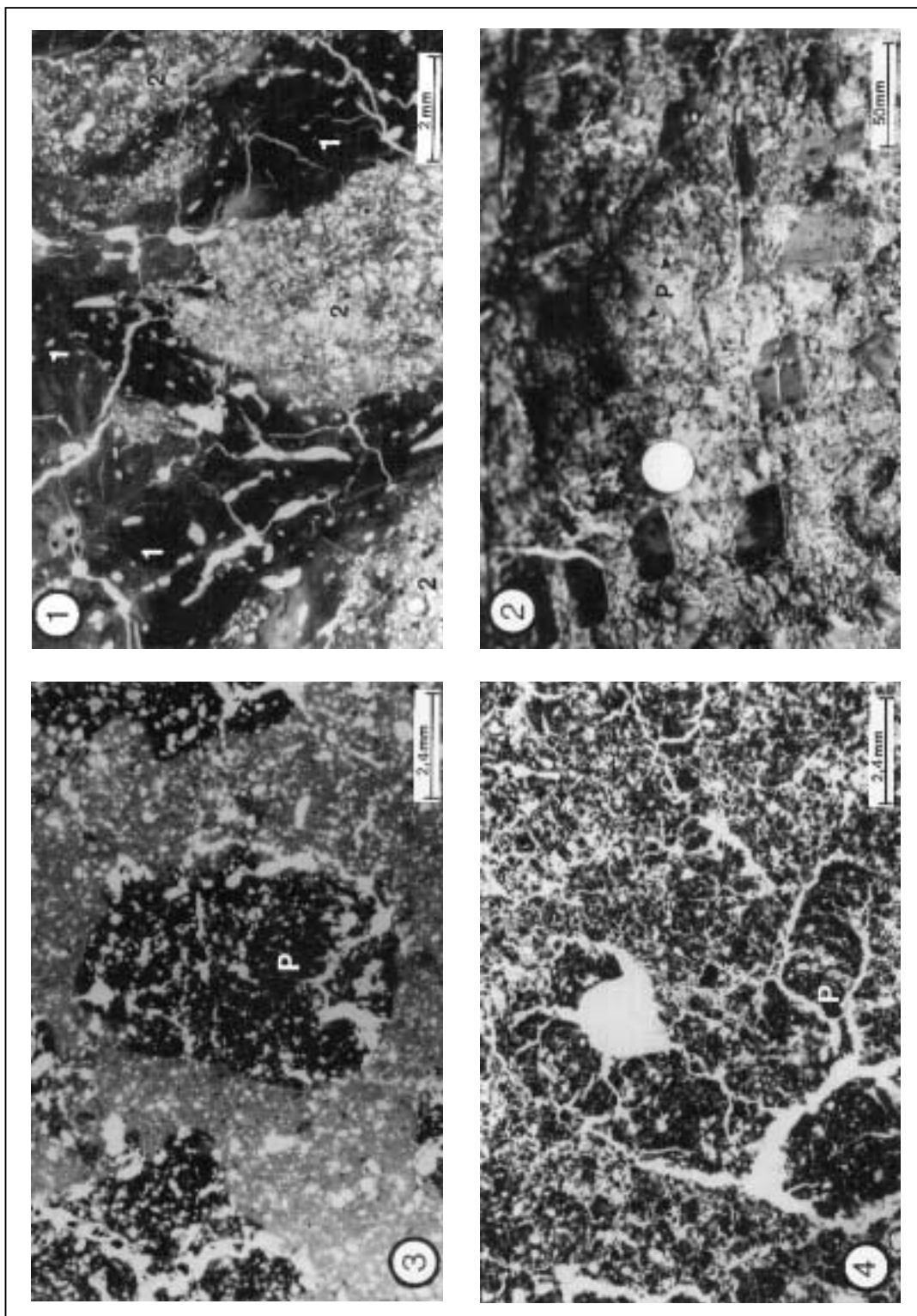
PLANCHE 2

Photo 1 - Planosol, horizon Bt : organo-ferri argilanes (1) et matrice (2).

Photo 2 - Brunizem : fréquence des pédotubules (P) situés dans la zone de transition entre horizons Ah et Bt.

Photo 3 - Brunizem : Section transversale de pédotubules situés dans la partie supérieure de l'horizon Bt. Le contraste entre matériel noir de remplissage provenant de Ah et matrice de l'horizon B apparaît clairement sur ce cliché.

Photo 4 - Brunizem : Section longitudinale d'un pédotubule (P) situé dans la zone de transition entre horizons Ah et Bt.



masse en raison d'une couleur noire qui indique un remplissage par des produits prélevés dans la couche superficielle (*Photo 3, planche 2*).

L'orientation générale de ces éléments est verticale ou sub-verticale. Ils sont particulièrement abondants sur plusieurs centimètres de chaque côté de la limite séparant horizon superficiel et horizon B (*Photo 2, planche 2*).

Leur structure interne longitudinale (*Photo 4, planche 2*) est formée par une succession d'éléments courbes soudés et grossièrement emboîtés les uns dans les autres qui peuvent être interprétés comme un remplissage plus ou moins compact et formé d'excréments tassés de vers de terre.

En section perpendiculaire à leur axe ils sont pratiquement circulaires possédant un diamètre compris entre 3 et 8 mm. Ils apparaissent comme ponctués de grains de squelette de plus petite taille que la plupart de ceux observables par ailleurs dans la préparation.

Ces figures de remplissage sont souvent elles-mêmes recouvertes par de fins dépôts de type argilanes de même nature que ceux existant à la surface des éléments structuraux ou dans les pores.

Planosols (*Photo 3, planche 1*)

Ces sols se situent entre la limite inférieure de la zone occupée par les Brunizems et le bas des versants situés dans cette région légèrement au-dessus de 2 600 m. Dans ces zones la végétation actuelle correspond généralement à un tapis de graminées utilisé en pâtures, parfois remplacé par des cultures maigres de céréales.

Bien que très rapprochés dans l'espace des précédents et marqués par le même grand processus pédogénétique, le lessivage, les planosols s'en distinguent morphologiquement sur de nombreux points :

L'horizon superficiel épais de 25 cm ne possède plus une couleur sombre mais il est au contraire très clair pratiquement blanc. Il n'y a pas en général d'horizon Ah nettement différencié.

Il se caractérise par une absence de structure ayant un aspect parfois particulière mais le plus souvent massif (*Photo 4, planche 1*). Il possède tous les caractères d'un horizon E albuque (U.S.D.A., 1975). Il est séparé par une limite abrupte et plane de l'horizon inférieur B. Un liseré plus clair que l'horizon lui même souligne assez fréquemment le contact.

L'horizon Bt beaucoup plus important (entre 80 et 100 cm) possède une structure polyédrique grossière fortement développée. Ces unités structurales sont elles-mêmes inscrites dans des prismes grossiers verticaux.

Des revêtements de couleur noire beaucoup plus épais que dans le cas précédent, atteignant plusieurs millimètres (généralement de 3 à 5), recouvrent totalement l'ensemble des agrégats polyédriques et confèrent à l'horizon cette couleur malgré une matrice jaunâtre. Au microscope ces revêtements

apparaissent comme très fortement orientés et montrent une structure complexe (*Photo 1, planche 2*). Comme dans le cas précédent il s'agit d'organo-ferri-argilanes qui attestent d'importants phénomènes illuviaux au sein de l'horizon Bt. Par contre à la différence du Brunizem précédent il n'y a pas de pédotubules, ni dans l'horizon Bt, ni dans l'horizon superficiel.

Caractères analytiques

Texture

La variation texturale verticale est importante dans les deux sols. Les taux d'argiles s'accroissent avec la profondeur (*Figure 1*) pour atteindre des valeurs pratiquement identiques dans les horizons B et à la base des profils (75%). La différence essentielle réside dans le contraste qui existe entre horizons superficiels et horizons B : l'accroissement en argile est

Figure 1 - Distribution de l'argile dans les deux profils de référence.

