

Distribution de l'isotope ^{13}C dans des sols ferrallitiques du Brésil

Thierry DESJARDINS (1), Francis ANDREUX (1), Boris VOLKOFF (2), Carlos CERRI (3)

(1) Centre de Pédologie Biologique du CNRS, associé à l'Université de Nancy I
17, rue Notre-Dame-des-Pauvres, B.P. 5, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

(2) Orstom, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy.

(3) Université de São Paulo, Centro da Energia Nuclear na Agricultura, CP 96, 13400 Piracicaba, SP, Brésil.

RÉSUMÉ

Les variations des abondances naturelles en ^{13}C avec la profondeur sont étudiées dans treize sols ferrallitiques et deux sols fersiallitiques du Brésil. Trois types de distribution du ^{13}C ont été mis en évidence. Pour le premier (groupe A), un fractionnement isotopique intervenant au cours de l'humification semble devoir expliquer l'enrichissement modéré et progressif en ^{13}C observé avec la profondeur. Pour le second (groupe B), il apparaît plus plausible que la matière organique des horizons de profondeur soit le témoin d'une végétation antérieure composée majoritairement d'espèces de cycle photosynthétique en C_4 . Pour les sols du groupe C, le profil isotopique semble résulter de l'humification d'une végétation principalement en C_4 mais on ne peut exclure l'existence de proportions variables de matière organique héritée d'une végétation en C_3 , en particulier en profondeur.

MOTS CLÉS : Brésil – ^{13}C – Sols ferrallitiques – Humification – Végétations tropicales – Climats.

ABSTRACT

DISTRIBUTION OF ^{13}C ISOTOPE IN SELECTED FERRALLITIC SOILS FROM BRAZIL

The variations with depth of ^{13}C natural abundance are studied in thirteen ferrallitic soils, and two fersiallitic soils from Brazil. Three patterns of $\delta^{13}\text{C}$ distribution are distinguished (fig. 2). In the first one (A), developed under forest of C_3 photosynthetic cycle, $\delta^{13}\text{C}$ values increase gradually with depth, with a weak amplitude of 2-3 δ units. In the second one (B), also under forest, this increase has a stronger amplitude (3.5-7 δ units), and occurs between 0.3 and 0.7 m. The soils of the third group (C) are under predominantly C_4 cycle vegetation, and show a clear increase in $\delta^{13}\text{C}$ values within the first 0.5 m, then a stabilization, followed by a further decrease in the deepest soil layers. In soils of group A, isotopic fractionation occurring during the humification of forest residues can explain the moderate increase in ^{13}C abundance with depth. In soils of group B, organic matter in deeper horizons probably derives from a past vegetation in which plants having a C_4 photosynthetic cycle predominated. In soils of group C, the ^{13}C profile possibly results from the humification of a predominantly C_4 cycle vegetation, however the contribution of variable proportion of C_3 cycle vegetation especially in depth cannot be discarded.

KEY WORDS : Brazil – ^{13}C – Ferrallitic soil – Humification – Tropical vegetation – Climate.

INTRODUCTION

La teneur en matière organique des sols est généralement exprimée par le pourcentage de carbone organique présent dans une couche d'épaisseur donnée, ou par la masse de ce carbone

accumulée sur l'unité de surface de même épaisseur. La succession de telles couches représente le profil organique du sol (BENNEMA, 1974). Au sein de chacune de ces couches, la composition isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ reflète la proportion de carbone

issue de sources végétales possédant des cycles photosynthétiques différents, principalement C₃ (forêts) et C₄ (graminées tropicales) ; (BARNES *et al.*, 1983 ; DZUREC *et al.*, 1985). Ainsi, si deux couvertures végétales présentant de telles différences se succèdent ou se mélangent, elles entraînent au sein des litières, puis des couches successives du sol, des modifications de composition isotopique décelables (O'BRIEN et STOUT, 1978 ; CERRI *et al.*, 1985 ; VITORELLO *et al.*, 1989).

