

Étude des profils isotopiques ^{13}C et ^{14}C d'un sol ferrallitique sableux du littoral congolais. Implications sur la dynamique de la matière organique et l'histoire de la végétation

Dominique SCHWARTZ, André MARIOTTI, Claire TROUVE, Klaas VAN DEN BORG
et Bernard GUILLET

Résumé — L'étude des profils ^{13}C et ^{14}C d'un sol ferrallitique du littoral congolais montre que cette région, actuellement recouverte de savane, était occupée à l'Holocène inférieur par une forêt. D'autre part, la matière organique de ces sols obéit à une répartition bi-compartimentale, modèle auparavant décrit dans des sols des régions tempérées : un compartiment composé de matières organiques stables, anciennes; et un compartiment formé de matières jeunes, labiles, dont la proportion augmente quand on se rapproche de la surface du sol

A study of ^{13}C and ^{14}C isotopic profiles in a sandy ferrallitic soil in the Congolese coastal area. Implications concerning soil organic matter dynamics and vegetation history

Abstract — Study of ^{13}C and ^{14}C profiles of a ferrallitic soil in the Congolese coastal area indicates that this area which is at present covered by savanna vegetation was forested in the lower Holocene. Besides, the soil organic matter shows a bi-modal distribution, a phenomenon which was previously described in soils of temperate areas: an element composed with old and stable organic matter, and an element composed with young and labile organic matter. The proportion of the latter element increases near the soil surface.

Abridged English Version — The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic composition of soil organic matter in tropical areas can be used to record part of the vegetation history [1]. Thus, it is possible in combination with ^{14}C dating to establish an approximate chronology. This work is an example of the application of the ^{13}C - ^{14}C combined technique to the study of the evolution of a ferrallitic soil cover.

The soil under investigation is a sandy ferrallitic soil located in a savanna area N.E. of Pointe Noire in the Congo ($11^{\circ}57'11''\text{E}$; $4^{\circ}42'56''\text{S}$) (Fig. 1).

The soil profile was regularly sampled to a depth of 5 m. Analyses consisted of granulometry, measurement of the total carbon content and $\delta^{13}\text{C}$. Some samples were dated using the accelerator method. Results are given in plate.

The low carbon content is typical of sandy ferrallitic soils. It decreases gradually with depth and stabilizes at about 0.7 mg/g in the lower soil horizons. The clay content is about 3-4% at the soil surface, increasing in the lower levels up to about 10%. The coarse sand/fine sand ratio is constant which testifies to the homogeneity of parental material.

The ^{13}C profile of the soil varies with depth. Between 0 and 50 cm in depth, it is characteristic of savanna ecosystems with prevailing C_4 Gramineae ([1], [5], [6]). With depth the $\delta^{13}\text{C}$ value stabilizes at $-24.7^{\circ}/_{00}$, which is typical of C_3 ecosystems. As C_3 savannas were unknown during the Holocene in Central Africa lowlands, it appears that this value results from a forest cover. Moreover it reflects values of a modal reference profile forested since several thousand years ago. In the middle zones of the soil profile, organic

Note présentée par Georges PÉDRO.

0764-4450/92/03151411 \$ 2.00 © Académie des Sciences

15 AVR. 1993 ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 37 558 ex 1

Cote : B

matter has both a C_3 and C_4 origin. The $\delta^{13}C$ value of roots sampled at 4.7 m in depth is -12.2‰ , typical of a C_4 origin and radically different from the soil organic matter $\delta^{13}C$ value. The $\delta^{13}C$ profile testifies to the replacement of an ancient forest by a more recent savanna. Earlier studies on peat and podzols of the coastal plain, a few kilometres apart indicate this change at about 3,000 B.P. ([9], [10]).

Mean residence time of organic matter is low in the upper soil horizons. It quickly increases with depth to about 8,200 B.P.

The perfect linearity of the $\delta^{13}C=f(1/C)$ and $\delta^{14}C=f(1/C)$ graphs demonstrates that the organic matter is distributed according to a two-element model ([7], [8]). The first element is composed of stable and ancient organic matter of forest origin. The second element is composed of young organic matter of savanna origin. The latter is in fact very labile organic matter, continuously renewed since the appearance of savanna at about 3,000 B.P.

