

# Le vieillissement des matières organiques et des associations organo-minérales des andosols et des podzols

Bernard GUILLET (\*)

## RÉSUMÉ :

Les mesures d'âge par le  $^{14}\text{C}$  des matières organiques des andosols, sols andiques et podzols témoignent de la longévité des associations organo-minérales, surtout quand il s'agit de sols développés dans la zone intertropicale. On peut attribuer ce phénomène à la permanence, depuis des millénaires, des processus pédogénétiques continus ou peu modifiés par des variations climatiques qui n'ont pas atteint la même amplitude que dans les milieux tempérés où les pédogénèses se limitent presque essentiellement au réchauffement holocène survenant après le dernier épisode glaciaire. On cite les exemples pris au Congo et en Colombie d'une protection et conservation mutuelles des matières organiques et des phases minérales amorphes qui ont pu vieillir ensemble dans des horizons presque fossiles des couvertures pédologiques.

**MOTS-CLÉS :** datation  $^{14}\text{C}$  - matière organique des sols - podzolisation - andosolisation.

## AGEING OF ORGANO-MINERAL ASSOCIATIONS IN ANDOSOLS AND PODZOLS

*$^{14}\text{C}$  datings of organic matter of andosols and podzols testify to the long life of organo-mineral associations in soils developed in the intertropical regions. This must be related to the continuity of soil forming processes over a very long period.*

*The presence of amorphous hydroxyaluminum polymers and allophanes in andosols is frequently evoked to explain the large quantity of stored organic carbon. Table I compares the organic carbon stored in andosols and brunified soils of a same bioclimatic area. The greatest part of the organic carbon is effectively associated with mineral surfaces to form the humin fraction which is one of the oldest parts of the carbon in andosol horizons (Table IV). In intertropical areas, as in Colombia, the mean ages of the organic matter of the "sol andique" (andic humitropept) reach high values (Table II) and suggest that the linkage of humified substances with amorphous mineral surfaces may have a long life where the climatic conditions have not been too drastically modified during the last deca-millenaries.*

*For podzols developed in temperate regions, the mean age of organic matter in the spodic horizons rarely reaches 4000 yrs (Table III). By contrast, in Congo (Figure 1), SCHWARTZ (1988a and b) described giant podzols whose organic matter is more than 30000 yrs old. Microstructural features of the organo-mineral matrix coating the quartz grains of the spodic horizon show that the organic matter is of two types : i) microaggregates of organic matter probably intimately associated with amorphous aluminum hydroxides (Photos A, B, C) or with clay mineral tactoids (Photo D); ii) walls of microorganism remains that can be attributed to filamentous bacteria or fungi hyphae. The organo-mineral microaggregates and the degraded walls appear to be remarkably stable from a biological point of view : they represent the less biodegradable part of organic soil fractions.*

(\*) Université d'Orléans et URA 724 du CNRS - Laboratoire de Géochimie Organique - BP 6759 - 45067 Orléans Cédex 02

*These examples taken in tropical soil environments suggest that amorphous mineral phases can prevent the organic substances from being biodegraded, which, in turn, prevent the amorphous mineral phases from being transformed into forms of better crystallinity. By a mutual protection and conservation, organic matter and amorphous mineral phases age together in fossilized parts of soil covers.*

**KEY-WORDS :**  $^{14}\text{C}$  dating - soil organic matter - podzolisation - andosol.

## I. INTRODUCTION

Dans deux grands types de sols, la fraction fine est en majorité formée d'une association entre les matières organiques et des constituants minéraux amorphes ou plus ou moins bien cristallisés : il s'agit des andosols et des podzols, plus précisément des horizons B des podzols. Dans ces deux types de sols, les interactions entre les constituants minéraux et les substances organiques sont tellement fortes qu'il y aurait protection mutuelle des phases minérales et organiques qui tendent à vieillir ensemble. On a pu dire que la fixation des substances humiques sur les phases minérales freinait leur minéralisation et, qu'en conséquence et réciproquement, les substances humiques empêchaient les produits minéraux amorphes d'évoluer vers des états de meilleure cristallinité (QUANTIN, 1972).

Quels sont les ordres de grandeur des "âges moyens" des associations organo-minérales des andosols et podzols ? Se mesurent-ils en milliers d'années ou en dizaines de milliers d'années sachant que l'andosolisation et la podzolisation sont des processus pédologiques qui relèvent de ce que Ph. DUCHAUFOR (1977) nomme "processus de cycles courts" ce qui signifierait que quelques millénaires suffisent pour que les andosols et les podzols atteignent un état d'équilibre défini par une certaine stabilité des constituants et des propriétés et au delà duquel ils peuvent ou non se transformer. Les andosols, en effet, peuvent évoluer vers des sols andiques et d'autres types de sols (brunifiés ou ferrallitiques) par la transformation progressive de la phase minérale amorphe en une matrice argileuse et par la minéralisation de la majeure partie des matières organiques. Quant aux podzols, sols de fin d'évolution, ils ont un destin étroitement lié au devenir des paysages auxquels ils s'intègrent dans de fragiles écosystèmes.

Les podzols, les andosols et les sols andiques sont répandus sur tous les continents. Rappelons que les conditions optimales de la genèse des podzols sont réunies dans les zones à bioclimats frais et humides (SOUCHIER, 1984) : la podzolisation climatique est un processus banal des milieux tempérés ou boréaux. En milieu tropical existe une podzolisation qualifiée de stationnelle, bien qu'elle ait souvent une grande extension spatiale, car elle est liée à des substratum de sables quartzueux pauvres en argile et en minéraux altérables. Souvent décrite depuis quelques années (LENEUF et OCHS, 1956 ; TURENE, 1977 ; BRABANT, 1987 ; DUBROEUCQ et BLANCANEUX, 1987 ; LUCAS *et al.*, 1987 ; SCHWARTZ, 1987) elle est active et présentement fonctionnelle, généralement sous couvert forestier et en condition hydromorphe. Les andosols, sols stationnels développés sur les produits de l'altération des roches volcaniques basiques, ont été décrits, eux aussi, aussi bien dans les régions à climat tempéré que dans les régions intertropicales, où ils se localisent plus fréquemment à haute altitude (SIEFFERMANN, 1969 ; COLMET-DAAGE *et al.*, 1969 ; QUANTIN, 1974).

