

30

Changements de la végétation dans l'État du Rondonia, région amazonienne du sud du Brésil, d'après les isotopes du carbone des sols

LUIS CARLOS PESSENDA, MARIA B. M. GOMES, RAMON ARAVENA, ADAUTO S. RIBEIRO, RENÉ BOULET, SUSY E. M. GOUVEIA

Introduction

La région amazonienne constitue un écosystème-clé étudié dans le cadre du Programme de recherche sur les changements globaux. La grande partie des efforts de recherche a été focalisée sur la compréhension des relations qui existent entre les changements de climat et l'ancienne végétation de la région amazonienne durant le Quaternaire (Liu et Colinvaux, 1985 ; Bush et Colinvaux, 1988 ; Markgraf, 1989 ; Absy *et al.*, 1991). Les reconstructions paléoenvironnementales ont été effectuées à partir de sédiments tourbeux et lacustres et reposent sur l'étude de nombreux indicateurs tels que les pollens, la géochimie et les datations par le radiocarbone. Les études sur les dynamiques de la matière organique des sols utilisant les isotopes du carbone comme indicateurs ont aussi été appliquées avec succès dans différentes parties du monde ; elles ont permis de relier les changements de la végétation au climat durant le Quaternaire récent (Krishnamurthy *et al.*, 1982 ; Schwartz *et al.*, 1986 ; Schwartz, 1988 ; Guillet *et al.*, 1988 ; Ambrose et Sikes, 1991). Cette approche a également été utilisée dans différentes parties du Brésil pour fournir des informations sur les changements de la végétation (Volkoff et Cerri, 1987 ; Desjardins *et al.*, 1991 ; Victoria *et al.*, 1995 ; Pessenda *et al.*, sous presse, *a* et *b* ; Martinelli *et al.*, sous presse). L'application des isotopes du carbone dans le bassin amazonien à des fins de reconstruction paléoenvironnementale est basée sur la différence de composition isotopique du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de plantes dont le cycle de photosynthèse est en C_3 ou en C_4 (Smith et Epstein, 1971 ; Boutton, 1991). La conservation des caractéristiques isotopiques dans la

matière organique des sols fait que cette application est potentiellement très pertinente pour déterminer l'existence des plantes en C_4 dans la région amazonienne (Martinelli *et al.*, 1991).

Cet article présente des données collectées le long d'un transect qui recoupe quatre différents types de communautés végétales représentatifs de la diversité des écosystèmes dans la région amazonienne : une savane (Cerrado), une savane arborée (Cerradão), une transition Cerradão/forêt et une forêt tropicale. Les méthodologies d'analyses des isotopes du carbone ont été appliquées à l'évaluation des changements des communautés végétales pendant l'Holocène, spécialement pour les écosystèmes Cerrado et Cerradão. Ces communautés végétales seraient plus sensibles aux changements du climat, par conséquent les sols de ces régions devraient préserver des informations sur les changements des végétations passées. De telles informations peuvent être utilisées pour étudier les relations entre les changements climatiques et leurs impacts sur les communautés végétales.

Matériel et méthodes

Le site étudié

La région étudiée est située dans l'État du Rondonia, dans la partie nord-ouest du Brésil (Figure 1). Les sites d'échantillonnage représentatifs de la végétation du Cerrado sont situés à proximité de Vilhena ($12^{\circ} 42' \text{ S}$; $66^{\circ} 07' \text{ O}$) (Godland et Polard, 1973) ; la végétation du Cerradão est représentée à Pimenta Bueno (site de transition) ($11^{\circ} 49' \text{ S}$; $61^{\circ} 10' \text{ O}$), et celle de la forêt naturelle ($11^{\circ} 46' \text{ S}$; $61^{\circ} 15' \text{ O}$) à proximité d'Ariquemes (10°