Alors qu'on a actuellement une idée assez précise du profil organique des principaux types de sols (DABIN, 1980-1981 ; VOLKOFF et CERRI, 1988), on ne dispose encore que d'informations fragmentaires concernant leur profil de ¹³C. D'une manière générale, on observe un enrichissement progressif en ¹³C avec la profondeur dans les sols sous forêt où la végétation est essentiellement en C₃ et un appauvrissement plus ou moins marqué dans les sols de savane et de prairie où les graminées sont essentiellement en C₄ (VOLKOFF *et al.*, 1982 ; VOLKOFF et CERRI, 1987 ; GUILLET *et al.*, 1988).

Pour compléter cet inventaire, la présente étude vise à préciser sur un échantillonnage de quinze sols du Brésil les relations entre la composition

isotopique en ¹³C des matières organiques, le climat et le type de végétation.

LES SOLS ÉTUDIÉS

L'étude porte sur treize sols ferrallitiques avec ou sans gradient textural, faiblement à fortement désaturés, et deux sols fersiallitiques. Ils appartiennent aux principales zones bioclimatiques du Brésil et sont recouverts par plusieurs types de végétation (tabl. I et fig. 1). Pour chaque profil, de 4 à 13 échantillons ont été prélevés sur des profondeurs variant de 0,80 à 2,20 m. Les méthodes de prélèvement et d'analyse ont été décrites par DESJARDINS *et al.* (1991).

RÉSULTATS

Les profils de distribution des valeurs de δ¹³C ont été classés en trois groupes (fig. 2).

Groupe A

Les sept sols de ce groupe sont situés sous différents types de végétation forestière composée d'espèces en C₃, à raison de cinq sous forêt équatoriale, un sous forêt subtropicale, un sous forêt sèche. En

TABLEAU I
Les sols, les végétations et les climats
Soils, vegetations and climates

N° Code	Classification brésilienne	Classification française	Texture* (hor. de surface)	Végétation	Climat	Références
ABD1	Latossolo	Ferrallitique	Sableuse	Forêt décidue sèche	Tropical semi-aride	Soubiès et Chauvel, 1985
MAM5	Latossolo	"	Argileuse	Forêt ombrophile	Tropical humide	Volkoff <i>et al.</i> , 1982
GRO10	Latossolo	"	Sablo-argileuse	Forêt ombrophile	Tropical humide	Cerri, 1979
GRO1	Podzolico	"	Sablo-argileuse	Forêt ombrophile	Tropical humide	Cerri, 1979
LCP3	Podzolico	"	Sableuse	Forêt ombrophile	Tropical humide	Martins et Cerri, 1986
ALT3	Terra roxa estruturada	"	Argileuse	Forêt ombrophile	Tropical humide	Rocha, 1990
NA3	Cambissolo	"	Sableuse	Forêt ombrophile	Tropical humide	Higa, 1989
MMT4	Latossolo	"	Sablo-argileuse	Savane	Tropical à saisons contrastées	
MMS1	Latossolo	"	Argileuse	Savane	Tropical à saisons contrastées	
MSP3	Latossolo	"	Argileuse	Forêt mésophile	Subtropical	
MSP4	Latossolo	"	Argileuse	Forêt mésophile	Subtropical	Cerri, 1986
LOP3	Terra roxa estruturada	"	Argileuse	Forêt mésophile/ Forêt à Araucarias	Subtropical	Rocha, 1990
GPR1	Lat. intergr. Podz.	"	Sablo-argileuse	Forêt à Araucarias	Tempéré	Cerri, 1979
GRS9	Podzolico	Fersiallitique	Sableuse	Prairie	Tempéré	Cerri, 1979
GRS11	Podzolico	"	Sableuse	Prairie	Tempéré	Cerri 1979

* Les horizons B de tous ces sols ont une texture argileuse.

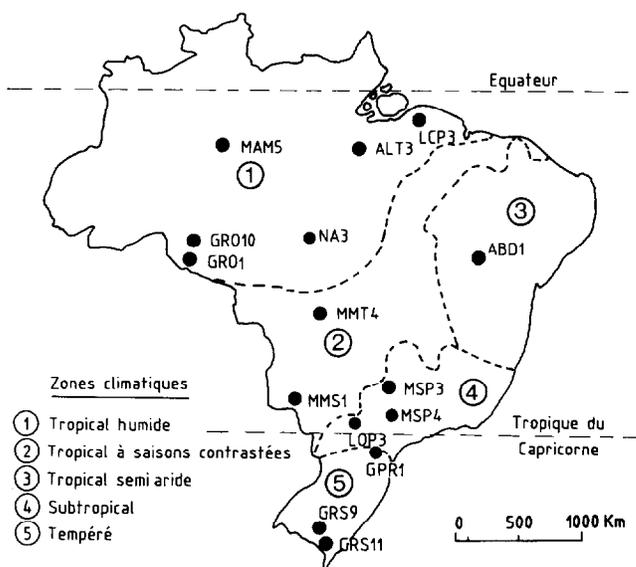


FIG. 1. – Localisation des sols étudiés.
Localization of studied soils.