Cette note cherche moins à comparer les âges des matières organiques des associations organo-minérales des podzols et andosols tropicaux et tempérés qu'à mettre l'accent sur la plus forte probabilité que nous pouvons avoir de découvrir des associations organo-minérales plus vieilles en milieu tropical qu'en milieu tempéré. L'argumentation se base sur les mesures d'âge des matières organiques des sols par datation par le  $^{14}\text{C}$ .

Il faut rappeler que lorsque l'on détermine par datation par le  $^{14}\text{C}$  l'âge moyen des matières organiques des sols en prenant soin d'analyser tous les horizons depuis ceux de surface jusqu'aux horizons profonds, on voit se dessiner un gradient d'âge croissant avec la profondeur (SCHARPENSEEL, 1972). Ces âges moyens croissants peuvent être interprétés comme étant dûs au mélange d'une matière organique âgée mise en place et stabilisée dès les premières phases de la pédogénèse, et d'une matière organique récente d'autant plus abondante que l'on tend vers les horizons de surface (BALESDENT et GUILLET, 1982), où les apports d'énergie sous forme de litières aériennes ou rhizosphériques maintiennent une activité biologique à son plus haut niveau.

## II. LES FAITS

### 1. L'EXEMPLE DE QUELQUES ANDOSOLS EN MILIEU TEMPÉRÉ.

Parmi tous les types de sols, les andosols présentent le gradient d'âge le plus élevé : la matière organique y aurait un gradient *per descensum* d'âge moyen de 600 ans par décimètre (GUILLET, 1987), alors que dans les chernozems, réputés pour leur fort gradient d'âge, il serait de l'ordre de 500 ans (SCHARPENSEEL, 1972). En outre, ce qui caractérise les andosols et sols andiques par rapport aux chernozems est le fait qu'ils parviennent à bloquer des quantités considérables de matières organiques pendant des millénaires. Pour s'en convaincre, il suffit de noter que vers 60 cm de profondeur, les variations des teneurs en carbone des chernozems sont généralement comprises entre 6 et 23 mg par gramme de sol (SCHARPENSEEL et PIETIG, 1969, 1970, 1971) alors que pour les andosols et sols andiques une compilation des données de HETIER (1975) et MOINEREAU (1977) donne une teneur moyenne voisine de 35 mg/g.

Il est notoirement connu (DUDAL and SOEPRAPTOHARDJO, 1960 ; COLMET-DAAGE *et al.*, 1969 ; CORTES et FRANZMEIER, 1972 ; QUANTIN, 1972 ; DUCHAUFOR, 1977) que les conditions climatiques de leur genèse jouent un rôle important puisque les andosols sont surtout des sols des régions montagnardes dont le climat humide et frais favorise le stockage des substances humiques et restreint leur minéralisation (SIEFFERMANN, 1969 ; HETIER, 1975). Ainsi, selon HETIER (1975) et MOINEREAU (1977), et pour s'en tenir aux sols montagnards d'une même zone climatique (zone tempérée) et altitudinale (sols du Massif Central), les andosols accumuleraient beaucoup plus de carbone organique que les sols d'environnements analogues développés sur roches cristallines acides. Précisément, les données de MOINEREAU (1974a, 1977) permettent d'évaluer le stockage du carbone organique des sols andiques et andosols des massifs du Coiron et Ceyzallier au double du stock des sols brunifiés (Tableau I).

Si nous limitons nos observations aux pédogénèses de la zone tempérée, nous ne pouvons être que frappés par le consensus des auteurs qui considèrent l'andosolisation

comme un processus transitoire. Ainsi, WADA et AOMINE (1973) estiment que la maturité d'un andosol au Japon est atteinte en moins de 5 000 ans. HETIER (1975), qui a étudié la genèse et l'évolution des andosols du Cantal et de la Chaîne des Puys, reconnaît que parmi tous les facteurs internes (composition et texture de la roche mère) et externes (climat, altitude, végétation), la permanence d'un bioclimat humide est essentielle au développement et à la maturation des andosols. Or l'altitude moyenne des appareils volcaniques est, selon HETIER (1975) trop basse et, en conséquence les variations climatiques historiques ont été beaucoup trop sensibles et contrastées pour que les processus d'andosolisation aient pu se dérouler pendant un très long laps de temps. Les variations climatiques post-glaciaires ont fait évoluer les sols andiques vers la brunification ou la podzolisation et les seules couvertures pédologiques qui ont pu conserver leur caractère andique sont celles des écosystèmes d'altitude (au delà de 1100 m) ou bien celles formées sur les appareils volcaniques les plus récents, tels que les volcans du sud de la Chaîne des Puys, bien postérieurs à l'éruption des domites du Puy de Dôme (soit après 8 200 ans BP, cf HETIER *et al.*, 1983).

Tableau I : Teneur moyenne en matière organique et stock de carbone dans les soixante premiers centimètres des andosols et sols brunifiés du sud du Massif Central (d'après les données de MOINEREAU, 1974a et 1977).

*Mean content of organic carbon and carbon stored in the first 60 cm of andosols and brunified soils in the South Massif Central, France (from data of MOINEREAU, 1974a and 1977).*

	ANDOSOLS	SOLS BRUNIFIÉS
Teneur en matière organique (mg/g)	136 ± 66	25 ± 14
Stock de carbone organique (kg/m <sup>2</sup> )	26 ± 8	13 ± 5

Là où les conditions climatiques ont toujours été favorables à l'andosolisation, HETIER (1975) tient pour raisonnable l'existence d'une phase de maturation évaluée en moyenne à 4 000 - 6 000 ans. En raison de l'instabilité des paysages et des versants au cours du Pléniglaciaire Würmien et du Tardiglaciaire, une pédogenèse organo-minérale n'a pu s'exprimer qu'au cours de l'Holocène. On voit que l'âge maximum des associations organo-minérales ne serait, alors, que d'une dizaine de milliers d'années. Et de fait, les mesures d'âges moyens des matières organiques atteignent à peine 4 000 ans dans les horizons profonds (vers 70 cm) des andosols (HETIER *et al.*, 1983).

Lorsque en raison de variations du climat général et/ou du pédoclimat du sol, le régime hydrique du sol atteint un seuil critique, les andosols évoluent en minéralisant une large part de leur matière organique en même temps que cristallise une fraction argileuse, essentiellement halloysitique. Ce processus de "désandosolisation" a bien été décrit par MOINEREAU (1974 a et b) dans son étude des sols développés sur les roches basaltiques et pyroclastiques basiques du Velay et du Vivarais : la "désandosolisation" s'accélère lorsque les conditions du milieu favorisent la minéralisation de la matière organique plutôt que l'humification et le stockage de l'humus.