Figure 1 - Clay distribution in the Brunizem and Planosol.

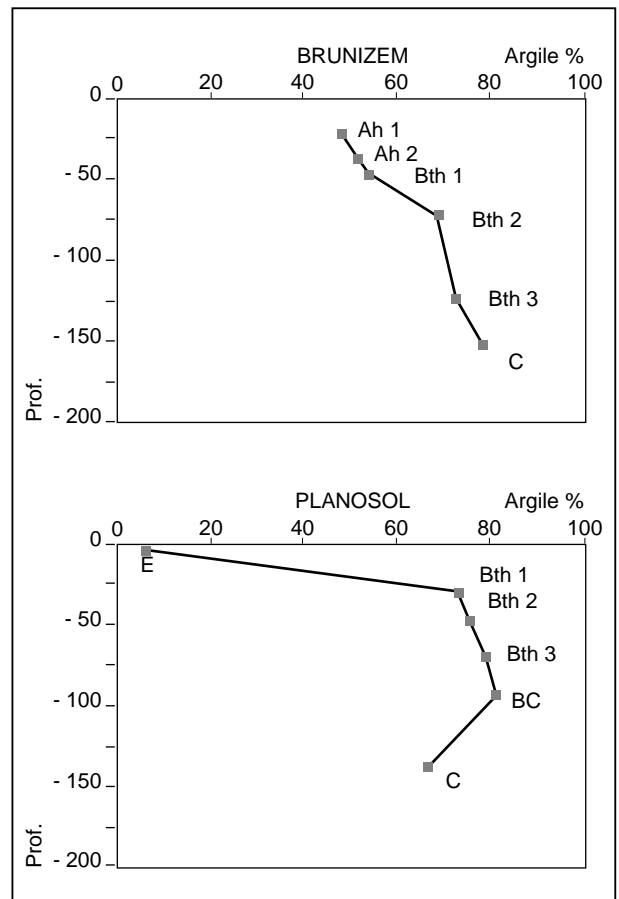


Figure 2 - Nature du cortège cationique dans les deux profils de référence.

Figure 2 - Cationic distribution in the two reference profiles.

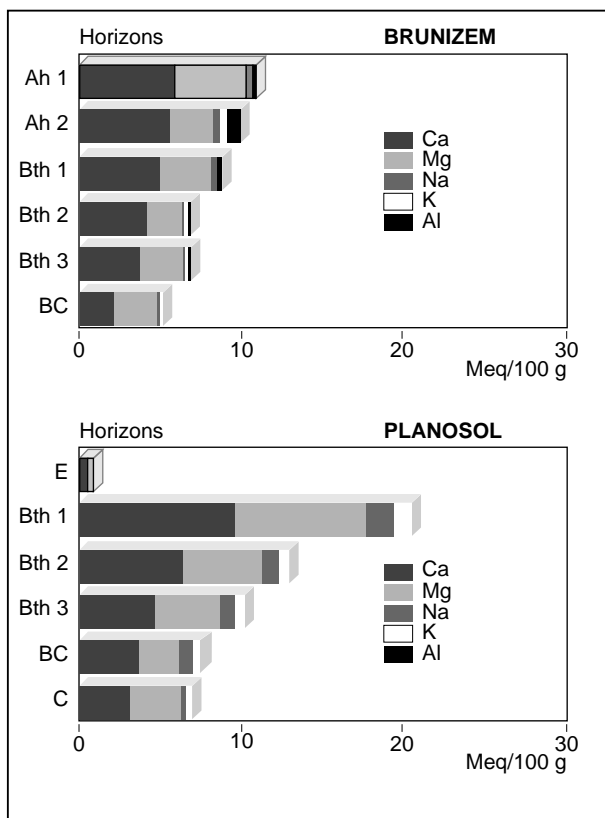
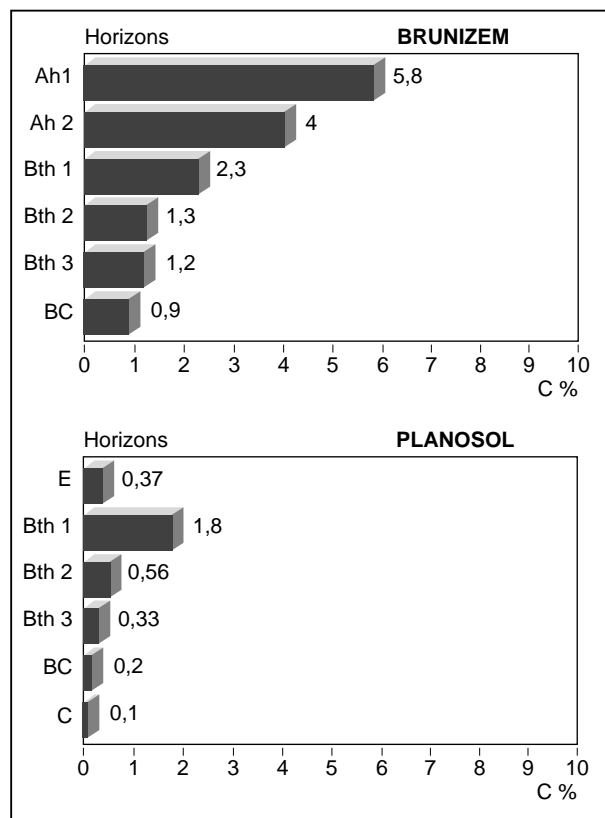


Figure 3 - Distribution du carbone dans les deux profils de référence.

Figure 3 - Carbon distribution in the two reference profiles.



modéré et progressif dans le Brunizem (48% d'argile en surface), il est au contraire très important et très brutal dans le planosol (seulement 6% d'argile dans l'horizon superficiel).

pH, capacité d'échange et garniture cationique

Les pH sont plus faibles dans les Brunizems que dans les Planosols. Dans le premier cas les valeurs dans le profil s'échelonnent entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 5,0 à 5,6 et pH_{KCl} 4,3 à 5,2 tandis que dans le second elles varient entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 5,9 à 7,1 et pH_{KCl} 4,7 à 5,5.

La capacité d'échange cationique déterminée à pH 7 par l'acétate- NH_4 est relativement élevée (de l'ordre de 20 meq/100g d'argiles). Cependant la nature du cortège argileux indique que les charges permanentes sont pratiquement inexistantes ; en conséquence la charge nette globale dépend fortement du pH. Dans ces conditions il est préférable de se référer à la capacité d'échange au pH du sol. Cette dernière peut-être estimée assez précisément en effectuant la somme

Figure 4 - Comparaison de la réserve en carbone accumulée dans les horizons A et B des deux profils de référence.

Figure 4 - Organic matter comparison between A and B horizons in the two reference profiles.