The two main conclusions of this study are:

(i) From a paleoecological point of view, it is clear that forest did not only cover the coastal plain during the lower-Holocene, but also all the hill and plateau area between the coastline and the Mayombe mountain zone. In the ferrallitic soils of this area, pollen or fossil roots are not preserved in contrast to peat and podzols. Only the $\delta^{13}C$ profile is able to record this vegetation change.

(ii) From a pedological point of view, the separation of organic matter into two types is similar to the model established for brown soils of temperate regions. The age gradient with depth is similar to that of brown soils, vertisols and andisols. However, differences exist between 0 and 50 cm in depth. In this part of the soil, termites (*Cubitermes* sp.) are very important in biological soil mixing, resulting in substantial soil homogenization.

I. INTRODUCTION. — Par leur composition isotopique en ^{13}C , les matières organiques des sols peuvent conserver la signature des écosystèmes actuels et révolus [1]. En les datant au ^{14}C , on peut tenter d'établir une chronologie des événements principaux. Dans les sols ferrallitiques cependant, la teneur en carbone organique décroît rapidement avec la profondeur, jusqu'à des valeurs (0,1 à $2\text{--}3\text{‰}$) [2] qui ne se prêtent pas à des mesures d'âge ^{14}C par les techniques classiques, d'où la rareté des données, contrairement aux sols plus organiques, tels les andosols, podzols ou chernozems [3]. Peu exigeante en quantité de matière à dater, la méthode de datation sur accélérateur ouvre de nouvelles perspectives. Cette Note présente ainsi une application conjointe du traçage isotopique naturel ^{13}C et des datations ^{14}C à l'étude de l'évolution d'une couverture ferrallitique.

II. LE CADRE PHYSIOGRAPHIQUE. — Le profil étudié est situé à quelques kilomètres au NE de Pointe Noire ($11^{\circ}57'11''E$; $4^{\circ}42'56''S$) (fig. 1), en bordure de plateau. Il s'agit d'un sol ferrallitique psammitique [4], type de sol profond, peu différencié de la roche mère, et contenant jusqu'à 95 % de sables dans les horizons de surface. La végétation est une savane non arbustive dont la graminée dominante est *Loudetia arundinacea* Steud. La forêt apparaît dans le thalweg, à 500 m de distance (forêt-galerie).

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES. — Après rafraîchissement du profil, des échantillons ont été prélevés à intervalles réguliers de 10 puis 20 cm, pour analyse granulométrique, mesures du carbone total et du contenu en ^{13}C , et datation ^{14}C . On a également prélevé de façon exhaustive les racines présentes entre 4,6 et 4,7 m de profondeur, dans un