Si, dans la zone tempérée, les pédogenèses sont limitées à la période Holocène, au moins pour ce qui concerne l'impact des phénomènes biologiques sur la couverture pédologique, dans la zone intertropicale en revanche, les variations climatiques contemporaines du dernier épisode glaciaire et de l'Holocène, et notamment les variations thermiques, semblent avoir été bien plus amorties. Les couvertures pédologiques ont pu évoluer sur de bien plus longues périodes sans connaître comme dans la zone tempérée cette brutale "remise à zéro" survenue en régime glaciaire et périglaciaire durant les phases froides du Pléniglaciaire Würmien et du Tardiglaciaire.

## 2. ANDOSOLISATION DANS LA ZONE INTERTROPICALE :

### EXEMPLE DES SOLS ANDIQUES DE COLOMBIE.

La découverte en Colombie d'une série de sols andiques dont l'âge de la matière organique approche parfois 30 000 ans (GUILLET *et al.*, 1988) vient étayer l'argumentation selon laquelle les associations organo-minérales des couvertures andosoliques ont d'autant plus de chance de vieillir que le milieu n'a pas subi de trop radicales modifications climatiques. C'est le cas des sols andiques des franges du Subparamo et du Paramo de la Cordillère orientale des Andes colombiennes qui succèdent dans l'espace, et en amont de toposéquences, aux ferrisols et planosols décrits par FAIVRE (1988).

La couverture pédologique qui s'organise depuis les planosols de l'aval des pentes (alt. 2 600 m) aux sols andiques de l'amont (alt. 3 100 m) en passant par des ferrisols de transition (alt. 2 850 m), s'est développée apparemment sur les mêmes produits pyroclastiques apportés au cours de plusieurs phases d'éruptions volcaniques datées de 30 000-26 000 ans et aux alentours de 10 000 ans (FAIVRE, 1988). Des recherches basées sur l'utilisation des isotopes stables du carbone comme marqueur des écosystèmes (GUILLET *et al.*, 1988) ont montré que l'établissement au cours de l'Holocène d'un fort gradient climatique le long des pentes est à l'origine de la différenciation de la couverture pédologique. Dans les écosystèmes d'altitude où se localisent actuellement les sols andiques, les variations climatiques, d'humidité notamment, ont été certainement beaucoup plus faibles qu'en aval des pentes où se sont développés en 10 000 ans des îlots de semi-aridité favorables à l'argilisation puis au lessivage des argiles qui a mené à la planosolisation des sols.

Ainsi dans les écosystèmes d'altitude au climat frais et humide depuis des dizaines de millénaires, des matières organiques plusieurs fois millénaires coexistent avec des allophanes au sein de sols andiques souvent très épais. Rappelons que ces sols sont qualifiés d'andiques parce que, à côté des allophanes, existe une phase argileuse illitique et kaolinique héritée des barres d'affleurements gréseux au pied desquels se sont déposés des matériaux pyroclastiques dont l'altération livre la phase amorphe. L'évidence des allophanes apparaît sur le tableau II par la plus forte dissolution de l'aluminium ( $Al_0$ ) et du silicium ( $Si_0$ ) dans le réactif oxalique, dit de Tamm, par rapport à l'aluminium ( $Al_d$ ) et le silicium ( $Si_d$ ) extraits par le réactif citrate-bicarbonate-dithionite Na (FEY et LE ROUX, 1975). Les matières organiques, très abondantes sur toute l'épaisseur du profil, à l'exception d'un mince horizon (170-180 cm) représentant une surface brûlée, ont un gradient d'âge tout à fait exceptionnel, voisin de 1 000 ans par décimètre. Il semble bien qu'en chaque point du profil, l'association entre les matières organiques et les allophanes soit extraordinairement stable au plan biologique et chimique. Au contact des sub-

tances humiques apparemment préservées des processus de biodégradation, les allophanes se sont comportés comme des constituants amorphes peu capables d'évoluer vers des produits mieux cristallisés.

La comparaison des teneurs en carbone organique, en argile et en produits minéraux amorphes présentée dans le tableau II entre les ferrisols situés immédiatement en contrebas des sols andiques et ces derniers, suggère bien une conservation conjointe des substances humiques et des phases minérales amorphes, associées, dans l'abondance, les unes avec les autres. Si l'on veut bien noter les fortes teneurs en argile du ferrisol semblant contrebalancer la faible importance de la phase amorphe (faibles valeurs de  $Al_0$  et  $Si_0$ ), on peut imaginer que lorsque les sols andiques ont évolué vers les ferrisols en s'argilisant (et en développant une phase d'oxyhydroxydes de fer cristallisés (cf.  $Fe_d \gg Fe_o$ )) c'est la matière organique qui a "payé" la transformation. Une très large part s'est en effet minéralisée et il ne reste dans les horizons profonds du ferrisol qu'une faible fraction de la matière organique initialement présente : par son âge moyen élevé, elle garde la mémoire de la phase primitive andique.

Tableau II : Caractéristiques d'un sol andique et d'un ferrisol de la Cordillère Orientale de Colombie : teneur en argile et en carbone organique et distribution des éléments extractibles par le réactif de Tamm ( $Fe_o$ ,  $Al_0$ ,  $Si_0$ ) et le citrate-bicarbonate-dithionite ( $Fe_d$ ,  $Al_d$ ,  $Si_d$ ). Age moyen des matières organiques (d'après GUILLET *et al.*, 1988).