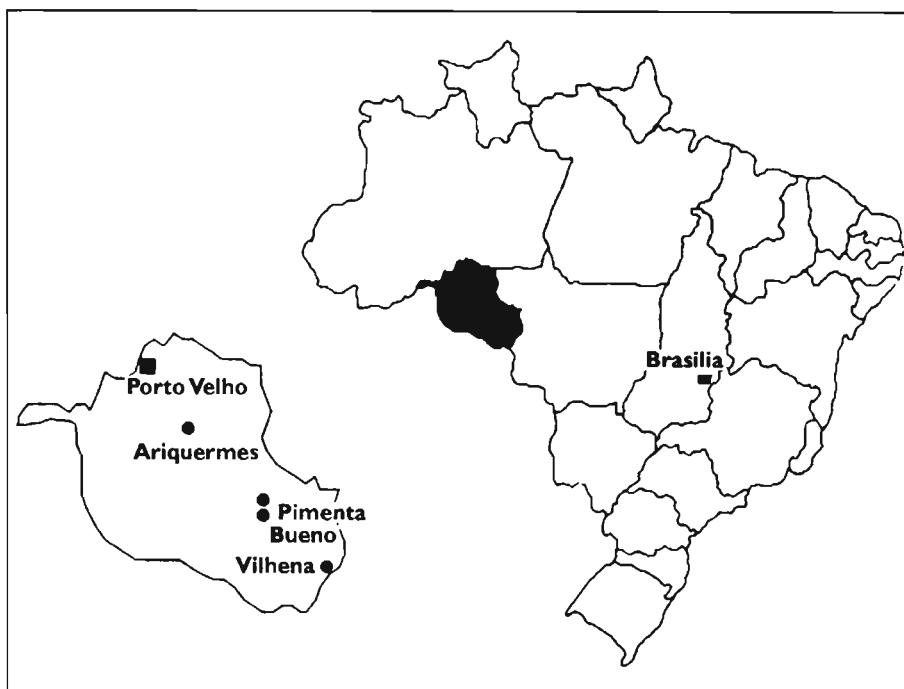


Figure 1 Carte du Brésil montrant les sites étudiés dans l'État de Rondonia et la capitale Porto Velho.

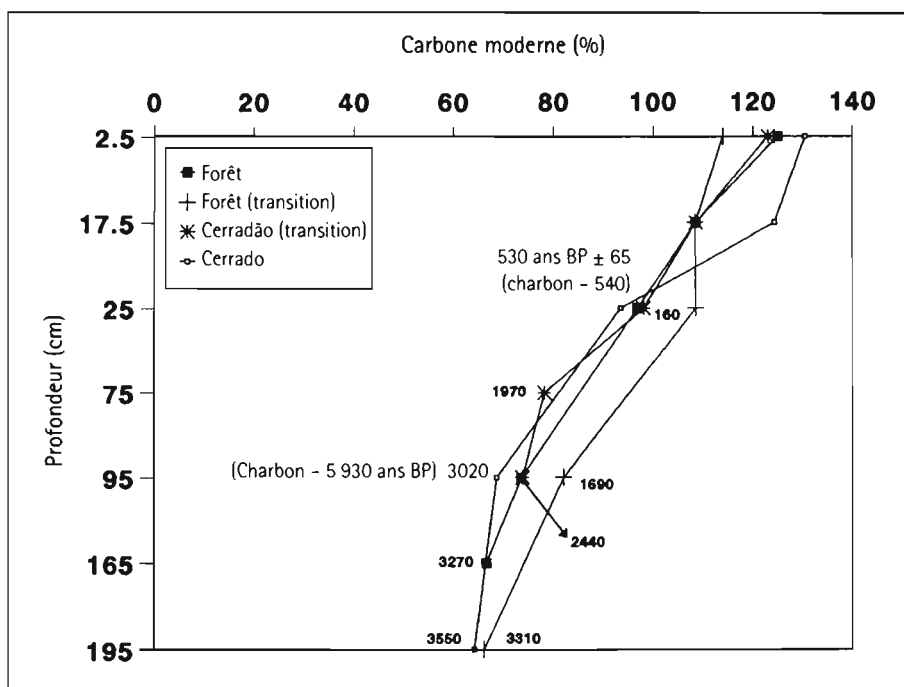


Figure 2 Datations radiocarbones sur SOM total et sur charbons.

10° S ; 62° 49' O) (Figure 1). Les sols sont respectivement, selon la classification brésilienne, des latosols : Vermelho-Amarelo, Vermelho-Escuro et Amarelo ; des oxisols selon la classification taxonomique des sols ; et des podzols : Vermelho-Amarelo et des ultisols.

Échantillonnage et aspects analytiques

Les échantillons de sols ont été prélevés dans des fosses effectuées dans chacun des quatre différents types de communauté végétale. L'échantillonnage des sols implique la collecte de plus de 10 kg de matériel à 10 cm d'intervalle jusqu'à une profondeur maximum de 2 m. Les échantillons sont séchés à 60 °C jusqu'à un poids constant, les racines et les restes de plantes sont triés à

la main. Tous les débris de plantes sont enlevés par flottaison dans HCl 0.01 M, séchés à poids constant et tamisés. La fraction de sol inférieure à 0,105 mm (sol total) est utilisée pour les analyses de ¹³C and ¹⁴C. Les échantillons de charbons ont aussi été collectés pour des analyses d'isotopes du carbone. Une description détaillée du traitement chimique pour les sols et les charbons pourra être consultée dans Pessenda *et al.* (a et b, sous presse).