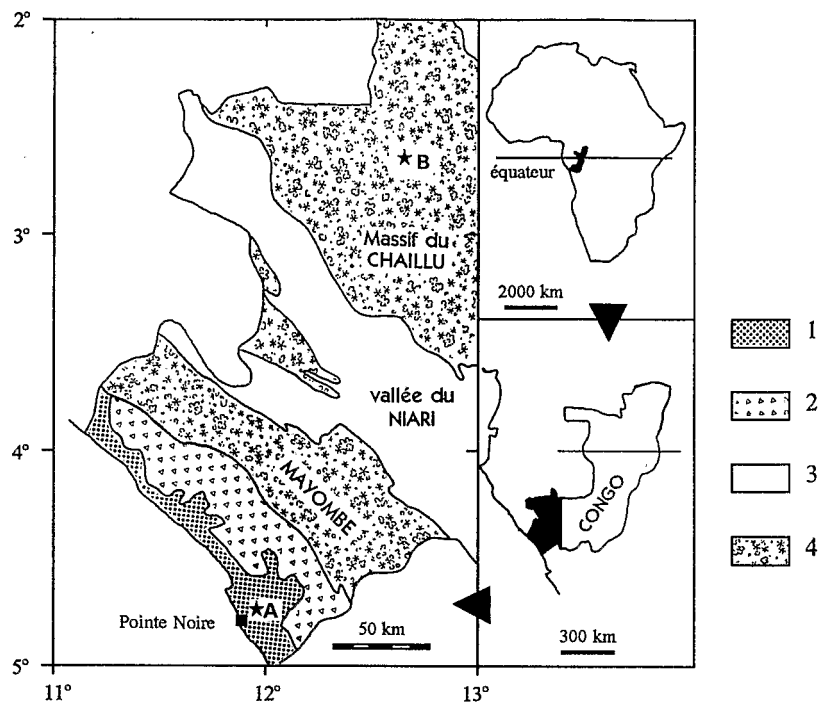


Fig. 1. — Carte de localisation. 1 : savanes littorales sur sols sableux. 2 : mosaïque forêt-savane sur sols sableux. 3 : savanes du synclinorium Niari-Nyanga. 4 : forêt ombrophile. A : profil étudié. B : profil modal forestier témoin.

Fig. 1. — Location map. 1: coastal savannas on sandy soils. 2: forest-savanna mosaic on sandy soils. 3: savanna of the Niari-Nyanga synclinorium. 4: rain forest. A: location of the studied soil profile. B: modal forest profile.

volume de sol d'environ 4 l, pour détermination de leur abondance naturelle en ^{13}C . Les valeurs du ^{13}C du sol ont été comparées avec celles d'un profil témoin modal, prélevé dans une zone forestière depuis plusieurs millénaires.

La granulométrie a été effectuée par la méthode classique à la pipette Robinson. Le carbone total a été déterminé au carmographe Wosthoff. Les datations ^{14}C ont été effectuées sur l'accélérateur de particules de l'Université d'Utrecht. Elles sont suivies du sigle B.P. (*Before Present*), l'année de référence étant 1950. Les analyses du contenu en ^{13}C des matières organiques sont réalisées sur un système automatique couplant un analyseur élémentaire de type CHN (Carbo Erba NA 1500) et un spectromètre de masse VG Sira 10 à collecteur et double introduction. Les analyses sont faites de façon séquentielle et par comparaison avec une référence elle-même calibrée par rapport au standard international PDB. Les analyses sont exprimées selon la notation classique :

$$\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{R}_{\text{éché.}} / {}^{13}\text{R}_{\text{stand.}}) - 1] \cdot 1000, \quad \text{où } {}^{13}\text{R} = {}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C}.$$

IV. RÉSULTATS. — 1. *Carbone total* (pl., 1). — Le faible taux de carbone de l'horizon de surface (6,6 ‰) est typique des sols ferrallitiques sableux du littoral congolais. A 25 cm, il n'est plus que de 3 ‰, et à 125 cm de 1 ‰. La décroissance avec la profondeur est ensuite lente mais régulière. Entre 3,8 et 4,7 m, le taux de carbone se stabilise à 0,7 ‰.

2. *Granulométrie* (pl., 2 et 3). — La teneur en argile est de 3-4 % dans les 30 cm supérieurs. Elle augmente rapidement pour se stabiliser entre 9 et 11 %. Ce type de distribution est caractéristique des sols appauvris. Le rapport sable grossier/sable fin est constant sur le profil (60/40), ce qui témoigne de l'homogénéité du matériau-sol.

3. *Mesure du $\delta^{13}\text{C}$* . — Le profil ^{13}C du sol étudié (A, pl., 4) présente d'importantes variations avec la profondeur. De 0 à 50 cm, le $\delta^{13}\text{C}$, constant ($-13,2\text{‰}$), est typique des écosystèmes dominés par des plantes en C_4 (graminées tropicales ([1], [5], [6])). De 50 à 180 cm, le $\delta^{13}\text{C}$ décroît régulièrement jusqu'à la valeur de $-23,9\text{‰}$; à partir de 300 cm, il se stabilise à $-24,7\text{‰}$, valeur proche des écosystèmes en C_3 , supposés forestiers, dans la mesure où des savanes dominées par des graminées en C_3 sont inconnues à basse altitude en Afrique Centrale à l'Holocène. Dans le profil témoin modal (B, pl., 4), la composition isotopique, de l'ordre de -27‰ en surface, s'enrichit régulièrement mais faiblement pour atteindre -25‰ à 2 m de profondeur. On constate ainsi que dans leur partie profonde, le sol de savane étudié (A) et le sol forestier témoin (B) présentent des compositions isotopiques quasiment identiques. Dans le sol (A), le $\delta^{13}\text{C}$ des racines récoltées à 4,6 m de profondeur diffère radicalement de celui de la matière organique des horizons profonds : il est de $-12,2\text{‰}$, valeur de plante en C_4 .