*Characteristics of a "sol andique" (andic humitropept) and a "ferrisol" (sombrित्रopept) in the Colombian Oriental Cordillera : clay and organic contents and distribution of Fe, Al, Si extractable by the Tamm and CBD reagents. Mean ages of organic matter (from GUILLET *et al.*, 1988).*

	Horizon	Niveau daté (cm)	Argile (%)	C. org. (mg/g)	$Fe_o$	$Fe_d$	$Al_0$	$Al_d$	$Si_0$	$Si_d$	Age moyen (an BP)
<b>Sol andique</b> (alt. 3 100 m)	A 11	55-65	17,1	110	13	19	42	28	10	3,5	6100 ± 130
	A 13	150-160	17,7	96	19	21	56	24	20	2,0	18920 ± 230
	B	170-180	13,3	7	10	19	52	15	29	3,0	n.d.
	II A 1	185-195	13,0	128	19	17	58	25	17	2,5	20110 ± 310
<b>Ferrisol</b> (alt. 2 850 m)	A 11	12-18	n.d.	35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	moderne
	A 12	37-43	65,0	31	5	25	5	6	0,5	0,4	2250 ± 65
	A 13	57-62	61,0	29	9	24	6	6	0,7	0,6	3060 ± 80
	Bt	85-95	77,0	16	3	32	3	7	0,3	0,2	10560±100
	B/C	120-125	70,0	6	1	36	2	7	0,5	0,6	16945±280

### 3. LA PODZOLISATION EN ZONE TEMPÉRÉE

#### ET LES PALÉOPODZOLS DE LA ZONE INTERTROPICALE

Les convergences et oppositions entre la podzolisation des milieux tropicaux et celle des zones tempérées ont été soulignées dans l'ouvrage édité par RIGHI et CHAUVEL

(1987). Si l'on s'en tient à l'observation des seuls horizons spodiques, là encore des gradients d'âge croissants ont été trouvés (GUILLET, 1987). Les structures cimentées des alios, humiques ou non, conduisent à des allongements de l'âge des matières organiques qui, principalement associées aux hydroxydes d'aluminium, jouent le rôle des ciments (RIGHI et GUILLET, 1977; DE CONINCK, 1980). Une illustration en est donnée avec les travaux de ROBIN *et al.* (1981, 1983) consacrés à l'étude de la podzolisation des sables des formations tertiaires du Bassin Parisien sous les couvertures forestières climatiques (hêtraie) ou dégradées (pineraie à Callune). Le tableau III montre que les horizons Bh des podzols à B spodiques meubles contiennent des matières organiques dont l'âge moyen relativement bas (quelques centaines d'années) et les valeurs du C/N de l'ordre de 20, valeurs peu élevées pour des podzols, sont tout à la fois l'expression et la conséquence d'un turnover actif qui reflète une activité biologique satisfaisante. Par contraste, les alios des podzols humiques développés dans des écosystèmes dégradés ont effectivement des matières organiques plurimillénaires. Associées aux hydroxydes amorphes d'aluminium, elles forment les ciments très peu perturbés par les manifestations biologiques comme en témoignent les valeurs assez élevées des C/N.

Tableau III : Quelques caractéristiques chimiques et âge moyen des matières organiques des horizons Bh des podzols développés sur les sables tertiaires du Bassin Parisien. S.O.P. = sol ocre podzologique (d'après ROBIN *et al.*, 1981 et 1983).

*Some chemical characteristics and mean age of organic matter of Bh horizons of podzols developed on tertiary sand of the Bassin Parisien (from ROBIN & al., 1981 and 1983).*

	Age moyen (an BP)	Fe <sub>d</sub> (mg/g)	Al <sub>d</sub> (mg/g)	C / N
<b>Bh des S.O.P.</b>	100 à 460	1,6 à 2,9	0,4 à 0,9	18 à 25
<b>Bh des Podzols meubles</b>				
<b>Alios des Podzols humiques</b>	1700 à 3000	0,6 à 2,0	2,0 à 5,7	> 40

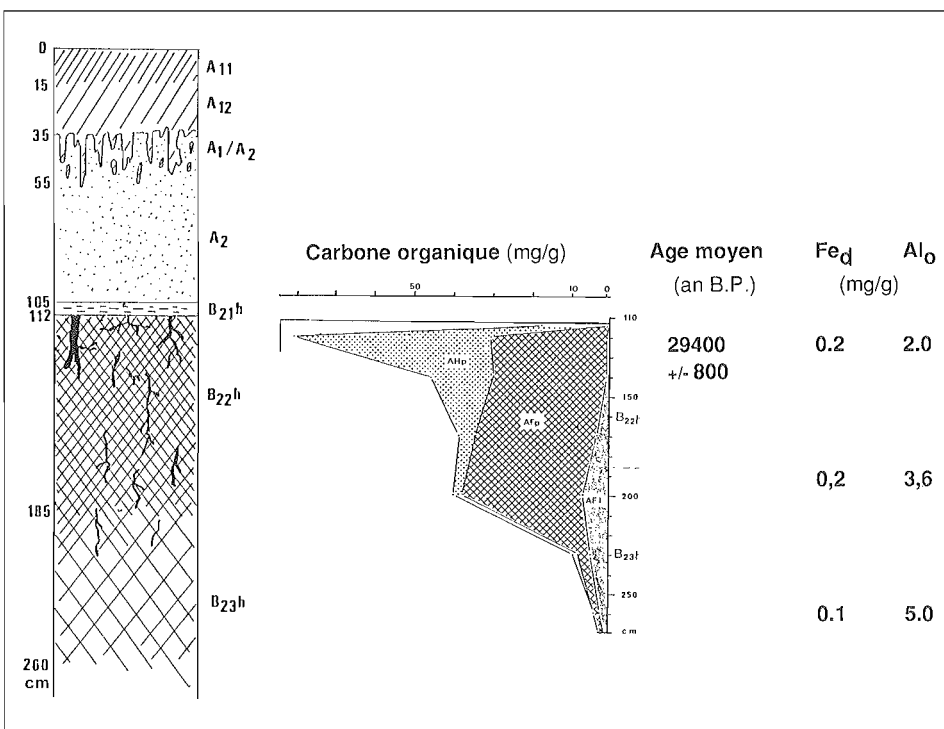
La durée des pédogenèses podzolissantes et sans doute plus encore les conditions de préservation des horizons spodiques différencient les podzols tropicaux des podzols des zones tempérées. Ces derniers sont jeunes. Ils se sont formés essentiellement au cours de l'Holocène puisqu'ils se localisent dans des secteurs géographiques soumis pendant le Würm aux actions glaciaires (montagnes et zone boréale) ou périglaciaires (podzols des plaines d'Europe Occidentale). Rares sont les mesures d'âges moyens des matières organiques des horizons aliotiques qui excèdent 4000 ans.

En revanche, en domaine tropical, la podzolisation a pu se développer en milieu hydromorphe pendant les phases pluviales synchrones de certaines phases würmiennes. Des horizons spodiques consolidés en alios et épargnés au cours du temps par l'érosion des couvertures pédologiques, se sont conservés jusqu'à nos jours. Des mesures d'âges d'une dizaine de milliers d'années ont été obtenues en Guyane (RAPAIRE et TURENNE, 1977) et parfois de plusieurs dizaines de milliers d'années en Caroline du Nord (HOLZ-

HEY *et al.* 1975) ou au Congo (SCHWARTZ, 1988a et 1988b, SCHWARTZ *et al.*, 1985). Dans tous les cas, la cimentation résulte de la précipitation autour des grains du squelette de matières organiques à dominante fulvique et de constituants minéraux amorphes principalement alumineux.