surface les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont comprises entre $-28,5\text{‰}$ et $-25,2\text{‰}$. Dans tous les profils ces valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ présentent une augmentation limitée à 2 à 3 unités de la surface vers les horizons profonds. C'est entre la surface et les premiers horizons sous-jacents que s'observe l'essentiel de cette augmentation. Les différences de texture ne semblent pas en relation avec l'amplitude de cette augmentation.

Groupe B

Il s'agit également de sols situés sous différents types de végétation forestière à espèces en C_3 , l'un au sud de l'Amazonie et les trois autres sous le Tropique. La partie supérieure des profils présente des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et une évolution comparables à celles des sols du groupe A. En surface, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient entre $-28,3\text{‰}$ et $-25,2\text{‰}$. À une profondeur variable pour les quatre profils (entre 0,3 et 0,7 m), on observe une nette augmentation du $\delta^{13}\text{C}$. Elle est très accentuée pour deux des profils, et atteint 7 unités δ sur environ 0,3 m ; elle est un peu moins brutale pour les deux autres profils, respectivement 5 et 3,5 unités δ sur 0,45 m. Les valeurs maximales varient entre $-22,3\text{‰}$ et $-17,3\text{‰}$ (0,80m). La partie inférieure de ces profils présente une stabilisation, voire une légère diminution du $\delta^{13}\text{C}$.

Groupe C

Il s'agit de sols situés sous des végétations de savane ou de prairie, caractérisées par des propor-

tions plus ou moins importantes d'espèces végétales possédant un cycle photosynthétique en C_4 . En surface les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont comprises entre -21‰ et $-17,5\text{‰}$. On observe un enrichissement en isotope lourd assez prononcé dans les premiers décimètres des profils (sauf pour un des profils qui présente une variation très graduelle), conduisant à un maximum compris entre $-16,6\text{‰}$ et $-13,2\text{‰}$, situé à une profondeur variant entre 0,30 et 0,60 m. La partie inférieure des profils est caractérisée par une inversion de l'évolution, c'est-à-dire une diminution du $\delta^{13}\text{C}$ jusqu'à des valeurs parfois inférieures à celles de la surface.

DISCUSSION

Contrairement au profil de carbone organique des sols étudiés (DESJARDINS *et al.*, 1991), la distribution de leurs valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ ne peut se relier, pour une végétation de cycle photosynthétique donné, à un unique facteur climatique. Les résultats obtenus confirment les différences de composition isotopique de la matière organique des horizons de surface de sols situés sous une végétation C_3 ou C_4 (fig. 2). Lorsqu'on considère les variations avec la profondeur, on constate dans tous les cas sous forêt une augmentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$. Cette augmentation est soit faible et progressive, soit forte et rapide.

L'augmentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ avec la profondeur, observée pour les sols du groupe A (fig. 2) est d'une amplitude suffisamment faible et régulière pour représenter le résultat des processus d'humification (VOLKOFF et CERRI, 1987 ; ANDREUX *et al.*, 1990). Ceux-ci progressent en effet principalement par des réactions d'oxydation et de décarboxylation ; le CO_2 produit par voie chimique ou microbienne étant en général appauvri en ^{13}C de quelques unités δ par rapport aux composés dont il est issu (BLAIR *et al.*, 1985), on conçoit que les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ des matières organiques restantes tendent progressivement à augmenter. Toutefois, au sein du groupe A, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ observées le long des profils ne montrent pas de convergence vers une valeur commune à toutes les matières organiques humifiées de profondeur. On observe plutôt une évolution parallèle des courbes de $\delta^{13}\text{C}$: la différence existant en surface entre deux profils tend à se maintenir en profondeur. On ne sait cependant pas si l'on doit imputer ce phénomène uniquement à des différences de composition isotopique initiales des végétations, ou également

