

# Les sols à montmorillonite sur gneiss de la zone tropicale humide de l'état de Bahia. Signification paléoclimatique

T.M.L. CONCEICÃO\* A.C. MONIZ\*\* J.J. OLIVEIRA\* G. SIEFFERMANN\*\*\*

## ABSTRACT

*This study concerns moderately thick soils of the ILHEUS region (Bahia) formed from granulites under tropical humid climate. After a brief description of the soils and their characteristics, the clay fraction was studied in detail by X-ray diffraction and electronic microscopy.*

*The clay minerals were shown to be montmorillonite which constitutes the major part — and disordered kaolinite. In a few profiles there were halloysite and metahalloysite.*

*Isotopic measures  $C^{14}/C^{12}$  on a profile gave data concerning the rate of mineralization and biological activity.*

*This type of alteration in a tropical humid zone is interpreted as resulting from a much drier climate than the present day climate, and suggests that there was a large increase in rainfall in the recent past.*

\* Institut de géosciences, Département 01, Université Fédérale de Bahia Salvador, Brésil.

\*\* Institut agronomique de Campinas, S.P., Brésil.

\*\*\* Office de la recherche Scientifique et Technique Outre Mer.

Ce texte a été présenté le 12 septembre 1972, en langue portugaise au 4<sup>e</sup> Congrès Latino-américain de la Science du Sol à Maracay (Vénézuéla).

## RÉSUMÉ

*L'étude concerne des sols peu épais de la région d'Ilheus (Bahia) formés à partir de granulites sous climat tropical humide. Après une brève présentation des sols et de leurs caractéristiques, l'étude de la fraction argileuse est faite en détail par la diffractométrie des rayons X et la microscopie électronique.*

*Les minéraux argileux mis en évidence sont la montmorillonite et la kaolinite désordonnée, la montmorillonite domine. Dans quelques profils on observe de l'halloysite et de la métahalloysite.*

*Des mesures isotopiques  $C^{14}/C^{12}$  sur un profil ont permis d'obtenir des informations sur les taux de minéralisation et sur le remaniement biologique.*

*Ce type d'altération en zone tropicale humide est interprété comme résultant d'un climat plus sec que le climat actuel, et suggère qu'il s'est produit dans un passé relativement proche une grande augmentation de la pluviosité.*

## INTRODUCTION

Des sols jeunes, épais de 30 à 100 cm, dérivés de migmatites se rencontrent dans la zone cacaoyère d'Ilheus dans l'état de Bahia (latitude sud 14°25,

longitude ouest 39° 20). Ces sols ont été signalés, décrits, cartographiés et étudiés au point de vue agronomique (AFONSO, 1970 ; CAMARGO, 1964 ; MIRANDA, 1971 ; SILVA, 1969, 1971). L'altitude des profils est inférieure à 200 mètres. La pluviosité est supérieure à 1 500 mm par an très bien répartie dans l'année, il n'y a jamais de saison sèche. La végétation est celle de la forêt tropicale chaude et humide de basse altitude où le degré hygrométrique ne descend jamais en dessous de 80 %.

L'intérêt de ces sols jeunes à montmorillonite vient du fait de leur proximité avec des sols beaucoup plus évolués épais d'une dizaine de mètres et plus, et franchement ferrallitiques. Ce sont là deux types d'altération qui ne s'élaborent pas sous les mêmes climats.

Pour interpréter et comprendre la formation de ces sols une hypothèse de variation climatique est tentée.

## 1. DESCRIPTION DES PROFILS

Une dizaine de profils de ce type ont été étudiés ; tous sont situés dans la zone comprise entre Ilheus, Itabuna, Ubata et Ubaitaba ; tous en position de drainage excellent.

Ce sont des sols à profil de type A, B ou (B), B/C, R ; avec souvent une litière importante, ou feuilles, fragments végétaux décomposés et excréments de vers de terre sont intimement mélangés. On les trouve décrits dans la littérature scientifique sous le nom d'unité CEPEC ou de série Sede, Litolica ou Produçãõ. Les auteurs les classent généralement dans les Alfisols, parfois dans les Entisols.