Figure 1 : Le profil du podzol de Gangalingolo développé sur les sables Batéké dans la région de Brazzaville (République Populaire du Congo). Distribution dans l'horizon spodique des acides fulviques libres (AF1), des acides fulviques (AFp) et humiques (Ahp) extraits par le pyrophosphate, du fer et de l'aluminium extraits respectivement par le citrate-bicarbonate-dithionite ( $Fe_d$ ) et par le réactif de Tamm ( $Al_o$ ). Age moyen de la matière organique du sommet de l'horizon spodique (d'après SCHWARTZ *et al.*, 1986).

*The podzol of Gangalingolo located near Brazzaville. Distribution along the spodic horizon of the free fulvic acids (AF1), of the fulvic (AFp) and humic (Ahp) acids extracted by Napyrophosphate,  $Fe_d$  and  $Al_o$  respectively extracted by the CBD and the Tamm reagent. Mean age of organic matter at the top of the spodic horizon (from SCHWARTZ *et al.*, 1986).*



La figure 1 résume ces données caractéristiques extraites des travaux de SCHWARTZ *et al.* (1985,1986) consacrés à l'étude de quelques podzols géants développés sur les sables des plateaux Batéké du Congo. On peut y noter les teneurs en fer libre dont les faibles valeurs ( $Fe_d < 0,2$  mg/g) sont le signe d'une genèse en milieu hydromorphe, et l'importance de l'association alumino-fulvique dans la majeure partie des horizons B<sub>22</sub>h et B<sub>23</sub>h dont l'âge se situe bien au delà des 29400 ans décelés pour la matière organique de leur sommet.

Ces horizons spodiques anciens sont les témoins d'une phase de podzolisation intense survenue antérieurement à 30000 ans. SCHWARTZ (1988 b) la situe au cours de la



période Njilienne (30000-40000 ans), période bien plus humide que le Léopoldvillien qui lui a succédé. Mais il est clair qu'un âge ancien de la matière organique n'a été trouvé que parce que ces horizons spodiques ont été préservés de l'érosion et qu'ils ont été fossilisés sous une épaisse couverture sableuse dont la présence les a mis hors de l'atteinte des agents bioturbateurs (racines, faunes) agissant surtout depuis la surface du sol.

### III. LES CAUSES DU VIEILLISSEMENT

Baucoup de recherches sur l'humification dans les andosols mettent l'accent sur les relations de stabilité physique, chimique et biologique existant entre les substances humiques et les constituants minéraux amorphes. Plusieurs expériences comparant les taux et les vitesses de minéralisation des substances organiques dans des sols contenant ou non de l'aluminium amorphe et des allophanes montrent que la minéralisation est réduite et ralentie en leur présence (HETIER, 1975; CARBALLAS *et al.*, 1979; ZUNINO *et al.*, 1982; BEL HADJ BRAHIM, 1987; BOUDOT *et al.*, 1988). Dès lors, la fixation des substances humiques sur les phases amorphes a pu être considérée comme une des causes essentielles du stockage des matières organiques dans les andosols (TOKASHIKI et WADA, 1975).

Les recherches de BRUCKERT *et al.* (1974), de HETIER (1975) et HETIER *et al.* (1983) sur le fractionnement des matières organiques des andosols ont permis d'observer que les acides humiques et l'humine liés aux surfaces amorphisées des minéraux fins se trouvaient être les fractions organiques de loin les plus abondantes et aussi les plus âgées (Tableau IV). L'allongement de l'âge moyen des macromolécules humiques et de l'humine par rapport aux composés fulviques apparaît comme la conséquence d'une biodégradation restreinte et donc d'un turnover plus lent. Pour expliquer ces faits on a pu évoquer des raisons géométriques. Pour BRUCKERT *et al.* (1974), les macromolécules humiques sont confinées au coeur des agrégats où elles sont étroitement associées aux surfaces alumineuses et/ou ferrifères des constituants minéraux amorphes ou mal cristallisés (halloysite glomérulaire notamment). Elles y subissent un turnover moins actif que les macromolécules de type fulvique sans doute localisées en des sites plus accessibles à la microflore du sol. Plus précisément encore, les expériences et observations de BARTOLI *et al.*, (1980) tendent à montrer que les substances organiques engagées dans des micropores des constituants minéraux mal cristallisés seraient inaccessibles aux réactions enzymatiques. En conséquence, elles seraient destinées à vieillir tant que ne sont pas modifiées les caractéristiques microstructurales et porales des agrégats organo-minéraux.

Dans les horizons spodiques indurés, la matrice interne alumino-fulvique qui forme les revêtements des grains du squelette est constituée de toute évidence de "nanoagrégats", sans doute hétérogènes, susceptibles de vieillir. A ces associations complexes organo-minérales peuvent s'ajouter des fragments de structures de microorganismes d'une remarquable conservation. Les photos de la planche 1 en donnent une illustration et sont présentées à l'appui des conclusions d'une précédente étude microstructurale du podzol géant de Gangalingolo (SCHWARTZ *et al.*, 1986). Les vieilles matières organiques de ce podzol prennent deux formes essentielles quand on les observe au microscope électronique à transmission sur des coupes minces des matrices organo-minérales. Les matières organiques qui se sont insolubilisées, sans doute en association avec des hydroxydes

d'aluminium amorphes, forment des entités sphéroïdales de 100 à 200 Angströms et des microagrégats subglomérulaires de quelques milliers d'Angströms qui résultent vraisemblablement de la coalescence des sphéroïdes (Photo A). A la base de l'horizon spodique ces microagrégats s'ordonnent autour d'îlots d'argiles (Photo D) tandis que dans les parties sommitales et médianes (Photos A,B,C) les microagrégats glomérulaires coexistent avec des structures oblongues qui semblent être les restes dégradés de parois de microorganismes. Ces structures sont visibles sur la photo A mais aussi sur la photo B qui montre clairement la trace flétrie des sections de microorganismes sans doute filamenteux (bactéries et hyphes mycéliens?). En certains endroits (Photo C) l'abondance des traces laisse penser qu'il y a bien conservation sélective de parois d'organismes malgré certaines transformations qui rendent les sections granuleuses et opaques aux électrons. L'importance que peut prendre dans les parois certains constituants peu biodégradables à base de polymères lipoglucidiques structuraux proches de la sporopollenine, peut expliquer la conservation de ces résidus figurés. Il y a là une convergence remarquable avec les observations faites au MET par RAYNAUD *et al.* (1988 et 1989) qui ont découvert l'existence de structures membranaires attribuables au phytoplancton, conservées dans des kérogènes présumés amorphes de sédiments du Mésozoïque.