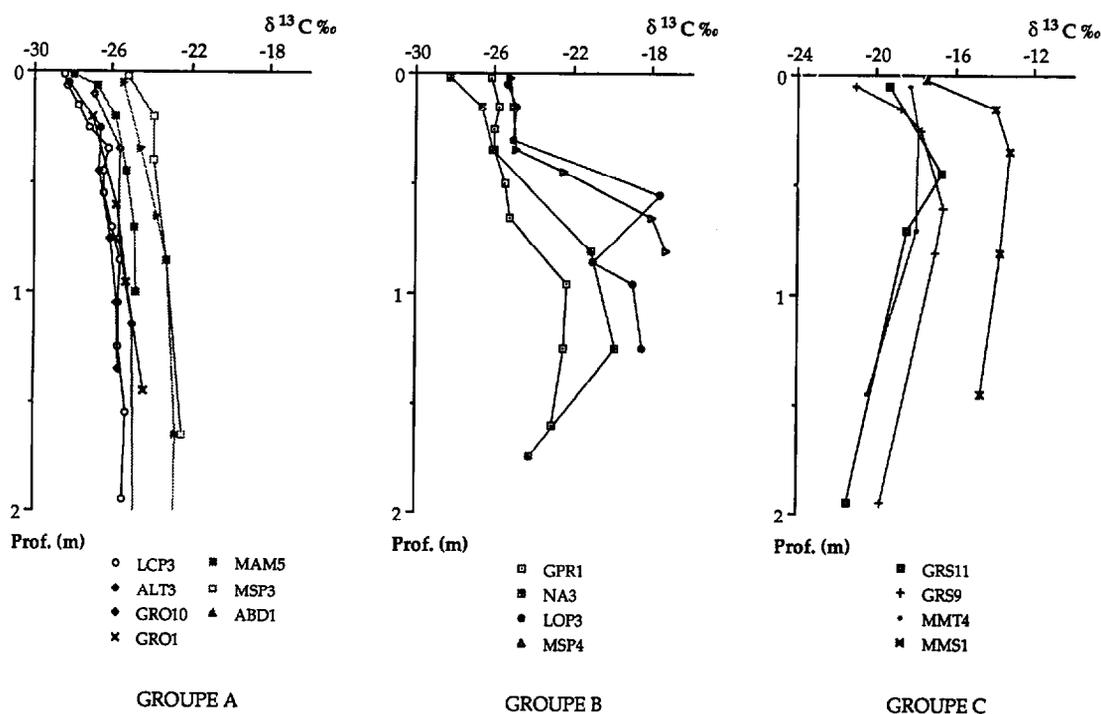


FIG. 2. – Distribution de l'isotope ^{13}C en fonction de la profondeur dans trois groupes de sols distingués selon la forme des courbes et le type de végétation.
Distribution of ^{13}C isotope with depth in three soils groups distinguished according to the shape of curves and the kind of vegetation.

aux conditions de milieu ayant présidé à leur humification.

Les sols du groupe B (fig. 2) présentent des variations fortes et rapides de $\delta^{13}\text{C}$. Ils sont assez semblables d'un point de vue pédogénétique aux sols du groupe A et situés sous des végétations et des climats actuels identiques. Les distributions de l'isotope ^{13}C sont cependant très différentes, et les seuls processus d'humification ne suffisent pas à les expliquer. L'hypothèse la plus probable est que les valeurs élevées de $\delta^{13}\text{C}$ observées en profondeur pour les sols de ce groupe seraient dues à la persistance d'une matière organique ancienne, humifiée et stable, issue d'une végétation antérieure en moyenne plus riche en ^{13}C que la végétation actuelle. Cette végétation passée serait proche de celle des « campos » et « cerrados » décrits dans les États du São Paulo et du Parana et considérés comme des reliques d'un climat plus aride que l'actuel (MAACK, 1968). Cette hypothèse est étayée par le fait que les sols du groupe B sont situés dans des régions ayant subi au cours du Quaternaire des alternances de climats secs et humides (AB'SABER, 1977). Une phase de forte ari-