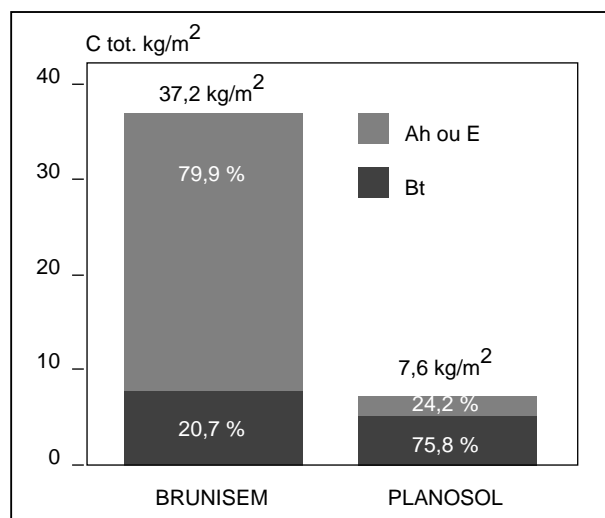
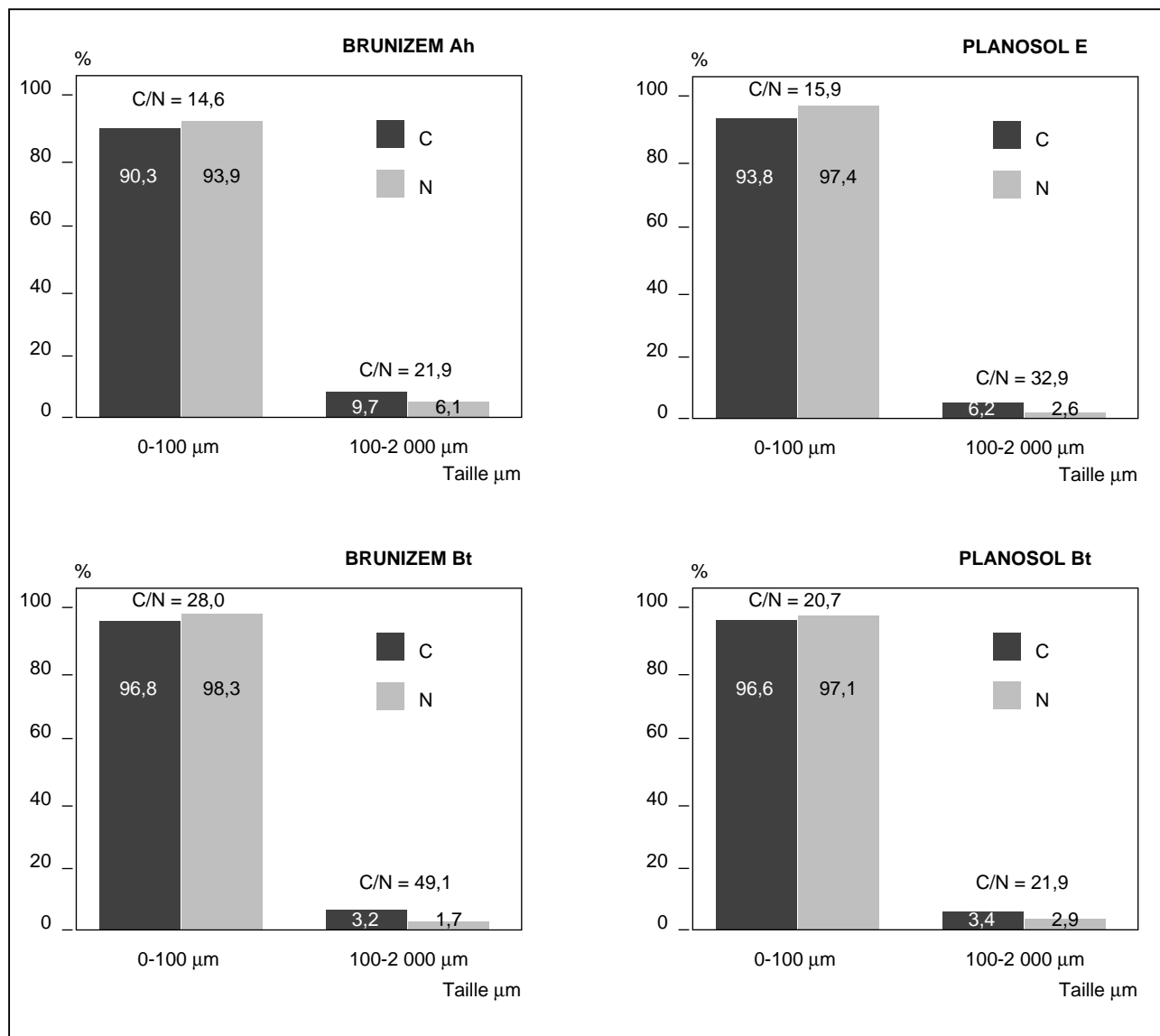


Figure 5 - Répartition du carbone en fonction de la taille des agrégats obtenus après tamisage à l'eau.**Figure 5** - Carbon repartition in the soil aggregates.

des cations constituant la garniture (Kamprath, 1970). Dans le cas présent cette dernière ne met pratiquement en jeu que les quatre principaux cations alcalins (Ca, Mg, Na, K) puisque l'aluminium est absent et que les quantités de protons présentes sont pratiquement négligeables étant donné les valeurs de pH proches de la neutralité (Figure 2).

Dans un cas comme dans l'autre le calcium est l'élément dominant de la garniture cationique mais le magnésium, cation hydraté au pouvoir flocculant faible, est présent en proportion

toujours importante (rapport Mg/Ca pratiquement supérieur à 1 dans tous les horizons). Le sodium est plus abondant dans le planosol que dans le brunizem.

Matière Organique

Les taux de matière organique et leurs distributions verticales varient de façon importante entre les deux sols (Figure 3).

C'est dans les Brunizems que les quantités de matière organique sont les plus importantes. La répartition dans le profil est marquée par une diminution régulière avec la profondeur.

Figure 6 - Répartition du carbone après extraction alcaline effectuée sur les horizons d'accumulation du Brunizem et du Planosol.

Figure 6 - Carbon repartition after alcalin extraction of Brunizem and Planosol Bth.

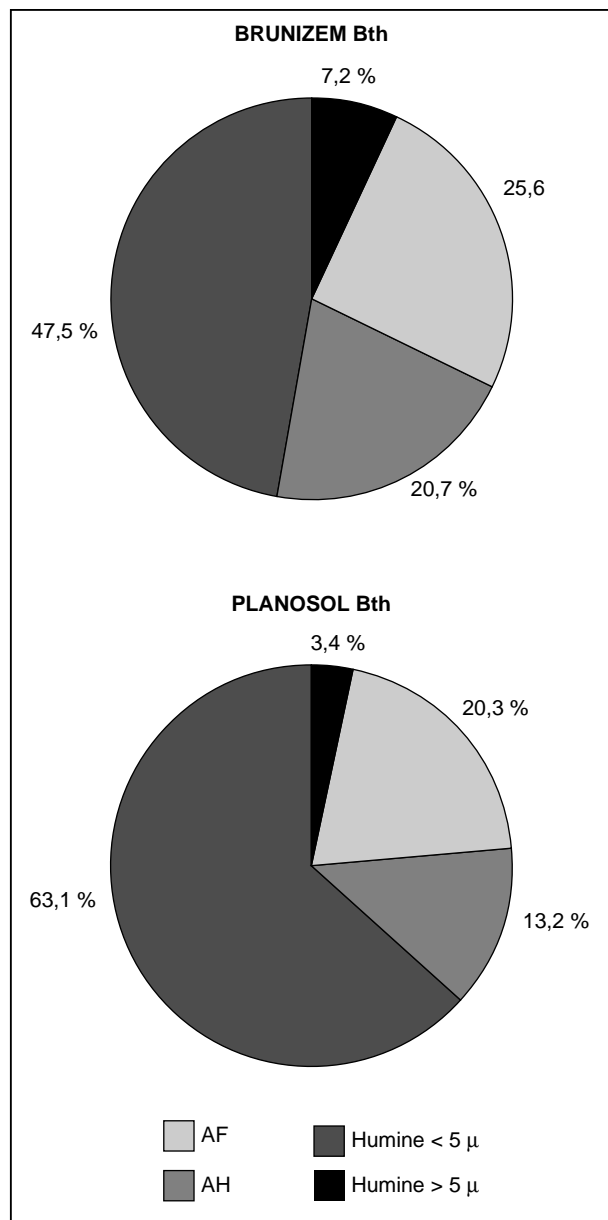


Tableau 1 - Répartition du carbone et de l'azote au sein des horizons d'accumulation argiliques (Bth 1) de Brunizem et de Planosol.