Tableau IV : Distribution du carbone organique (en % du carbone organique total de l'horizon) et âge moyen (an B.P.) des fractions organiques des horizons A et (B) de l'andosol du Puy du Mercœur dans la Chaîne des Puys. Les acides humiques et fulviques ont été extraits par NaOH 0,1N. Les acides fulviques 2 ont été obtenus à partir de la solution d'acides fulviques par coprécipitation avec de l'aluminium alors que les acides fulviques 1 restent en solution (d'après HETIER *et al.*, 1983).

*Organic carbon distribution (as % of total organic carbon) and mean age (year B.P.) of organic fractions of the andosol A and (B) horizons collected at the Puy du Mercœur in the Chaîne des Puys, France. Fulvic and humic acids were extracted with NaOH 0,1N. Fulvic acids 2 were obtained from the fulvic acid solution by coprecipitation with aluminium whereas fulvic acids 1 remained soluble (from HETIER *et al.*, 1983).*

	Horizon A		Horizon (B)	
	Carbone (% COT)	Age moyen (an B.P.)	Carbone (% COT)	Age moyen (an B.P.)
<b>Acides fulviques 1</b>	15	990 ± 70	11	2130 ± 80
<b>Acides fulviques 2</b>	13	1330 ± 70	12	2580 ± 80
<b>Acides humiques</b>	13	1510 ± 70	18	2760 ± 80
<b>Humine</b>	45	1460 ± 70	56	2870 ± 80

Le vieillissement commence par l'isolement des substances organiques et de leurs supports minéraux dans des (macro- et micro-) sites quasi clos, non seulement inertes mécaniquement mais aussi inertes biologiquement. Coupées de tout apport de substances organiques énergétiques, d'origine rhizosphérique ou migrant des litières aériennes, les substances organiques et associations organo-minérales figées en ces sites, ne se renou-

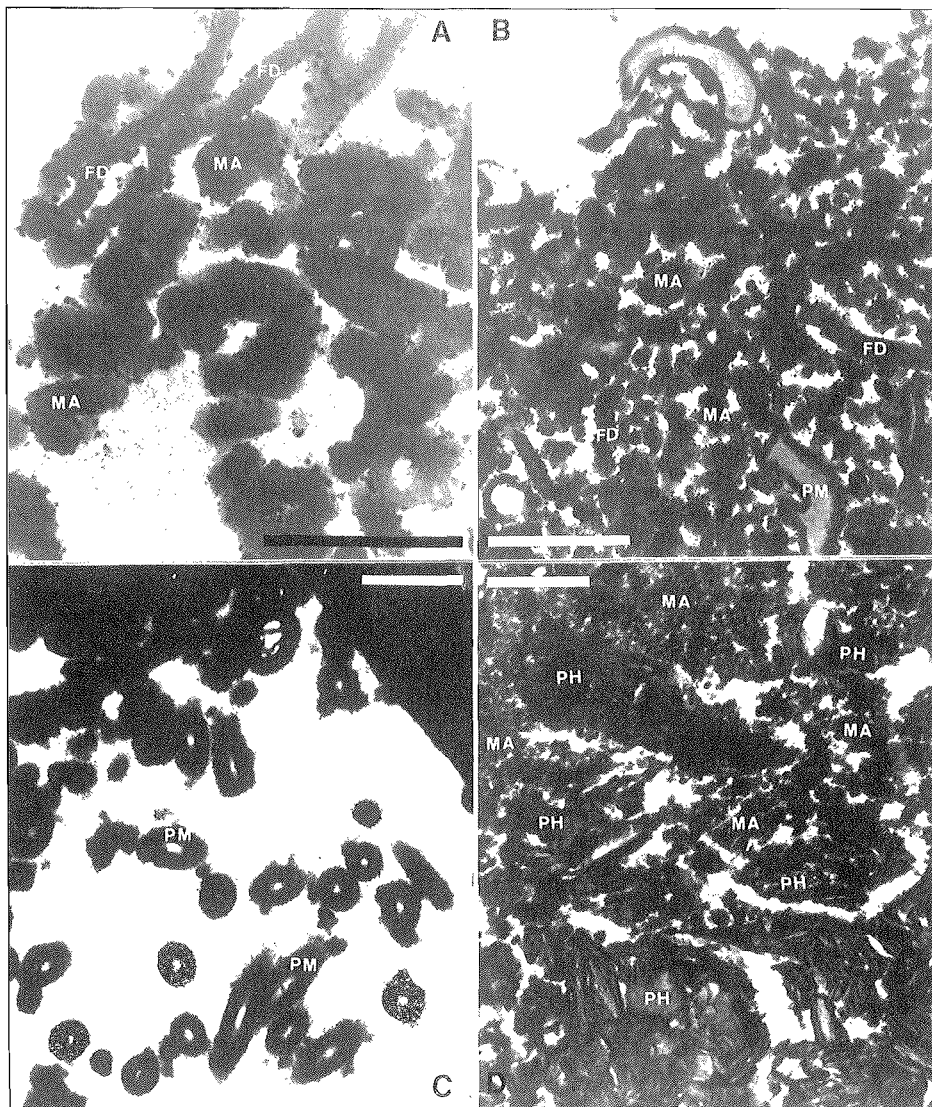
## Planche 1 :

Observations au MET de coupes minces des matrices organiques des horizons spodiques B<sub>22h</sub> (photos A, B, C) et B<sub>23h</sub> (photo D) du podzol de Gangalingolo. Photo A : Microagrégats (MA) formés de particules sphéroïdales en partie visibles et figures filamenteuses d'aspect dégradé (FD). Photo B : Microagrégats (Ma), figures filamenteuses dégradées (FD) et restes de parois de microorganismes (PM). Photo C : Parois de microorganismes filamenteux (hyphes ?) (PM). Photo D : Amas d'argile (PH) et entassement de microagrégats (MA).

La barre équivaut à 1 µm.