— Les horizons A, de 20 à 50 cm d'épaisseur, sont brun foncés, assez riches en matière organique, sablo-

argileux à argilo-sableux. L'activité des vers de terre et des termites y est souvent intense.

— Les horizons B ou (B), de 20 à 100 cm d'épaisseur, sont généralement plus clairs mais ils contiennent encore de la matière organique. Ils sont généralement argilo-sableux à structure polyédrique peu développée.

— Les horizons B/C, de 20 à 50 cm d'épaisseur contiennent une réserve appréciable de minéraux altérables sous forme de petits blocs et de débris de roche en voie d'altération.

— La roche mère R est le plus souvent un gneiss, parfois riche en biotite et amphibole (MELFI, 1963).

## 2. CARACTÉRISTIQUES ANALYTIQUES DE CES SOLS

*Granulométrie* : La texture est généralement sablo-argileuse dans l'horizon A et devient argileuse en profondeur. La fraction sableuse de tous les horizons se montre pour près d'un tiers constitué de minéraux primaires non altérés (feldspaths alcalins et minéraux ferro-magnésiens).

*Matière organique* : Les taux de matière organique sont élevés et décroissent de haut en bas : 3 à 9 % en surface, 0,9 à 1,5 % à 35 cm de profondeur et moins de 0,4 % à la base des profils.

Le C/N de 5 à 14 en surface est assez variable. Des déterminations de composés humiques par la méthode Dabin (1971) sont en cours sur plusieurs horizons d'un profil typique. Les extractions et mesures effectuées permettent de donner les indications suivantes :

Horizons (cm)		Acides humiques		Humine	Acides fulviques	
		Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	NaOH		Libres H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Liés Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
0,5 - 2	(1)	3,6±0,2	15 ±3	21,6±1	5,4±0,2	7,2±0,3
	(2)	+17±1		+27±1	+22±1	+19±1
50 - 70	(1)	1,2±0,1	1,5±0,1	1,5±0,1	1,7±0,1	0,3±0,1
	(2)	-37±1				

(1) = C en ‰

(2) = δ<sup>14</sup>C ‰

Pour interpréter ces mesures d'activité spécifiques, un modèle mathématique a été établi. Il suppose pour une fraction quelconque de matière organique et pour chaque horizon du sol des quantités entrant et sortant par unité de temps égales. Les activités spécifiques vérifient alors les équations suivantes :

$$Tr = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{F_0^*}{Q_0^*} - 1 \right) \text{ (équilibre radioactif avant 1954) } \quad (1)$$

$$Q_t^* = \left( \frac{1}{Tr} \right) \sum_{n=0}^T F_{(t-n)^*} e^{-\left(\lambda + \frac{1}{Tr}\right)n} \quad (2)$$

(équilibre radioactif rompu après 1954 par le  $^{14}\text{C}$  thermonucléaire)

avec :

- $Tr$  : temps de résidence d'une fraction quelconque dans l'horizon considéré
- $F_t^*$  : activité de la fraction entrant chaque année dans l'horizon
- $Q_t^*$  : activité de la fraction dans l'horizon
- $\lambda$  : constante de désintégration.

Si les diverses fractions de matière organique proviennent uniquement et directement de la litière, qui présente la même activité spécifique que celle de l'air, et si le temps nécessaire à leur formation est  $T_f$ , leur temps de résidence dans l'horizon supérieur étudié peut alors être calculé. Les résultats sont donnés figure (3).

Si l'on suppose que le temps de formation de ces fractions (temps de décomposition de la litière) est voisin d'un an en zone tropicale humide, on a alors pour acides fulviques libres (AFlib), acides fulviques liée (AFlie), acides humiques (AH) et humine (H) les temps de résidence respectifs suivants : 23, 27, 31 et 18 ans.

Pour l'horizon 50-70 cm le temps de résidence des AH, dans les mêmes conditions serait 4 700 ans.