dité aurait culminé il y a environ 8 000 ans (SERVANT *et al.*, 1989), voire plus récemment entre 6 000 et 3 000 ans (SOUBIÈS, 1980), entraînant une régression des forêts tropicales et subtropicales au profit de savanes et de prairies et il est probable qu'elle a laissé des traces dans les sols. Dans d'autres sites, notamment les sols du bassin amazonien, cet effet aurait été moins sensible ou moins durable, ce qui pourrait expliquer la plus grande régularité des profils du groupe A. L'évolution complexe de la distribution de l'isotope observée dans certains sols, avec une seconde valeur minimale du $\delta^{13}\text{C}$ en profondeur, pourrait être le résultat de plusieurs successions végétales, ou au moins de fluctuations marquées dans la distribution relative des plantes en C_3 et C_4 .

Dans les sols du groupe C, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des horizons les plus superficiels, nettement plus élevées que celles des deux autres groupes, ne reflètent cependant pas une prédominance exclusive de plantes en C_4 . L'augmentation rapide des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ dans le premier 0,50 m des sols de ce groupe pourrait s'expliquer par une décomposition de la matière organique issue des plantes en C_3

plus active que celle de la matière organique issue des plantes en C₄. Plus vraisemblablement, elle serait due à l'existence dans un passé récent d'une végétation plus exclusivement C₄. Dans la partie inférieure des profils de ce groupe, les valeurs de δ¹³C diminuent légèrement avec la profondeur ; on ne peut exclure que cela soit la marque d'une ancienne végétation de cycle C₃. Cependant, à la différence des sols du groupe B, cette évolution est régulière, sans variation brusque, et, comme pour les sols du groupe A, ne conduit pas à une valeur commune aux quatre profils en profondeur.

CONCLUSION

L'inventaire réalisé a mis en évidence l'existence de plusieurs types de distribution de l'isotope ¹³C dans les sols ferrallitiques du Brésil. La distribution du ¹³C dans les horizons de surface dépend essentiellement de la végétation actuelle et de la répartition entre plantes de cycle photosynthétique C₃ ou C₄ qu'elle présente. En profondeur pour un certain nombre de sols forestiers, notamment en Amazonie, l'augmentation régulière et de faible amplitude des

valeurs de δ¹³C est limitée à 1-3 unités δ et peut n'être que le résultat d'un fractionnement isotopique dû à l'humification. Cependant pour certains sols actuellement recouverts par des végétations forestières, échantillonnés dans la région sud-est et dans la partie méridionale de l'Amazonie, un ou plusieurs maxima des valeurs de δ¹³C sont observés entre 0,50 et 1,50 m. Une telle distribution indique que la matière organique des horizons de profondeur est le témoin de phases plus ou moins longues durant lesquelles une végétation de cycle photosynthétique en C₄ a pu prédominer. La concordance entre ces phases et les périodes plus arides reconstruites par les paléoclimatologistes ne pourra être établie que par le couplage des méthodes isotopiques ¹³C et ¹⁴C. En revanche, dans les sols sous prairie et savane actuelles, on observe que la composition isotopique des matières organiques de surface est due à la prépondérance d'espèces végétales à cycle C₄, tandis qu'en profondeur ont pu subsister des matières organiques anciennes issues d'une végétation de cycle à dominante C₃.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 12 décembre 1992.