Table 1 - Carbon and nitrogen distribution in the Bth 1 pedological features.

		C %	N %	C/N
BRUNIZEM	MATRICE	1,43	0,039	36,7
	ARGILANE	2,11	0,084	25,1
PLANOSOL	MATRICE	0,62	0,04	16
	ARGILANE	1,92	0,15	12,8

Pour une colonne de sol ayant une section horizontale de 1 m² et une hauteur correspondant à celle du profil (environ 1,20 m) la masse de carbone est approximativement de 38 kg dont seulement 20 % sont emmagasinés au niveau de l'horizon B (Figure 4).

La réserve organique globale est beaucoup plus faible dans les PLANOSOLS : 8 kg/m² pour une profondeur identique au sol précédent. A l'inverse du cas précédent elle ne montre plus une décroissance régulière avec la profondeur : l'horizon superficiel est pauvre en carbone. C'est au niveau de l'horizon B que sont préférentiellement accumulés près de 75% de cet élément (Figure 4). Mais même au sein de cet horizon la distribution du carbone n'est pas homogène : dans les organo-ferri-argilanes existe la plus forte concentration en carbone (Tableau 1), environ 2 à 3 fois plus que dans les parties restantes de l'horizon. Les valeurs plus basses du rapport C/N des argilanes traduisent le plus haut degré d'humification des composés organiques.

Dans tous les cas les études physico-chimiques indiquent qu'il s'agit d'une matière organique dont une très forte proportion est hautement humifiée :

ζ Les agrégats naturels provenant de ces sols sont d'autant plus riches en carbone qu'ils appartiennent à une classe de taille faible (Figure 5).

ζ L'attaque alcaline renforce encore cette impression : la fraction alcalino-soluble (Acides fulviques et Acides humiques) correspond souvent à environ un tiers de la totalité du carbone présent (Figure 6). Mais dans la fraction alcalino-insoluble, l'humine, une très large proportion du carbone est associée à la fraction granulométrique inférieure à 5 µm. L'observation microscopique de cette dernière révèle qu'elle renferme très peu ou pas de matières figurées, ce qui signifie que la presque totalité de cette dernière est liée très étroitement aux minéraux argileux.

Les techniques hydrolytiques qui permettent une étude fine des compartiments (Jocteur Monrozier et Duchaufour, 1986) indiquent que les biomolécules (polysaccharides, acides aminés) dont on connaît par ailleurs le rôle dans les mécanismes d'agrégation (Foster, 1981) voient leur importance diminuer dans chaque séquence vers l'aval et dans chaque profil vers la profondeur au profit de molécules plus complexes, moins oxygénées, plus cyclisées et plus résistantes à la dégradation (Faivre, 1988).

Les argiles, ayant migré en profondeur, qui forment les argilanes noires, semblent donc associées aux composés humiques les plus élaborés. Tandis que les biomolécules les moins stables et résistantes s'accumulent en surface, phénomène particulièrement sensible et important dans les Brunizems.

Fraction minérale

Elle est largement dominée par la fraction argileuse dont l'essentiel correspond à des particules très fines. En effet, la séparation par ultracentrifugation indique qu'approximativement 70 % de ce dernier compartiment correspondent à des particules dont la taille est inférieure à 0,1 μm . Il s'agit essentiellement d'halloysites, minéraux complexes à feuillets 1/1 mais intercalés avec des feuillets 2/1 de type smectite (Quantin *et al*, 1984- Van der Gaast *et al*, 1986 - Wada et Kakuto, 1985).

En conséquence ce complexe d'altération possède une réactivité élevée ce qui lui permet de contracter des liaisons stables avec la matière organique et d'accroître encore la charge de surface, augmentant ainsi les possibilités de dispersion de ces complexes organo-argileux.

Tableau 2 - Comparaison entre argile incluse dans les argilanes et argile totale au sein des horizons d'accumulation argiliques (Bth 1) de Brunizem et de Planosol. (Chiffres exprimés en pourcentage de la surface totale analysée sur lames minces).

Table 2 - Comparison between argilan clay and total clay.

	% Argiles des argilanes 1	% Autres argiles 2	(1/1+2)*100	% Vide + squelette
BRUNIZEMS	10	73	12	17
PLANOSOLS	41	35	54	24

En conclusion l'étude macro- et micromorphologique ainsi que les analyses indiquent clairement que l'élément génétique principal, commun à ces deux sols, est l'existence d'un horizon B de type argilique (U.S.D.A., 1975) caractérisé par des figures d'illuviation de type organo-ferri-argilanes qui attestent d'une migration conjointe et en association des composés minéraux et organiques.

LESSIVAGE ET DIFFÉRENCIATION MORPHOLOGIQUE DES PROFILS PÉDOLOGIQUES

Aspects quantitatifs

L'horizon B argilique est surmonté par un horizon Ah humifère grumeleux de couleur noire dans le cas du BRUNIZEM et par un horizon E albiqne dans celui du planosol. Cependant dans ces deux profils les horizons superficiels sont des couches éluviales dont l'expression du caractère reste très discret dans le premier cas mais s'affirme fortement dans le second, phénomène lié à l'importance des redistributions particulières qui varient d'un sol à l'autre. Il est difficile d'évaluer cette dernière par les moyens classiquement utilisés en pédologie, bilans granulométriques ou géochimiques, en raison du caractère hétérogène des dépôts pyroclastiques lié à leur mode de mise en place.

Cette approche a néanmoins été tentée grâce à une méthode de microscopie quantitative en utilisant un analyseur d'images de type QUANTIMET 720 (Faculté de Médecine de l'Université de Nancy I).

Il est possible par ce moyen (*Tableau 2*) de comparer au niveau de chaque horizon B argilique l'importance relative prise par les argiles provenant d'une altération in situ des minéraux primaires qui au microscope optique polarisant apparaissent comme non orientés et par celles incluses dans les figures d'illuviation (organo-ferri-argilanes) qui le sont au contraire fortement et deviennent pour cette raison assez aisément discernables des précédentes.

Alors que dans les Brunizems c'est un peu plus de 10 % des argiles présentes dans l'horizon B qui proviennent des processus redistributifs, dans l'horizon homologue des Planosols c'est plus de la moitié de l'argile qui possède une origine illuviale.

Comportements des agrégats et des particules fines

Deux facteurs régissent les possibilités d'entraînement mécanique des particules fines depuis les horizons de surface vers ceux de profondeur :

ζ la possibilité de destruction des agrégats qui conditionne

la libération de particules élémentaires ou de microagrégats susceptibles d'être mis en suspension au sein de la solution du sol ;

ζ la dispersabilité de ces produits dans les conditions du milieu, c'est à dire leur possibilité d'être mis ou non en suspension dans l'environnement géochimique existant au sein du sol.

Afin d'obtenir une réponse sur le rôle respectif de ces deux facteurs deux types de tests ont été effectués :

ζ le premier vise à déterminer un indice d'instabilité des agrégats par un tamisage sous énergie modérée, c'est le test Henin-Monnier (Henin *et al*, 1969).

On compare la fraction dispersée Argiles (A) + Limons Fins (Lf) aux fractions agrégées de dimension > 200 μm restant stables après différents traitements (eau, alcool, benzène) ce qui permet de déterminer un Indice d'instabilité structurale (Is) qui varie de 0,1 à plus de 100.

$$Is = \frac{A + Lf \text{ (\% maximum sur les 3 traitements)}}{\frac{Aga + Agb + Age \text{ (\%)}}{3} - 0,9 \text{ (\% sables grossiers)}}$$

Aga, Agb, Age : agrégats stable respectivement dans l'alcool, le benzène et l'eau.

Les valeurs sont d'autant plus élevées que l'instabilité des agrégats est forte. Cependant on considère dans la réalité qu'un indice Is supérieur à 3 traduit une mauvaise stabilité structurale ;

ζ le second cherche à connaître les conditions et possibilités de dispersion des colloïdes du sol par l'estimation de la proportion d'argile dispersable dans l'eau après un traitement énergétique.