Sur les fractions de matière organique de divers sols étudiés (2 ferrallitiques, 1 podzol), les AF, dans l'horizon supérieur présentent toujours l'activité spécifique la plus faible. Ce fait semble en contradiction avec ce que l'on observe ici : ( $^{14}\text{C}_{\text{AH}} = 17\%$ ,  $^{14}\text{C}_{\text{AFlie}} = 19\%$ ,  $^{14}\text{C}_{\text{AFlib}} = 22\%$ ). Il peut s'expliquer par une double provenance de la matière organique : la litière, les remontées biologiques.

Les premiers résultats des extractions en cours sur les déjections des lumbricidae laissent prévoir une

teneur en acides humiques (poids de précipité) au moins deux fois plus importante que celle de l'horizon supérieur. Par ailleurs, l'analyse de l'argile de ces déjections par diffraction des rayons X montre une teneur en montmorillonite supérieure à celle du niveau 0-2 cm (d'où une origine plus profonde probable).

Nous avons donc cherché à déterminer quelle quantité de carbone provenant de l'horizon 50-70 cm est nécessaire pour expliquer la différence d'activité spécifique entre AH et AF, soit  $^{14}\text{C} = 4\%$ , de l'horizon supérieur en supposant que la matière organique des déjections est principalement sous forme d'acides humiques.

Soit,

$$Q_1^* = (1-x)Q_2^* + xQ_3^*$$

avec

$Q_1^*$  = activité spécifique en 1954 des AH de l'horizon 0-2 cm ( $^{14}\text{C} \%$  = -0,4)

$Q_2^*$  = activité théorique des AH du même horizon supposée égale à celle des AF ( $^{14}\text{C} \%$  = -0,2)

$Q_3^*$  = activité spécifique en 1954 des AH de l'horizon 50-70 cm.

$x$  = pourcentage maximum de carbone entrant dans 0-2 cm provenant de 50-70 cm.

Les valeurs  $Q_1^*$  et  $Q_2^*$  se calculent à partir de l'équation (2) avec  $Tr$  connu. L'activité de  $Q_3^*$  en 1954 est supposée égale à celle de 71 en négligeant les effets thermonucléaires sur le niveau 50-70 cm ( $Tr = 4700$  ans).

On a alors  $x = 0,6$  ce qui correspond à une quantité minimum de terre remontée par mètre carré et par an des horizons profonds de 350 g.

Les interprétations possibles des mesures d'activité spécifique du carbone des diverses fractions de l'horizon 0,5-2 cm sont données par QUEIROZ (1972).

*Acidité* : Le pH de surface varie entre 4,7 et 6,7, il diminue légèrement vers 35 cm de profondeur et remonte ensuite jusqu'à 6,5 dans l'horizon B/C.

*Capacité d'échange - bases échangeables - degré de saturation* :

La capacité d'échange de la terre fine (< 2 mm) est élevée : elle oscille entre 35 et 11 méq % dans l'horizon A ; entre 14 et 10 méq % vers 35 cm de profondeur et entre 20 et 9 méq % en B/C.

La moyenne de la somme des bases échangeables se situe en surface entre 30 et 7 méq %, vers 35 cm de profondeur entre 8 et 5 méq % et dans l'horizon B/C

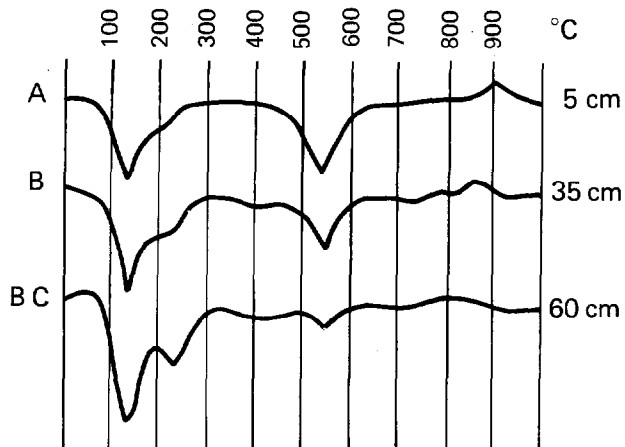


FIG. 1. — Courbes d'analyse thermo-différentielle du profil R 58, sur fraction inf. à 2 microns.