BIBLIOGRAPHIE

- AB'SABER (A.N.), 1977. – Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na America do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. Universidade São Paulo, Instituto de Geografia, *Paleoclimas* 3 : 1-19.
- ANDREUX (F.), CERRI (C.), VOSE (P.B.), VITORELLO (V.A.), 1990. – Potential of stable isotope, ¹⁵N and ¹³C, methods for determining input and turnover in soils. In : Harrison A.F., Ineson P. et Heal O.W. Eds, *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Elsevier applied science, London and New York : 259-275.
- BARNES (P.W.), TIESZEN (L.L.), ODE (D.J.), 1983. – Distribution, production and diversity of C₃ and C₄ dominated communities in a mixed prairie. *Canadian Journal of Botany*, 61 : 741-751.
- BENNEMA (J.), 1974. – Organic carbon profiles in oxisols. *Pédologie*, XXIV, 2 : 119-146.
- BLAIR (N.), LEU (A.), MUNOZ (E.), OLSEN (J.), KWONG (E.), DES MARAIS (D.), 1985. – Carbon isotope fractionation in heterotrophic microbial metabolism. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50 : 996-1001.
- CERRI (C.C.), 1979. – *Alteração e pedogênese em áreas graníticas situadas sob diferentes condições climáticas encontradas no Brasil*. Thèse Doc. ESALQ-USP Piracicaba, 233 p.
- CERRI (C.C.), 1986. – *Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana de açúcar*. Thèse Livre Docência, ESALQ-USP Piracicaba, 197 p.
- CERRI (C.C.), FELLER (C.), BALESDENT (J.), VICTORIA (R.), PLENNECASSAGNE (A.), 1985. – Application du traçage isotopique naturel en ¹³C à l'étude de la matière organique dans les sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 300, série II : 423-428.
- DABIN (B.), 1980-1981. – Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XVIII, 3-4 : 197-215.
- DESJARDINS (T.), VOLKOFF (B.), ANDREUX (F.), CERRI (C.C.), 1991. – Distribution du carbone total et de l'isotope ¹³C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Science du sol*, 29 : 175-187.
- DZUREC (R.S.), BOUTTON (T.W.), CALDWELL (M.M.), SMITH (B.N.), 1985. – Carbon isotopic ratios of soil organic matter and their use in assessing community composition change in Curlew Valley, Utah. *Oecologia*, 66 : 17-24.
- GUILLET (B.), FAIVRE (P.), MARIOTTI (A.), KHOBZI (J.), 1988. – The ¹⁴C dates and ¹³C/¹²C ratios of soil organic matter as a mean of studying the past vegetation in intertropical regions : examples from Colombia (South America). *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 65 : 51-58.

- HIGA (N.T.), 1989. – *Caracterização das fases sólida e líquida de solos e areias derivados do granito sob floresta tropical amazônica (Terra nova do norte – MT)*. Thèse Doct., Universidade São Paulo, 237 p.
- MAACK (R.), 1968. – O revestimento vegetal do Estado do Parana. In : *Geografia física do estado do Parana*. Universidade federal do Parana : 192-247.
- MARTINS (P.F.), CERRI (C.C.), 1986 – O solo de um ecossistema natural de floresta localizado na Amazônia oriental. I. Caracterização química e física. In : *Anais do simpósio do Trópico Umido*. EMBRAPA/CPATU, 1, Belém, Brasil, 1984 : 271-286.
- O'BRIEN (B.J.), STOUT (J.D.), 1978. – Movement and turnover of soil organic matter as indicated by carbon isotope measurement. *Soil Biol. Biochem.*, 10 : 309-317.
- ROCHA (G.C.), 1990. – *Características e dinâmica de coberturas pedológicas sobre rochas básicas nas regiões Norte e Sul do Brasil*. Thèse Doct., Universidade São Paulo, 246 p.
- SERVANT (M.), FOURNIER (M.), SOUBIÈS (F.), SUGUIO (K.), TURCO (B.), 1989. – Sécheresse holocène au Brésil (18-20° latitude sud). Implications paléométéorologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 309, Série II : 153-156.
- SOUBIÈS (F.), 1980. – Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons dans les sols (6 000-3 000 ans B.P.). *Cah. Orstom, sér. Géol.* vol. XI, 1 : 133-148.
- SOUBIÈS (F.), CHAUVEL (A.), 1985. – Présentation de quelques systèmes de sols observés au Brésil. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XXI : 237-251.
- VITORELLO (V.), CERRI (C.C.), ANDREUX (F.), FELLER (C.), VICTORIA (R.), 1989. – Organic matter and natural carbon-13 distribution in forested and cultivated oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 773-778.
- VOLKOFF (B.), MATSUI (E.), CERRI (C.), 1982. – Discriminação isotópica do carbono nos humus de latossolos e podzóis na região amazônica do Brasil. In : *Proc. of the regional colloquium on soil organic matter*, Piracicaba, Brasil, CENA-Promocet : 147-153.
- VOLKOFF (B.), CERRI (C.), 1987. – Carbon isotopic fractionation in subtropical Brazilian grassland soils. Comparison with tropical forest soil. *Plant and soil*, 102 : 27-31.
- VOLKOFF (B.), CERRI (C.), 1988. – L'humus des sols du Brésil. Nature et relations avec l'environnement. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXIV, 2 : 83-95.