TEM observations of organic matrices of the spodic horizons B<sub>22h</sub> (photos A, B, C) and B<sub>23h</sub> (photo D) of the Gangalingolo podzol in the Congo. Photo A : Microaggregates (MA) formed by spheroidal particles and filamentous figures with a degraded aspect (FD). Photo B : Microaggregates (MA), degraded filamentous figures (FD) and rests of microorganism walls (PM). Photo C : Walls of filamentous microorganisms (hyphae ?) (PM). Photo D : Clay concentration (PH) and piled microaggregates (MA).

Bar = 1 µm.



vellent plus, se fossilisent et vieillissent. Il nous semble que tant que l'organisation microstructurale des horizons, et notamment des horizons spodiques cimentés, demeure figée, tant qu'elle demeure préservée des actions perturbatrices occasionnées par des organismes fouisseurs (racines et mésofaune) qui en désarticulent la structure, il y a conservation des associations organo-minérales. Dans ces conditions, les matières organiques et les constituants amorphes auxquels elles s'associent sont destinés à vieillir ensemble.

#### IV. CONCLUSIONS

Les couvertures pédologiques des milieux intertropicaux ont pu évoluer longuement sans connaître les à-coups brutaux vécus en milieux tempérés lors de la transition entre le dernier épisode glaciaire et le réchauffement holocène. La durée des pédogenèses des milieux intertropicaux autorise donc la survivance d'associations organo-minérales dans des couvertures pédologiques d'environnements particuliers. C'est en effet dans les milieux podzolisés et dans les sols formés par altération des roches volcaniques qu'ont pu être reconnues des associations organo-minérales plusieurs fois déca-millénaires.

Le fait que ces associations soient très anciennes ne signifie absolument pas que le processus qui est à l'origine de leur genèse, soit encore d'actualité. La podzolisation ou bien l'andosolisation peuvent être encore actives à la surface des sols concernés, mais la découverte de matières organiques très vieilles implique obligatoirement qu'elles soient fossilisées. Les matières humifiées âgées sont localisées dans des sites scellés du sol qui sont privés depuis longtemps des apports d'énergie et de carbone en provenance de la biosphère du sol.

**REMERCIEMENTS :** Ce texte reprend les arguments d'un exposé fait le 28 Avril 1989 à Nancy lors de la journée d'hommage au Professeur Philippe DUCHAUFOR. Il a amplement bénéficié des critiques, avis et suggestions de Pierre FAIVRE, Christian FELLER, Jean-Marie HETIER, Dominique RIGHI, Dominique SCHWARTZ et François TOUTAIN que je remercie vivement. Je remercie également Geneviève VILLEMIN, auteur des clichés photographiques.

Reçu pour publication : Mars 1990

Accepté pour publication : Août 1990

## BIBLIOGRAPHIE

- BALESDENT J. et GUILLET B., 1982. - Les datations par le  $^{14}\text{C}$  des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques. *Science du Sol* (2), 93-112.
- BARTOLI F., JOCTEUR-MONROZIER L. et RAPAIRE J.L., 1980. - Sur la stabilisation des matières organiques azotées par les minéraux silico-alumineux dans les podzols : phytolithes et argiles. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, **291**, Série D, 183-186.
- BEL HADJ BRAHIM A., 1987. - *Influence des constituants alumineux et ferriques non cristallins sur les cycles du Carbone et de l'Azote dans les sols montagnards acides*. Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, 62 p.
- BOUDOT J.P., BEL HADJ BRAHIM A. and CHONE Thérèse, 1988. - Dependence of Carbon and Nitrogen mineralization rates upon amorphous metallic constituents and allophanes in highland soils. *Geoderma*, **42**, 245-260.
- BRABANT P., 1987. - La répartition des podzols à Kalimantan (Ile de Bornéo). In : *"Podzols et podzolisation"*, D. Righi et A. Chauvel édés, AFES et INRA Paris publication, 13-24.
- BRUCKERT S., HETIER J.M. et GUTIERREZ F., 1974. - Dynamique de l'humification des andosols du Massif Central français et des Iles Canaries. Caractérisation physico-chimique des complexes organo-minéraux. *Science du Sol* (4), 225-245.
- CARBALLAS M., CARBALLAS T. and JACQUIN F., 1979. - Biodegradation and humification of organic matter in humiferous atlantic soils. *Annales Edafol. y Agrobiol.*, **38**, 9-10.
- COLMET-DAAGE F., DE KIMPE C., DELAUNE M., GAUTHEYROU J., GAUTHEYROU M., SIEFFERMANN G., FUSIL C. et KOUKOU M., 1969 - Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 3<sup>e</sup> Partie : Comparaison de l'évolution de quelques sols des régions tropicales chaudes et tempérées froides d'altitude. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII (4), 495-559.
- CORTES A. and FRANZMEIER D.P., 1972. - Climosequence of ash-derived soils in the central Cordillera of Colombia. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36** (4), 653-659.
- DE CONINCK F., 1980. - Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma*, **24**, 101-128.
- DUBROEUCQ D. et BLANCANEAUX P., 1987. - Les podzols du Haut Rio Negro, région de Maroa, Vénézuéla. Environnement et relations lithologiques. In : *"Podzols et podzolisation"*, D. Righi et A. Chauvel édés, AFES et INRA Paris publication, 37-52.
- DUCHAUFOR Ph., 1977. - *Pédogenèse et classification*. Masson Publ., 477 p.
- DUDAL R. and SOEPRAPTOHARDJO M., 1960. - Some considerations on the genetic relationship between latosols and andosols in Java (Indonesia). *Trans. VIIth Inter. Congress of Soil Sci.*, Madison, IV, V32, 229-237.
- FAIVRE P., 1988. - *Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie (Amérique du sud)*. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Nancy I, 563 p.
- FEY M.V. and LE ROUX J., 1975. - Quantitative determination of allophane in soil clays. *Proceed. Intern. Clay Conf.*, Tokyo, 451-463.
- GUILLET B., 1987. - L'âge des podzols. In : *"Podzols et podzolisation"*, D. Righi et A. Chauvel édés, AFES et INRA Paris publication, 131-144.