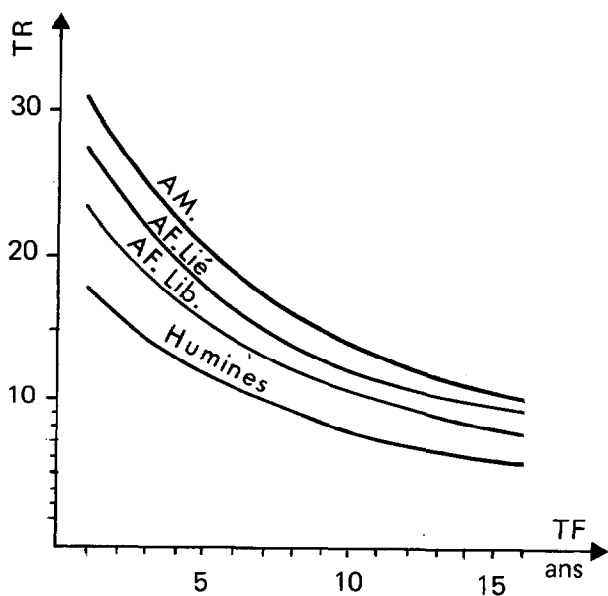


FIG. 3. — Temps de résidence de diverses fractions organiques en fonction du temps de formation.

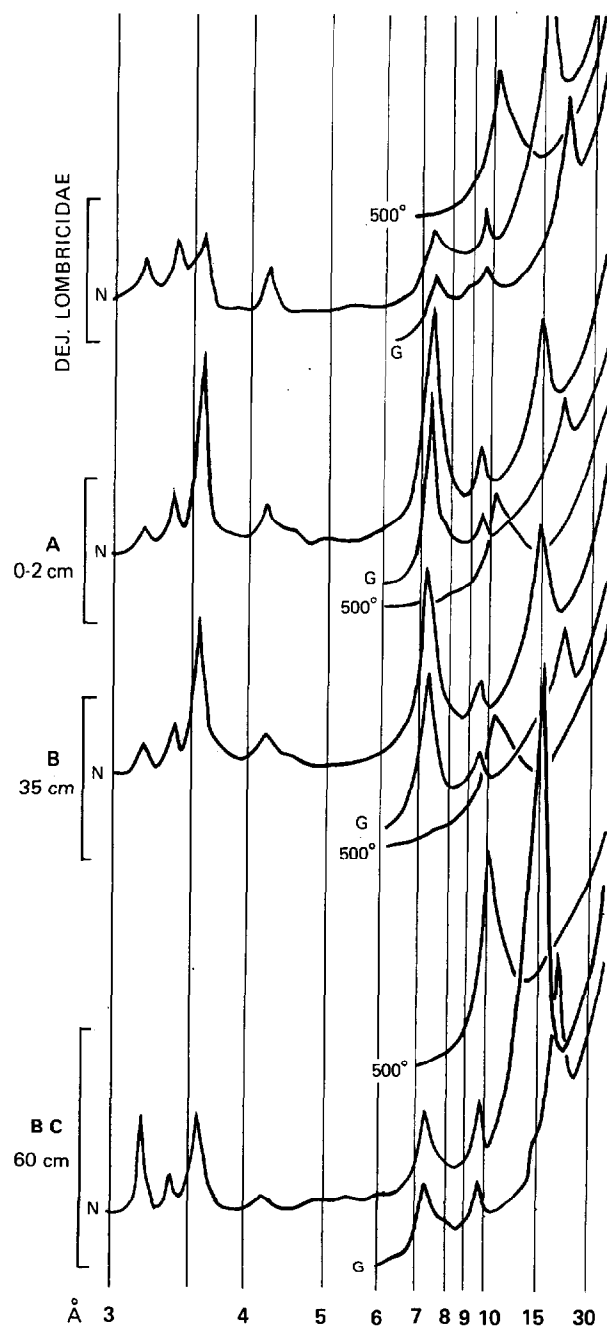


FIG. 2. — Évolution minéralogique de la fraction inférieure à  $2\mu$  dans le profil R 58 N : Argile orientée. G : Argile orientée glycerolée. 500° : Argile chauffée à 500° C.