Tableau 3 - Variation de l'indice Is (Indice de stabilité structural) dans les deux sols de référence.

Table 3 - Is variation (stability structural indice) in the two reference profiles.

SOLS	HORIZONS	Is
SOLS AMONT (BRUNIZEMS)	Ah1	0,10
	Ah2	0,31
	Bth1	0,86
	BC	1,61
SOLS AVAL (PLANOSOLS)	E	0,79
	Bth1	1,00
	BC	1,49

Détermination de la stabilité des agrégats

(Tableau 3)

Pour les deux sols considérés, les résultats sont voisins pour les horizons homologues des deux profils à l'exception des horizons de surface.

En effet, si globalement l'instabilité des agrégats (< à 2mm après tamisage) est assez faible pour l'ensemble des horizons des deux profils et si les valeurs obtenues au niveau des horizons de profondeur (B et BC) restent sensiblement identiques, il n'en est plus de même en surface : la stabilité de ces agrégats apparaît nettement meilleure au niveau du brunizem que dans le planosol. Remarque qui prend toute son importance si l'on considère, ainsi que le démontrent les observations morphologiques et micromorphologiques, que dans le premier type de sol c'est pratiquement l'ensemble de la masse de l'horizon superficiel qui est agrégée alors que dans le cas du planosol seule une faible proportion de la matière contenue dans l'horizon participe aux processus d'agrégation en raison d'une fraction grossière largement dominante dont une part importante des grains ne s'intègre pas dans des édifices structuraux.

Ces variations dans la stabilité des agrégats qui restent néanmoins modérées dans l'ensemble peuvent surtout être liées à celles enregistrées dans les taux et la nature des matières organiques.

Argiles dispersables dans l'eau

(Figure 7)

Le taux d'argile spontanément dispersable dans l'eau a été déterminé suivant la méthode mise au point par Gombeer et D'Hoore (1971) modifiée par Gury (1976). L'argile est déterminée après une nuit d'agitation suivie de 8 heures de sédimentation.

La règle est la même pour les deux sols considérés quel que soit l'horizon étudié : plus le rapport Sol/H₂O est élevé, plus la proportion d'argile dispersable est, elle-même, élevée, dépassant parfois 100 % lorsque les valeurs de ce rapport s'approchent de 1. Cela signifie que dans les cas les plus favorables non seulement les argiles mais également une partie des particules limoneuses peuvent être mises en suspension aidée en cela par la viscosité élevée du mélange eau-sol.

La plus faible proportion d'argiles dispersables se situe au niveau de l'horizon Ah du Brunizem ; c'est aussi celui qui présente la meilleure stabilité structurale et une matière organique encore abondante et riche en biomolécules.

Si les solutions de dispersion sont indemnes de carbone par contre la proportion de cet élément associé au dispersat argileux atteint des valeurs très voisines de celles qui ont été déterminées au sein des organo-ferri-argilanes.

En conclusion, bien qu'il existe une différence entre la stabilité structurale des horizons superficiels des deux sols, les taux d'argiles dispersables dans l'eau sont toujours très importants

et traduisent une forte propension des deux types de sols à se lessiver.

Interprétation

La comparaison de ces deux tests indique que, bien que possédant une stabilité structurale assez bonne qui leur permet de subsister lorsque des quantités d'énergie relativement modérées sont mises en jeu, comme c'est le cas dans la Méthode Hénin-Monnier, les agrégats provenant de l'un et l'autre sol ne résistent pas à un traitement relativement énergique en milieu aqueux comme celui appliqué lors de l'agitation préalable à la détermination des argiles dispersables dans l'eau.

Elle démontre également que les variations géochimiques existant entre Brunizems et Planosols, notamment celles enregistrées au niveau de la garniture cationique, ne jouent qu'un rôle faible ou nul dans le contrôle de la dispersabilité des colloïdes argileux libérés par la destruction de ces agrégats.

Par ailleurs la détermination des quantités d'énergie absolue nécessaires à la rupture des agrégats sur ces mêmes sols (Faivre, 1988) suggère que dans les conditions naturelles les pluies orageuses violentes, en raison de leur caractère tropical encore marqué malgré l'altitude, qui frappent la surface du sol, sont capables de détruire les agrégats provenant des horizons superficiels de ces deux profils, libérant ainsi leurs constituants colloïdaux qui peuvent être alors facilement dispersés et entraînés par l'eau du sol.

Ces observations montrent que les propriétés intrinsèques des agrégats et par là même celles des horizons desquels ils sont issus n'expliquent donc pas les variations observées dans le degré de différenciation des profils pourtant situés à très faible distance l'un de l'autre.

Outre les facteurs estimés par ces deux tests, d'autres éléments entrent en ligne de compte et parmi ceux-ci l'un des plus importants apparaît être le pédoclimat qui conditionne fortement le facteur biotique et notamment le développement de la macrofaune dont les effets sur la structuration et sur les transports de particules sont importants.

Facteurs climatiques et biologiques contrôlant la dispersion et la migration des particules

Fonctionnement hydrique des profils

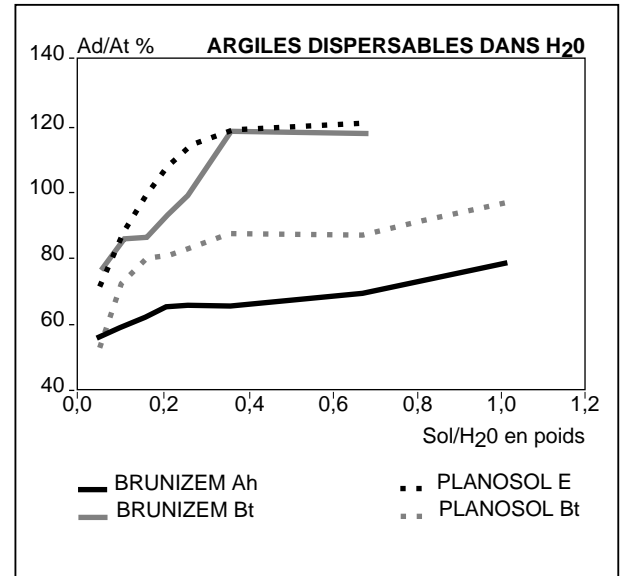
(Figure 8)

Bien que proches géographiquement ces deux profils possèdent des disponibilités en eau fort différentes.

Le passage d'un type de sol à l'autre au sein de la couverture pédologique qui s'effectue par une transition très brève dans l'espace, correspond à une importante variation dans les disponibilités en eau. Celle-ci n'est que le reflet des brusques changements climatiques, notamment d'humidité, enregistrés le long du versant, liés aux modifications dans l'importance et le régime des précipitations.

Figure 7 - Taux d'argile dispersable dans l'eau. (Ad = argiles dispersables - At = argiles totales).

Figure 7 - Water dispersible clays.



La variation temporelle de la réserve en eau du sol déterminée sur le terrain est exprimée en % de la réserve utile, RU (RU = Réserve en eau à pF 2,5 - Réserve en eau à pF4,8), obtenue expérimentalement au laboratoire. Cette valeur traduit bien l'eau disponible pour la vie.

Dans la partie de la couverture pédologique occupée par les Brunizems les réserves en eau sont pratiquement toujours importantes au cours de l'année dans les horizons de profondeur. Seuls les horizons superficiels ressentent les variations saisonnières, mais de façon atténuée, les périodes déficitaires sont peu intenses et surtout courtes.

A l'inverse dans les régions situées en aval des séquences où les sols sont fortement différenciés les périodes de disponibilité hydrique sont rares et surtout très brèves laissant le plus souvent la place à de longues périodes de disette en eau.