4. *Mesures d'âge par le ^{14}C* (pl., 4 et 5). — L'accroissement des âges moyens du carbone avec la profondeur n'est pas linéaire, mais obéit à une courbe d'allure sigmoïde. A 50 cm de profondeur, l'âge moyen mesuré n'est que de 60 ± 50 B.P. Il s'accroît ensuite très rapidement jusqu'à environ 8 200 B.P. L'âge moyen mesuré à 3 m ($8\,300 \pm 90$ B.P.) n'est statistiquement pas différent de celui mesuré à 4,7 m ($8\,160 \pm 70$ B.P.).

V. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION. — Les matières organiques des sols sont hétérochrones par nature, car résultant du bilan entre les apports, plus ou moins continus au cours du temps, et les pertes par minéralisation ou solubilisation. Parmi les hypothèses susceptibles de rendre compte de la distribution des âges différents des matières organiques à chaque niveau du sol, celle de la distribution en deux compartiment ([7], [8]) s'applique particulièrement bien aux sols pédoturbés. Ce modèle est fondé sur l'existence d'un compartiment formé de matières organiques très labiles, se renouvelant constamment et rapidement, et d'un compartiment formé de matière inertes. L'âge apparent des premières est faible, quelques dizaines d'années; celui des secondes est pluri-millénaire. La répartition de la matière organique dans ces compartiments dépend de la profondeur. Ceci permet de comprendre les profils ^{14}C et ^{13}C analysés.

1. *Profil ^{14}C* . — Dans les 50 cm supérieurs du sol, c'est-à-dire la rhizosphère graminéenne, le premier compartiment prédomine et l'âge apparent global est très faible. A l'inverse, à partir de 3 m de profondeur, ne subsistent que des matières appartenant au second compartiment, dont l'âge élevé les apparente à des matières fossilisées. Dans la zone intermédiaire, il y a mélange entre ces deux pôles, avec prédominance de l'un ou l'autre des compartiments selon que l'on se rapproche de la surface ou de la profondeur. La confirmation d'une hypothèse de mélange entre une matière organique inerte, ici d'âge apparent 8 200 ans, et une matière jeune, dont la quantité va croissant lorsqu'on tend vers la surface, est attestée par l'allure de la courbe $\delta^{14}\text{C} = f(1/C)$ (fig. 2), toujours rectiligne dans ce cas [7]. Dans cette zone où s'effectue le mélange entre les deux types de matières organiques, le gradient d'âge croissant avec la profondeur est comparable à celui de différents sols (pl., 5) de pays à climat tempéré ou continental [3].

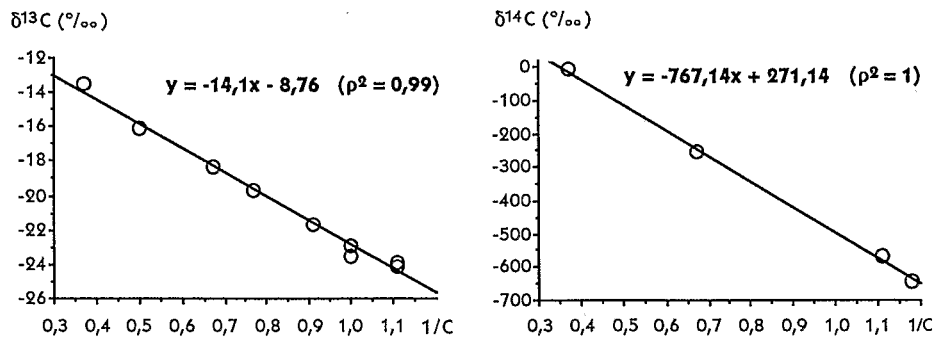


Fig. 2. — Courbes $\delta^{13}\text{C}=f(1/C)$ et $\delta^{14}\text{C}=f(1/C)$ entre 0,5 et 3 m de profondeur.