entre 9 et 4 méq %. On note la dominance des alcalino-terreux sur les alcalins. Les taux de saturation S/T sont élevés et compris le plus souvent entre 40 et 85 %.

### 3. ÉTUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE

#### ANALYSE THERMO-DIFFÉRENTIELLE

La figure 1 groupe les courbes d'analyse thermique d'un profil caractéristique. Sur tous les échantillons un crochet endothermique dédoublé, de départ d'eau d'hygroscopicité, culminant à 130 et 220°, permet de penser à une quantité importante de montmorillonite. L'examen des trois diagrammes du profil laisse voir que ce minéral diminue quantitativement dans la fraction argileuse vers le haut du sol. Sur tous les échantillons le phénomène endothermique situé entre 500 et 600°, et le bombement exothermique vers 900°, dans l'échantillon de l'horizon A, indiquent une petite quantité d'un minéral de la famille de la kaolinite. On n'observe pas de pic endothermique entre 300 et 400°, ce qui indique l'absence de gibbsite et de quantités importantes d'hydroxydes de fer.

#### DIFFRACTION DES RAYONS X

La plupart des profils examinés ont été étudiés par diffraction des rayons X, aussi bien en poudre désorientée qu'en dépôt orienté. Les résultats obtenus varient peu d'un profil à l'autre ; sur la figure 2 sont représentés ceux qui ont été obtenus sur la fraction inf. à 2  $\mu$  du profil R 58. L'examen de la figure 2 nous montre que :

— A la base du profil la montmorillonite domine ; on observe une petite quantité de kaolinite désordonnée selon l'axe *b* et l'illite est présente (9,9 et 3,33 Å). Une faible quantité de goethite est responsable du pic à 4,18 Å. La gibbsite est absente.

— Dans les horizons A et B la quantité de kaolinite désordonnée augmente vers la surface (7,3 et 3,56 Å) et simultanément la teneur en montmorillonite baisse, tout en restant dominante.

— Dans les déjections de lombricidae le taux de montmorillonite semble supérieur à celui des horizons A et B.

— La teneur en goethite augmente régulièrement de la base vers le haut du profil.

— Les diffractogrammes en poudre désorientée de la fraction inférieure à 40  $\mu$  montrent dans tous les

horizons une quantité importante de minéraux primaires non altérés ; principalement des feldspaths alcalins, des amphiboles et des pyroxènes.

#### MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE

Pour préciser la morphologie des différents constituants deux échantillons de l'horizon B ont été examinés au microscope électronique. Trois faciès sont observables :

— Des formes en plaquettes, généralement sans contours définis, de grande taille (0,5 à 1 micron) qui correspondent à l'illite.

— Des formes en plaquettes pseudo-hexagonales à hexagonales de 0,01 à 0,5 micron. Il est vraisemblable que les plus grandes de ces plaquettes correspondent à la kaolinite désordonnée et les plus petites à la montmorillonite.

— Des formes courtes en baguettes, opaques ; et des amas d'aspect granulaire qui pourraient correspondre à la goethite et aux oxydes de fer amorphes.