Dans l'horizon B ces contrastes subsistent mais de façon quelque peu atténuée, tandis qu'en profondeur il n'y a jamais d'eau disponible.

Le rôle du facteur biologique : l'importance de la pédofaune

Les études morphologiques et micromorphologiques ont mis en évidence l'importance du rôle actuel de la pédofaune dans les sols peu ou moyennement différenciés situés dans les régions les plus humides :

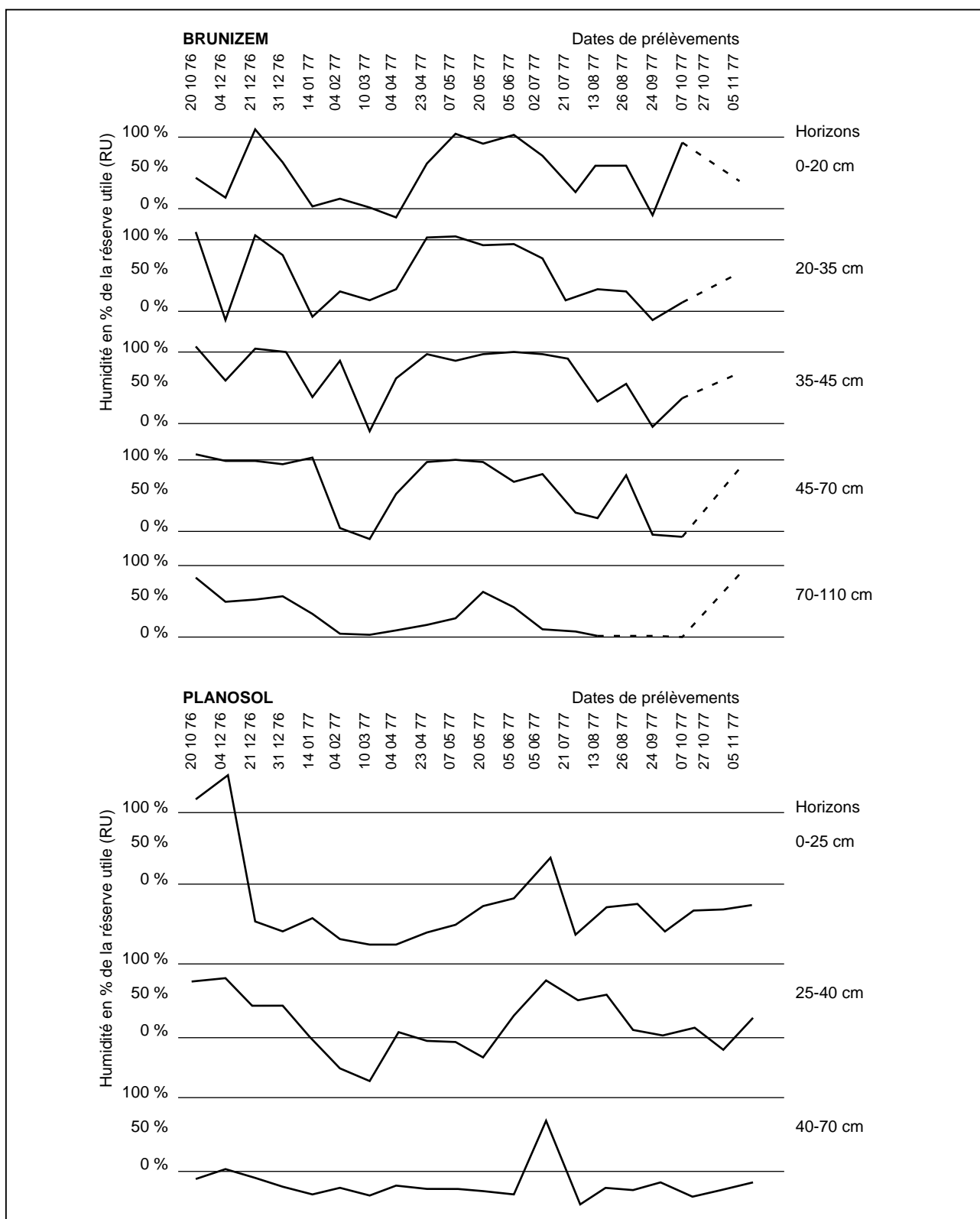
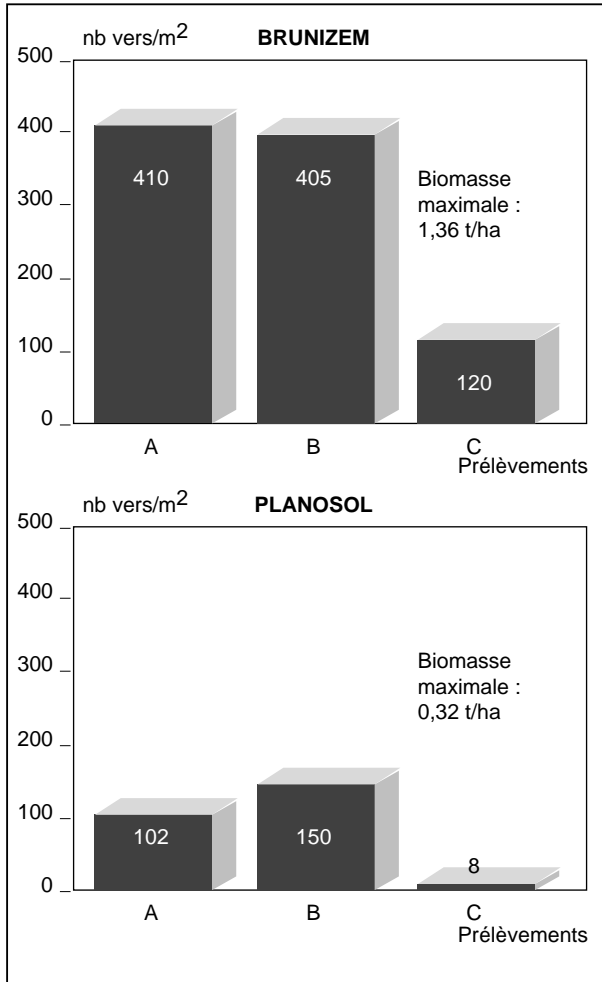
Figure 8 - Economie hydrique des profils de référence.**Figure 8 -** Hydric characteristics of the two reference profiles.

Figure 9 - Importance des populations de vers de terre dans les deux profils de référence, à diverses périodes de l'année (A = juin, B = septembre, C = décembre).

Figure 9 - Earthworm populations in the two reference profiles (A = June, B = September, C = December).



ζ genèse d'une structure grumeleuse typique (Jeanson, 1971) au niveau des horizons superficiels, totalement travaillés par la faune, conférant à l'ensemble un aspect «vermique» (U.S.D.A., 1975) responsable d'un humus particulier ;

ζ transferts de matière au niveau de ces mêmes sols entre les horizons A et B attestés par la présence de nombreux pédotubules constitués par des matériaux provenant alternativement de l'un et l'autre horizon.

A l'inverse, dans les profils différenciés occupant les régions sèches, les effets de l'activité biologique actuelle sur l'organisation des profils apparaissent peu marqués.

Il était donc utile de mieux appréhender la nature et l'importance des principaux agents responsables de cette activité pédoturbatrice: les vers de terre.

Méthodes utilisées

Le mode de prélèvement utilisé est manuel à partir d'un échantillonnage statistique de blocs cubiques de 20 cm de côté répété dix fois pour chaque site, à deux profondeurs du profil (0 - 20 cm et 20 - 40 cm). Les échantillons sont ensuite lavés et tamisés (Edwards et Lofty, 1955), puis les comptages et pesages d'animaux sont effectués.

L'opération a été répétée dans l'année afin de saisir les variations entre saisons humides et sèches.