Fig. 2. — $\delta^{13}\text{C}=f(1/C)$ and $\delta^{14}\text{C}=f(1/C)$ graphs between 0.5 and 3 m in depth.

2. Profil ^{13}C . — Le profil $\delta^{13}\text{C}$ témoigne du remplacement d'une forêt ancienne par une savane plus récente. La coexistence de deux compartiments organiques, l'un forestier et ancien, l'autre de savane et récent, est de même attestée par le caractère linéaire de la courbe $\delta^{13}\text{C}=f(1/C)$ entre 0,5 et 3 m (fig. 2). Bien que les dates ^{14}C intègrent l'âge de matières plus anciennes et plus récentes que l'âge moyen, on peut admettre que le milieu était forestier vers 8 000 B.P. Par contre, les âges moyens obtenus ne permettent pas de dater le remplacement de la forêt. L'étude des podzols et tourbes du littoral, à quelques kilomètres de là, a cependant mis en évidence une rupture majeure de végétation vers 3 000 B.P. ([9], [10]), probablement synchrone de l'événement enregistré ici. Malgré l'ancienneté relative de la savane, la matière organique des plantes en C_4 n'a pratiquement pas interféré avec la matière organique forestière dans les couches profondes du sol, comme le prouve le $\delta^{13}\text{C}$ des racines ($-12,2$ ‰) prélevées à 4,7 m de profondeur.

VI. CONCLUSIONS. — Les résultats exposés ici sont importants à deux titres.

1. Paléoécologie. — La conjonction des résultats obtenus sur les podzols, les tourbes et les sols ferrallitiques montre qu'à l'Holocène inférieur, la forêt occupait non seulement la plaine littorale, zone basse soumise à l'influence d'une nappe d'eau, mais sans doute tout l'ensemble des plateaux et collines compris entre le littoral et le massif montagneux du Mayombe (fig. 1). Les savanes, qui occupent actuellement de vastes étendues dans cette région, semblent être des créations consécutives à l'assèchement climatique de 3 000 B.P., entretenues ensuite par une action anthropique devenue plus importante avec l'arrivée des populations bantou, pratiquant le brûlis à grande échelle [11].

2. Pédologie et biologie du sol. — La distribution des âges de la matière organique analysée ne diffère guère de celles citées dans la bibliographie. Le gradient d'âge est du même ordre de grandeur, 4 à 5 000 ans/m. Le modèle bicompartimental de répartition de la matière organique, établi sur des sols bruns du Jura ([7], [8]) s'applique particulièrement bien ici : la parfaite linéarité des courbes $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{14}\text{C}=f(1/C)$ en est la preuve. On a, dans la tranche de sol comprise entre 3 m et la surface, un mélange entre une matière organique stable, forestière, d'âge moyen 8 200 ans, et une matière savanicole, d'âge moyen peu élevé en raison de son turn-over rapide, qui se renouvelle constamment depuis sans doute 3 000 ans. Ce mélange est lié à l'activité biologique du sol, qui ne s'exerce cependant pas de façon uniforme, comme en témoigne la rupture enregistrée vers 50 cm de profondeur dans les profils ^{13}C et ^{14}C du sol. Il y a dans la tranche de sol supérieure une activité plus marquée qu'ailleurs, sans doute liée à un effet rhizosphérique, mais surtout à l'action de termites humivores (*Cubitermes* sp.), dont la zone d'activité