### 4. ESSAI D'INTERPRÉTATION

Il se dégage de cette étude qu'il existe dans la région d'Ilheus, en zone forestière tropicale humide de basse altitude, sur des roches acides, des sols peu épais, à montmorillonite bien percolés et de pH voisin de la neutralité. Ceci est un fait surprenant, car on sait que dans de telles conditions climatiques les processus d'altération forment généralement d'épais sols ferrallitiques à kaolinite ou à gibbsite (SHERMANN G.D., 1950 ; SÉGALEN, 1957, 1965 ; BATES, 1960 ; BONIFAS, 1960 ; MILLOT, 1964 ; DELVIGNE, 1965 ; LELONG, 1967 ; SIEFFERMANN et MILLOT, 1968 ; SIEFFERMANN, BESNUS et MILLOT, 1968 ; SIEFFERMANN, 1969 ; TARDY, 1969). De tels sols, beaucoup plus évolués, à kaolinite existent d'ailleurs par endroits sur les mêmes roches associés aux précédents.

L'opposition entre la nature des phyllites néoformés des sols jeunes et les conditions climatiques actuelles peut s'expliquer par un changement radical des conditions climatiques dans un passé relativement proche. Dans cette hypothèse la montmorillonite serait à attribuer à une période de pédogenèse ancienne où ce minéral naissait à partir des produits de destruction des minéraux aluminés en accord avec un climat plus sec et un milieu moins désaturé. La saturation en

bases est un facteur essentiel dans la néoformation de la montmorillonite, qui a été souligné par de nombreux auteurs (GASTUCHE et HERBILLON, 1962 ; MILLOT 1964 ; SÉGALEN, 1965 ; PEDRO et LUBIN, 1968 ; PAQUET H., 1969 ; SIEFFERMANN, 1969 ; TARDY, 1969).

Ainsi la montmorillonite des sols d'Ilheus serait le souvenir d'une période climatique plus aride que l'actuelle. La petite quantité de kaolinite de ces sols serait le produit de la pédogenèse depuis que les conditions climatiques sont redevenues plus humides. Cette hypothèse sera retenue ici, elle rend compte correctement des faits d'observation.

Après avoir dégagé les phénomènes qui ont formé ces sols on peut reconstituer l'histoire de cette région :

— Erosion de la plus grande partie des sols ferrallitiques au moment de l'installation du climat plus sec.

— Formation des sols à montmorillonite sur les zones mises à nu.

— Réaugmentation de la pluviosité et changement du sens de la pédogenèse vers les minéraux de la famille de la kaolinite.

L'épaisseur des sols à montmorillonite, 30 à 100 cm, nous permet de penser, avec ce que nous

savons sur la vitesse de progression des altérations, que le climat a été sec pendant près de 40 000 ans (LENEUF, 1959 ; TARDY, 1969 ; SIEFFERMANN, 1969).

On pourrait établir un lien entre cette période plus sèche et le Würm : on peut souligner à ce sujet qu'en Afrique tropicale également les périodes froides correspondant aux phases arides (GRAUL, 1960 ; TRICART, 1956 ; CONRAD, 1963 ; FAURE et ELOUARD, 1967 ; MICHEL, 1968 ; FAURE *et al.*, 1969 ; SIEFFERMANN, 1969, 1970).

## CONCLUSIONS

L'étude minéralogique des sols d'Ilheus, la climatologie actuelle de cette région et la connaissance des facteurs qui conditionnent les types d'altération nous permettent de conclure que la période tropicale humide actuelle a été précédée par une intense aridification.