Résultats

Il y a des différences sensibles entre les profils des régions humides et les sols planosoliques caractéristiques des milieux les plus secs. (Figure 9)

ζ Détermination des espèces

L'identification taxonomique, réalisée par le second auteur, montre une certaine richesse dans la diversité spécifique : *Allolobophora caliginosa*, *Andiodrilus bogotaensis*, *Bimastos tenuis*, *Dendrobaena octaedra*, *Diplocardia singularis*, *Octolasion lacteum* constituent l'essentiel des espèces présentes. Ce qui signifie l'existence d'animaux d'origine diverse aussi bien sud que nord américaine, voire européenne. (A. Chauvel, communication personnelle).

Les genres dominants varient suivant le type de sols : *Bimastos tenuis* exclusif des sols d'amont y est aussi le plus largement représenté ; *Allolobophora caliginosa*, par contre, domine dans les planosols.

ζ Importance de la biomasse représentée par les vers de terre. Variation dans le temps.

Entre les régions sèches et humides existent de très grandes variations numériques dans les populations lombriciennes, ainsi que pour un même sol d'une saison à l'autre.

Dans les Brunizems le nombre d'individus est apparemment très stable (plus de 400 vers/m²) lorsque le profil est bien pourvu en eau. L'assèchement naturel partiel de celui-ci particulièrement ressenti dans les couches superficielles se traduit par une diminution importante de la population ; mais même dans ce cas, c'est encore plus de 100 individus au mètre carré qui subsistent.

Durant les périodes d'humidité cette population de vers équivaut à une biomasse de 136 g/m², soit 1,36 t/ha, valeurs qui comparées à d'autres (Block et Banage, 1968 - Lavelle, 1983a) montrent l'importance numérique et massique des vers dans les sols.

La répartition par taille (déterminée sur les populations des périodes humides) est assez équilibrée. Un tiers constitue une population de petite taille dont les individus correspondent à des formes juvéniles considérées comme peu actives, notam-

ment du point de vue de leur efficacité pédologique (Bachelier, 1978). La fraction la plus importante appartient à des animaux de taille moyenne (59,1 % des animaux ont une taille comprise entre 2 et 6 cm) matures et pédologiquement actifs.

Les animaux de grande taille représentent près de 6 % du total de la population, ce qui, ramené au nombre d'individus, est considérable, surtout si l'on songe que ces animaux nécessitent pour vivre l'exploration d'un volume de sol relativement important et entrent en concurrence avec d'autres individus.

Dans les Planosols, la population est beaucoup plus réduite et surtout les fluctuations d'une période à l'autre nettement plus importantes ; plus de 100 individus au mètre carré durant la saison humide mais moins de 10 durant les longues périodes sèches.

Un peu plus de 50 % des individus présents dans ce type de sol ont une taille inférieure à 2 cm et sont donc des formes juvéniles, peu actives.

Les vers de taille moyenne représentent autour de 40 % de l'ensemble et ceux de grande taille autour de 7 à 8 %.

La biomasse correspondant à cette population n'est jamais très importante, puisqu'à son maximum, elle ne représente que 32,3 g/m², soit 0,32 t/ha.

Estimation de l'importance du rôle pédologique des populations de lombriciens

Si au niveau des sols différenciés de type planosols le rôle de la macrofaune apparaît faible dans le développement et l'expression des caractères pédologiques, il n'en est pas de même des sols dans lesquels les redistributions particulières sont modérées.

De la même manière qu'il a été possible de déterminer par les méthodes d'analyse d'images les quantités d'argile incluses dans les figures d'illuviation, celles mobilisées par la macrofaune, remplissant les pédotubules et ayant participé à des échanges de matière entre horizons superficiels et horizons B ont pu être estimées (Tableau 4).

Dans ces deux types d'horizon n'ont, en effet, été comptabilisés de cette manière que les pédotubules possédant une couleur différente de celle de la masse de l'horizon, c'est à dire ceux qui sont constitués d'un matériel allochtone, provenant de l'horizon B dans le cas des couches superficielles et inversement.

Alors que ces pédotubules sont très abondants dans les Brunizems traduisant un brassage et une homogénéisation perpétuels, puisque ces traits particuliers incluent environ 1/5 de l'argile totale présente dans les horizons concernés aussi bien A que B, ils sont absents des Planosols.

Ces valeurs obtenues en conditions favorables peuvent être rapprochées de celles fournies par Lee (1983) qui estime que dans les meilleurs cas plusieurs tonnes de matière peuvent être ainsi mobilisées annuellement en direction de la surface ou d'un autre horizon.

Tableau 4 - Caractéristiques analytiques des échantillons utilisés dans la chronoséquence.

Table 4 - Comparison between pedotubular clay and total clay.

Sols	Horizons	Argiles des	Autres	(1/1+2)*100
		pédotubules	argiles	
		%	%	
		1	2	
Sols amont (BRUNIZEMS)	Ah	15	55	21
	Bth	16	67	19
Sols aval (PLANOSOLS)	Bth	0	76	-

INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS

Les propriétés intrinsèques des sols et de leur constituants (minéralogie, nature de la garniture cationique, pH...) ne permettent pas d'expliquer à elles seules les différences morphologiques observées entre les deux profils considérés notamment l'importance plus ou moins accentuée du lessivage.

En effet, les tests expérimentaux, approche de la stabilité structurale et détermination du taux d'argiles potentiellement dispersables, montrent, que la susceptibilité des colloïdes à la mise en suspension et donc au lessivage est élevée dans les deux cas.

D'autres facteurs interviennent alors nécessairement pour contrôler la dynamique de la couverture pédologique.

Parmi ceux-ci, les variations très importantes constatées dans l'économie hydrique et leurs influences sur la macrofaune, et plus particulièrement sur les populations de lombriciens très sensibles au pédoclimat (Dash et Patra, 1977 - Lavelle, 1983b), paraissent jouer un rôle fondamental dans l'équilibre des deux types de sols considérés et apparaissent comme capables d'être un facteur de contrôle des mécanismes du lessivage.

La population animale va de ce point de vue jouer un double rôle dans ces régions humides :

ζ son abondance et son activité pratiquement permanente au cours de l'année sont responsables de l'acquisition d'une structure grumeleuse, ainsi que le montre une simple observation micro-et-macromorphologique des horizons.

L'existence de cette organisation se trouve facilitée par la présence d'une quantité importante de matière organique riche en biomolécules de poids moléculaire élevé. Les vers qui incorporent ces produits au sein des agrégats (Van Hooff, 1983) peuvent aussi contribuer à enrichir directement le sol en matières organiques agrégeantes par les produits de leur métabolisme (Jeanson, 1971- Bouche *et al*, 1983 - Shipitalo *et*

Protz, 1989). Cependant si le développement de cette structure est important, sa résistance à l'agression des facteurs externes reste relativement limitée comme en témoignent les résultats des tests de stabilité structurale et de dispersion dans l'eau. Le lessivage qui se produit après destruction des éléments structuraux et dispersion de leurs constituants colloïdaux est contrarié par la perpétuelle régénération de la structure par une macrofaune constamment active. Du point de vue de la persistance des agrégats structuraux, il semble donc important de prendre en compte non seulement leur cohésion mais également leur capacité à se régénérer rapidement, grâce au travail de la macrofaune, lorsqu'ils sont détruits ;

ζ ce brassage perpétuel aboutit également à une certaine homogénéisation des profils, les pédotubules attestent de mouvements qui ne se limitent pas à la couche superficielle. Ils s'accompagnent de transports et d'échanges importants qui compensent en grande partie les migrations particulières descendantes par lessivage.

A l'inverse aucun phénomène de ce type ne se produit avec la même intensité dans les régions plus sèches. En l'absence de possibilités de contrôle, d'ailleurs aussi bien biologique que chimique (faible présence des cations floculants) les facteurs favorables au lessivage s'expriment complètement .