correspond précisément à cette limite, et dont l'abondance peut être déduite par observation directe et par la densité de leurs termitières. Ceci s'oppose aux phénomènes observés en dessous de 2 m de profondeur. Bien que le sol analysé soit profondément marqué par la bioturbation jusqu'à sa base (galeries de termites, observation directe de ces insectes, présence de taches de matériau provenant d'autres horizons, présence de racines, . . .), il ne semble pas que cette action affecte la nature de la matière organique ancienne : on devrait alors observer des âges apparents moins élevés, et surtout un $\delta^{13}\text{C}$ beaucoup plus marqué par l'influence C_4 des écosystème qui occupent l'espace depuis 3 000 ans. Plusieurs explications peuvent rendre compte de ce fait : soit que la quantité de matière organique fraîche mise en jeu dans ces horizons profonds est sans commune mesure avec le stock de matières humifiées anciennes, soit que les matières organiques fraîches issues des plantes en C_4 impriment moins leur marque au sol que celle des plantes en C_3 , en raison d'une labilité extrême, soit enfin que les matières organiques anciennes ne sont pas affectées par le transit du matériau-sol dans l'appareil digestif des termites qui s'en servent pour construire leurs galeries et termitières, ce qui va dans le même sens que des observations faites en Côte-d'Ivoire sur des vers de terre à l'aide de substrats marqués [12]. Quoi qu'il en soit, il semble bien que dans ces horizons profonds, la matière organique puisse évoluer dans le sens d'une fossilisation progressive.

Ces recherches ont été financées par les UR *Paléoclimats tropicaux* et *Diversité biologique et systèmes forestiers* de l'ORSTOM, dans le cadre du programme C.N.R.S./ORSTOM ECOFIT, ainsi que par le M.R.S. (contrat n° 88 L0625) et l'I.N.R.A. (U.R.A. n° 196 du C.N.R.S.).

Note remise le 29 juin 1992, acceptée après révision le 29 septembre 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

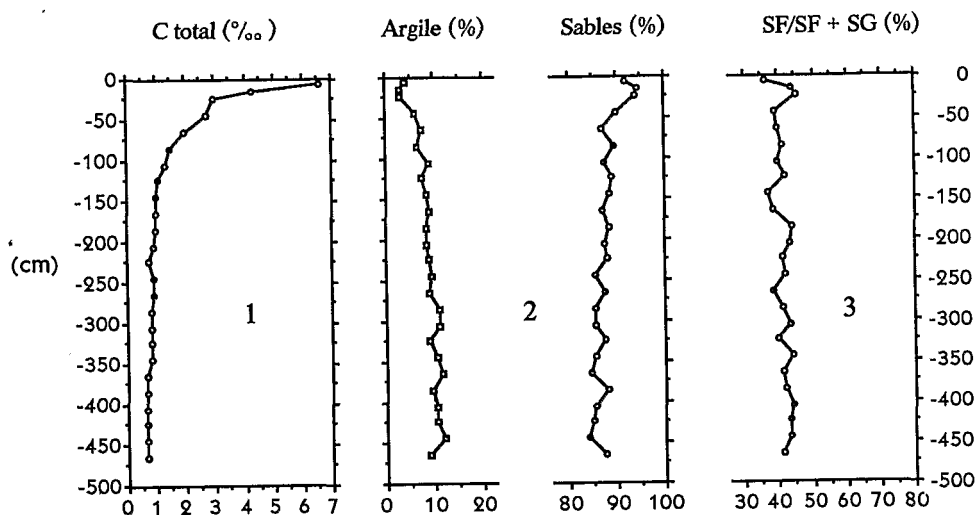
- [1] D. SCHWARTZ, A. MARIOTTI, R. LANFRANCHI et B. GUILLET, *Geoderma*, 39, 2, 1986, p. 97-103.
- [2] P. DE BOISSEZON, C. MOUREAUX, G. BOQUEL et G. BACHELIER, *Les sols ferrallitiques*, I.D.T. n° 21, ORSTOM, Paris, 1973, 146 p.
- [3] Données compilées par B. GUILLET in M. BONNEAU et B. SOUCHIER éd., *Pédologie*, 2, Masson, Paris, 1979, p. 210-226, par J. BALESDENT et B. GUILLET, *Science du Sol*, 20, 2, 1982, p. 93-112, et par D. SCHWARTZ, Thèse publiée in collect. *Études et Thèses*, ORSTOM, Paris, 1985, 285 p.
- [4] R. JAMET et J. M. RIEFFEL, *Carte pédolog. du Congo*, Not. n° 65, ORSTOM, Paris, 1976, 167 p. + cartes.
- [5] P. DEINES in P. FRITZ et J. C. FONTES éd., *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, 1, Elsevier, Amsterdam, 1980, p. 329-406.
- [6] A. MARIOTTI, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 1991 (à paraître).
- [7] J. BALESDENT, *Thèse*, Univ. Nancy-I, 1982, 90 p.
- [8] J. BALESDENT et B. GUILLET, *Science du Sol.*, 20, 2, 1982, p. 93-112.
- [9] R. DECHAMPS, B. GUILLET et D. SCHWARTZ, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, série II, 1988, p. 615-618.
- [10] H. ELENGA, D. SCHWARTZ et A. VINCENS, *Bull. Soc. géol. Fr.*, 163, 1, 1992, p. 83-90.
- [11] D. SCHWARTZ, *Bull. Soc. géol. Fr.*, 163, 3, 1992, p. 153-161.
- [12] A. MARTIN, A. MARIOTTI, J. BALESDENT et P. LAVELLE, *Ecology*, 1991 (sous presse); A. MARTIN, A. MARIOTTI et J. BALESDENT, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 1991 (à paraître).