Les sols de cette région doivent être interprétés avec prudence, ils sont le résultat d'une longue et complexe évolution sous des climats multiples. Ce sont là des faits importants dont il faut tenir compte dans les études pédologiques et géomorphologiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- AFONSO (F.M.A.), BARROCO (H.E.), 1970. — Introdução a Região Cacaueira da Bahia, Brasil integrado. Ceplac Bolletim tecnico, (Ilheus, Itabuna) 99 p.
- BATES (Th.F.), 1960. — Rock weathering and clay formation in Hawai. *Miner. industr.* 29 (8) : 4-6.
- BONIFAS (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mémoire serv. carte géol. Als. Lorr.*, 17, 159 p.
- CAMARGO (N.N.), *et al.*, 1964. — Legenda preliminar do levantamento dos solos das regiões Cacaueiras dos Estados da Bahia et Espirito Santo. *CEPEC Bolletim tecnico* (Itabuna-Bahia), Brasil. Mineografado. 28 p.
- CONRAD (G.), 1963. — Synchronisme du dernier pluvial dans le Sahara septentrional et le Sahara méridional. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 257 : 2506-2509.
- DABIN (B.), 1971. — Etude d'une méthode d'extraction de la matière humique du sol. *Sci. du Sol*, 1 : 47-63.
- DELVIGNE (J.), 1965. — Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mém. Orstom*, Paris, 13, 177 p.
- FAURE (M.), ELOUARD (P.), 1967. — Schéma des variations du niveau de l'Océan Atlantique sur la côte de l'Ouest de l'Afrique depuis 40 000 ans. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 265 D : 784-787.
- FAURE (M.), MANGUIN (E.), NYDAL (R.), 1963. — Formations lacustres du Quaternaire supérieur du Niger oriental : diatomites et âges absolus. *Bull. BRGM*, 3 : 41-63.
- GASTUCHE (M.C.), HERBILLON (A.), 1962. — Etude des gels d'alumine : cristallisation en milieu désionisé. *Bull. Soc. Chim. fr.*, 7, : 1404-1412.
- GRAUL (H.), 1960. — Der Verlauf des glazialeustatischen Meerespiegel anstieges berechnet an Hand von C14 Datierungen. *Deutscher geografentag*, Berlin, 1959, Seite 228 bis 242.
- LELONG (F.), 1967. — Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). *Mém. Sci. de la Terre*, 14, 188 p.
- LENEUF (N.), 1959. — L'altération des granites calcoalcalins et granodiorites, en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse Fac. des Sc. Paris, ORSTOM 210 p.
- MELFI (A.J.), 1963. — Reconhecimento Geologico de parte da Região Cacaueira do Sul da Bahia. *Bol. do Cacau-Itabuna*, Bahia.
- MICHEL (P.), 1968. — Genèse et évolution de la vallée du Sénégal, de Bakel à l'embouchure (Afrique Occidentale). *Zeitschrift für geomorphologie*, Band 12 Numer 3, Seite 318 bis 349 inclusif.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson et Cie, éd., Paris, 499 p.

- MIRANDA (E.R.) *et al.*, 1971. — Respostas à adubação em algumas unidades de solos da região cacauceira da Bahia. *CEPLAC, Boll. Tech.*, 7, 28 p.
- PAQUET (H.), 1970. — Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. *Mém. Service carte géol. Als. Lorr.*, 30, 212 p.
- PEDRO (G.), LUBIN (J.C.), 1968. — Sur l'évolution de gels aluminosiliciques en milieu lessivé : influence de la nature des agents d'altération sur l'édification de boehmite ou de gibbsite au sein des produits éluviaux. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, D, 266 : 551-554.
- SÉGALEN (P.), 1957. — Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madag.*, D, VIII, 182 p.
- SÉGALEN (P.), 1965. — Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. 2<sup>e</sup> partie : Les sols de la zone intertropicale humide et la genèse des produits alumineux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, fasc. 3 : 179-205.
- SHERMANN (G.D.), 1950. — Gibbsite rich soils of the Hawaiian Islands Univ. Hawaiï. *Experimental Station Bulletin*, number 116 : 1-23.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968. — L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre Cameroun. *Bull. groupe fr. Argiles*, XX, 1 : 25-38.
- SIEFFERMANN (G.), BESNUS (Y.), MILLOT (G.), 1968. — Evolution et dégradation des phyllites dans les vieux sols ferrallitiques sur basaltes du centre Cameroun. *Sc. sol*, 2 : 105-117.
- SIEFFERMANN (G.), 1969. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. *Mém. ORSTOM*, n° 66, Paris, 179 p.
- SILVA (L.F.), MELO (A.A.O.), 1970. — Levantamento detalhado dos solos do centro de pesquisas do cacau. *CEPLAC, Boll. Tec.*, 1, 90 p.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. carte géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.