La transition entre ces deux sols, très courte sur le terrain correspond à une véritable rupture au sein de l'écosystème. Elle sépare deux domaines dans lesquels la morphologie des sols n'est finalement qu'un reflet sensible des rapides variations bioclimatiques qui induisent des activités biologiques et particulièrement lombriciennes différentes.

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELIER G. (1978) - La faune des sols , son écologie et son action. Initiations - Documentations techniques. n° 38, ORSTOM - PARIS.
- BREWER R. (1964) - Fabric and mineral analysis of soil. John Wiley and Sons Inc. 470 pages.
- BLOCK W., BANAGE W.B. (1968) - Population density and biomass of earthworms in some Uganda soils. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, T3, pp 515-521.
- BOUCHE M.B., RAFIDISON Z., TOUTAIN F. (1983) - Etude de l'alimentation et du brassage pédo-intestinal du lombricien *Nicodrilus VELOX* (Annelida Lumbricidae) par l'analyse élémentaire. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 20 (1): 49-75.
- BOUCHE M.B. (1971) - Relations entre les structures spatiales et fonctionnelles des écosystèmes, illustrées par le rôle biologique des vers de terre in «La vie dans les sols» ouvrage collectif présenté par P.Pesson. Gauthier-Villars Editeur, Paris pp 187-209.
- CUATRECASAS J. (1958) - Aspectos de la vegetacion natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Fisicas y Naturales*. Vol X, 35, pp 221-264.
- DASH M.C., PATRA U. C. (1977) - Density, biomass and energy budget of a tropical earthworm population from a grassland site in Orissa, India. *Rev. Ecol. Biol. Sol* 14 (3),461-471.
- DELECOUR.F. (1980) - Essai de Classification pratique des humus. *PEDOLOGIE*, XXX, 2, pp225-241.
- DUCHAUFOR Ph. (1977) - Pédogénèse et classification, Masson, Paris. 477 pages.
- EDWARDS G.A.T., LOFTY A. (1955) - Soil sampling for lumbricidae. *Soil Zoology Proc.Un. Nottingham*, 1, pp156-166.
- ESCHENBRENNER.V. (1986) - Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux. *Cah ORSTOM, Sér. Pédologie*, XXII, 397-408.
- FAIVRE P. (1988) - Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie (Amérique du Sud). Thèse Doct. Etat Un. Nancy I, U.E.R - G.S.M. 563 p + annexes.
- FOSTER R. C. (1981) - Polysaccharides in soil fabrics. *Sciences*, Vol 214, pp 665-667.
- F.A.O.-U.N.E.S.C.O. (1975) - Carte mondiale des sols .Vol I: Légende -62 pages,Paris.
- FREI E.(1964) - Micromorphology of some tropical mountains soils. In soil micromorphology, pp.307-311. Ed. A. Jongerius, Elsevier-Amsterdam.
- GARNIER-SILLAM E., TOUTAIN F., RENOUX J. (1988) - Comparaison de l'influence de deux termitières (humivore et champignoniste) . *Pedobiologia*, 32, pp 89-97.
- GOMBEER R., D'HOORE J. (1971) - Induced migration of clay and other moderately mobile soil constituents. III. Critical soil/ water dispersion ratio. Colloid stability and electrophoretic mobility . *PEDOLOGIE*, XXX (3), pp 311-342.
- GUILLET B., FAIVRE P., MARIOTTI A.,KHOBZI J. (1988) - The 14C dates and the 13C/12C ratio of soil organic matter as a means of studying the past vegetation in intertropical regions : examples from Colombia (South America). *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology*, Vol 65 n°1-2 pp 51 - 58.
- GURY M. (1976) - Evolution des sols en milieu acide et hydromorphe sur terrasses alluviales de la Meurthe. Thèse Un.Nancy I, UER STMCM, 100 pages.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G. (1969) - Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Masson, Paris, 3ème Edition.332 pages.
- HOEKSEMA K.J.,EDELMAN C.H. (1960) - The role of biological homogenization in the formation of Gray-Podzolic soils. 7th Int. Congr. Soil Sc. Trans (Madison) V4, pp 402-405.

- HOLE F. (1981) - Effects of animals on soil. *Geoderma* 25, 75-112.
- JOCTEUR-MONROZIER. L., DUCHAUFOR Ph. (1986) - Données récentes sur l'humification. *Science du sol*, Vol.25, n°4, pp.377-388.
- JEANSON C. (1971) - Etude expérimentale de l'action des vers de terre sur les sols artificiels. In «La vie dans les sols « ouvrage collectif présenté par P PESSON. Gauthier-Villars Editeur, Paris, pp 211-277.
- KAMPRATH E.J. (1970) - Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soil. *Soil Sci. Soc Amer. Proc.*, vol 34, pp.252-254.
- LAVELLE P. (1983a) - The soil Fauna of tropical savannas, II The Earthworms in «ecosystems of the World» 13, Tropical Savannas Ed by F. Bourlière Chap. 22, pp 485-504.
- LAVELLE P. (1983b) - The Structure of earthworms communities in «Earthworm Ecology from Darwin to vermiculture» Edited by J. E. Satchell. Chapman and Hall. pp 449-466.
- LAVELLE P., BLANCHART E., MARTIN A., SPAIN A. V., MARTIN S. (1992) - Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In Myths and science of soil of the tropics. SSSA Special Publication n° 29 pp 157 - 185.
- LAVELLE., DANGERFELD M., FRAGOSO C, ESCHENBRENNER V., LOPEZ - HERNANDEZ D., PASHANI B., BRUSSARD L. (1994) - The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. in the Biological Management of Tropical Soil Fertility Edited by P.L.Woomer et M. J. Swift. Wiley- Sayce Publication pp 137-169
- LEE K. E. (1983) - Earthworms of tropical regions some aspects of their ecology and relationships with soils in «Earthworms Ecology from Darwin to vermiculture» edited by J. E. Satchell. Chapman and Hall. pp179-193.
- QUANTIN P., HERBILLON A.J., JANOT C.,SIEFFERMAN G. (1984) - L'halloysite blanche riche en fer de Vate (Vanuatu). Hypothèse d'un édifice interstratifié halloysite-hisingerite; *Clay minerals*, 19, pp.629-643.
- RAFIDISON Z. (1982) - Rôle de la faune dans l'humification et transformation des feuilles de hêtre. Thèse 3^e cycle. Université de Nancy I. U.E.R. - S.T.M.C.M. 104 pages.
- SANBORN P., PAWLUK S. (1989) - Microstructure diversity in Ah horizons of black chernozemic soils, Alberta and British Columbia (Canada). *Geoderma*, 45, 221-240.
- SHIPITALO M.J., PROTZ R. (1989) - Chemistry and micromorphology of aggregation in Earthworm Casts. *Geoderma*, 45, pp357-374.
- TOUTAIN F. (1984) - Les phénomènes de biodégradation et d'humification dans les écosystèmes forestiers tropicaux: rôle et conséquence de la diversité spécifique. *Biology International. Special Issue 6. The significance of species diversity in tropical forest ecosystems* pp19-29.
- U.S.D.A. (1975) - Soil Taxonomy- Agriculture Handbook, n°436, Washington D.C., 754 pages.
- Van der GAAST S., J. , MIZOTA C. , JANSEN J. H. F. (1986) - Curved smectite in soils from volcanic ash in Kenya and Tanzania : a low X-ray powder diffraction study. *Clays and clay minerals*, vol.34, n°6, pp 665-671.
- Van HOOFF P. (1983) - Earthworm activity as a cause of splash erosion in a Luxembourg forest . *Geoderma*, 31 pp195-204.
- WADA K., KAKUTO Y. (1985) - Embryonic halloysites in Ecuadorian soils derived from volcanic ash. *Soil Sc. Soc. Am. J.* ,49, pp.1309-1318.