D. S. : ORSTOM, Laboratoire de Pédologie et de Géologie du Quaternaire,
B.P. 1286, Pointe Noire, Congo;

A. M. : Laboratoire de Biogéochimie isotopique, Université Pierre-et-Marie-Curie,
I.N.R.A., C.N.R.S.-U.R.A. 196, B.P. n° 120,
4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05;

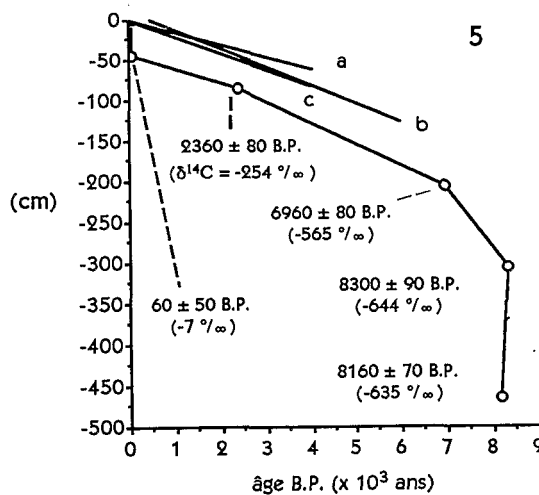
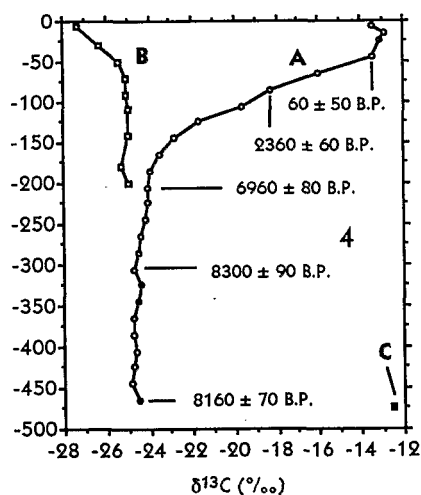
C. T. et B. G. : C.N.R.S./U.R.A. n° 724, Laboratoire de Géochimie organique,
Université d'Orléans, B.P. n° 6759, 45067 Orléans Cedex 2;

K. V. D. B. : Université d'Utrecht, Département de Physique nucléaire,
Princetonplein 5, Utrecht, Pays-Bas.



Évolution avec la profondeur, de la teneur en carbone total (1), en argile et sables totaux (2), et des proportions sables fins (SF = 50-200 μm)-sables grossiers (SG = 200-2 000 μm).

Variation with depth of the total carbon content (1), clay and sands contents (2) and of the fine sand (SF)-coarse sand (SG) proportion.



(4) : Évolution du $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de la profondeur dans le sol étudié (A), un sol témoin sous forêt ombrophile (B) et (C) dans des racines du sol A; (5) : évolution des âges moyens de la matière organique dans le profil étudié, et dans un andisol (a), un vertisol (b) et un sol brun (c).

(4): Evolution of the $\delta^{13}\text{C}$ with depth in (A) the studied soil, a comparative forest soil (B) and (C) in roots of the studied soil; (5): evolution of the mean age of organic matter in the studied soil, and in an andisol (a), a vertisol (b) and a brown soil (c).