- GUILLET B., FAIVRE P., MARIOTTI A. and KHOBZI J., 1988. - The  $^{14}\text{C}$  dates and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of soil organic matter as a means of studying the past vegetation in intertropical regions : examples from Colombia (South America) - *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 65, 51-58.
- HETIER J.M., 1975. - *Formation et évolution des andosols en climat tempéré*. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Nancy, 194 p.
- HETIER J.M., GUILLET B., BROUSSE R., DELIBRIAS G. and MAURY R.C., 1983. -  $^{14}\text{C}$  dating of buried soils in the volcanic Chaine des Puys (France). *Bull. Volcanol.*, 46, (2), 193-201.
- HOLZHEY C.S., DANIELS R.B. and GAMBLE E.E., 1975. - Thick Bh horizons in the North Carolina Coastal Plain. II. Physical and chemical properties and rates of organic additions from surface sources. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 1182-1187.
- LENEUF N. et OCHS R., 1956. - Les sols podzoliques du cordon littoral en Basse Côte d'Ivoire. *Congrès de Science du Sol*, Paris, V, 529-532.
- LUCAS Y., BOULET R., CHAUVEL A. et VEILLON L., 1987. - Systèmes sols ferrallitiques-podzols en région amazonienne. In : "*Podzols et podzolisation*", D. Righi et A. Chauvel édés, AFES et INRA Paris publication, 53-65.
- 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). 1<sup>re</sup> Partie : Evolution et différenciation des profils. *Science du Sol* (3), 173-191.
- MOINEREAU J., 1974b. - Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns : séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France). 2<sup>e</sup> Partie : Evolution de la fraction amorphe. *Science du Sol* (4), 253-267.
- MOINEREAU J., 1977. - *Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay - Vivarais - Coirons)*. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Montpellier, 139 p.
- QUANTIN P., 1972. - Les andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, X (3), 273-303.
- QUANTIN P., 1974 - Hypothèses sur la gènesè des andosols en climat tropical. Evolution de la "pédogenèse initiale" en milieu bien drainé sur roches volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XII (1), 3-12.
- RAPAIRE J.-L. et TURENNE J.F., 1977. - Mesures d'activité spécifique des fractions de matière organique appliquées à l'étude de l'évolution des sols de Guyane. In : "*Soil organic matter studies*", IAEA, Vienne, 2, 179-186.
- RAYNAUD J.-F., LUGARDON B. et LACRAMPE-COULOUME G., 1988. - Observation de membranes fossiles dans la matière organique "amorphe" des roches mères de pétrole. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 307, Série 2, 1703-1709.
- RAYNAUD J.-F., LUGARDON B. et LACRAMPE-COULOUME G., 1989. - Structures lamellaires et bactéries, composants essentiels de la matière organique amorphe des roches mères. *Bull. Centre de Rech. de Pau*, 13, 1-21.
- RIGHI D. et CHAUVEL A., éditeurs, 1987. - *Podzols et podzolisation*. AFES et INRA public., Plaisir et Paris, 229 p.
- RIGHI D., GUILLET B., 1977. - Datations par le Carbone-14 naturel de la matière organique d'horizons spodiques de podzols des Landes du Médoc (France). In : "*Soil organic matter studies*", IAEA Vienne, II, 187-192.
- ROBIN A.-M., GUILLET B. et DE CONINCK Fr., 1981. - Gènesè et évolution des sols podzolisés sur affleurements sableux du Bassin Parisien. I. Rôle du matériau. *Science du Sol* (4), 315-329.

- ROBIN A.-M., GUILLET B. et DUCHAUFOR Ph., 1983. - Ecologie des podzols du Bassin Parisien. Exemples en forêts de Fontainebleau et Villers-Cotterets. *Revue Forestière Française*, XXXV (1), 35-46.
- SCHARPENSEEL H.W., 1972. - Messung der natürlichen C-14 Konzentration in der organischen Substanz von rezenten Böden. Eine Zwischenbilanz. *Zeitsch. Pflanz. Bodenk.*, 133, 241-263.
- SCHARPENSEEL H.W. and PIETIG F., 1970. - University of Bonn natural radiocarbon measurements III. *Radiocarbon*, 12 (1), 19-39.
- SCHARPENSEEL H.W. and PIETIG F., 1971. - University of Bonn natural radiocarbon measurements IV. *Radiocarbon*, 13 (2), 189-212.
- SCHARPENSEEL H.W., PIETIG F. and TAMERS M.A., 1969. - University of Bonn natural radiocarbon measurements II. *Radiocarbon*, 11 (1), 3-14.
- SCHWARTZ D., 1987. - Les podzols tropicaux sur sables Batéké en R.P. du Congo. Description, caractérisation, genèse. In : " *Podzols et podzolisation* ", D. Righi et A. Chauvel édés, AFES et INRA Paris publication, 25-36.
- SCHWARTZ D., 1988a. - Histoire d'un paysage : le Lousséké. Paléoenvironnements quaternaires et podzolisation sur sables Batéké. Edition de l'ORSTOM, *Collection Etudes et Thèses*, 285 p.
- SCHWARTZ D., 1988b. - Some podzols on Bateke sands and their origins, People's Republic of Congo. *Geoderma*, 43, 229-247.
- SCHWARTZ D., DELIBRIAS G., GUILLET B. et LANFRANCHI R., 1985. - Datations par le  $^{14}\text{C}$  d'aliots humiques : âge njillien (40 000 - 30 000 BP) de la podzolisation sur sables Batéké (République Populaire du Congo). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 300, Série II, n°17, 891-894.
- SCHWARTZ D., GUILLET B., VILLEMIN G. et TOUTAIN F., 1986. - Les aliots humiques des podzols tropicaux du Congo : constituants, micro et ultra-structure. *Pédologie*, XXXVI (2), 179-198.
- SIEFFERMANN G., 1969. - *Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun*. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Strasbourg, 285 p.
- SOUCHIER B., 1984. - Les podzols et la podzolisation en climats tempérés et montagnards. In : " *Livre jubilaire du cinquantenaire* ", AFES, Paris, 77-96.
- TOKASHIKI Y. and WADA K., 1975. - Weathering implications of the mineralogy of clay fractions of two ando soils, Kyushu. *Geoderma*, 14 (1), 47-62.
- TURENNE J.F., 1977. - Mode d'humification et de différenciation podzologique dans deux toposéquences guyanaises. *Mém. ORSTOM*, 84, 167 p.
- WADA K., and AOMINE S., 1973. - Soil development on volcanic materials during the quaternary. *Soil Science*, 116 (3), 170-177.
- ZUNINO H., BORIE F., AGUILERA S., MARTIN J.P. and HAIDER K., 1982. - Decomposition of  $^{14}\text{C}$ -labelled glucose plant and microbial products and phenols in volcanic ash-derived soils of Chile. *Soil Biol. Biochem.*, 14, 37-43.