Les analyses ¹⁴C sur les échantillons de sol total et sur les charbons ont été effectuées au Laboratoire de radiocarbones du Centro de energia nuclear na agricultura (CENA), en suivant la procédure standard pour le comptage en scintillation liquide (Pessenda et Camargo, 1991). Le ¹⁴C sur petits échantillons de charbons a été

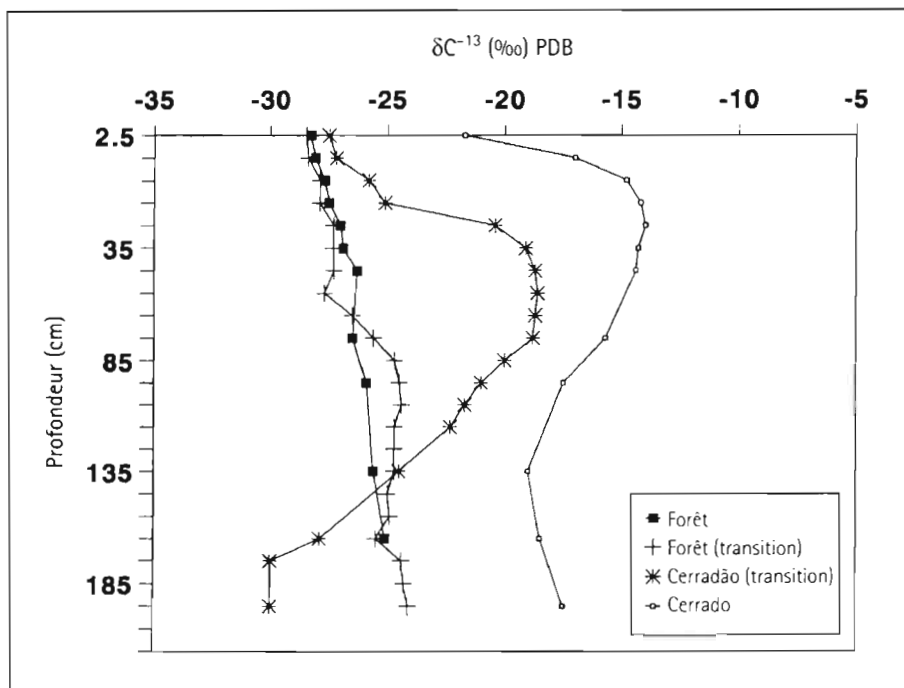


Figure 3
Variation naturelle du $\delta^{13}\text{C}$
en relation avec la profondeur.

analysé au laboratoire d'isotopes de l'Université de Toronto, en utilisant la technique AMS; les analyses ^{13}C sur échantillons de sol et de plante ont été effectuées au laboratoire d'isotopes (Environmental Isotopes Laboratory) de l'Université de Waterloo, Ontario, Canada. Les données radiocarbones sont reportées en pour cent par rapport au carbone moderne (pmc) et les âges radiocarbones en ans BP. Les données ^{13}C sont exprimées en δ pour mille (‰).

Les teneurs en carbone des échantillons de sols ont été mesurées dans la section de chimie des sols du CENA, par combustion dans un auto-analyseur de carbone et par la méthode de digestion humide. Elles sont exprimées en pour cent.

Résultats et discussion

Propriétés des sols

Les analyses granulométriques indiquent que les sols étudiés sont essentiellement constitués d'argile, de silts et de sables. (Gomez, 1995). La quantité d'argile est comprise entre 20 % and 34 % dans les horizons de surface et s'accroît à 57 % dans la zone la plus profonde des sols représentatifs de la forêt, de la transition à la forêt et du Cerrado. Le site représentatif du Cerradão montre une teneur plus élevée en argile allant de 53 % à 78 %, de la partie superficielle à la partie la plus profonde du sol.

La teneur en carbone révèle des profils de sol typiques avec une teneur décroissante avec la profondeur qui se situe entre 1,9 et 5 % dans les horizons de surface et décroît dans les horizons plus profonds jusqu'à atteindre une valeur de 0,30 % (Gomez, 1995). La teneur la plus élevée en carbone (entre 5 % à la surface et 0,8 % dans la zone la plus profonde) est observée dans le Cerrado. Ce fait pourrait être relié à la présence de restes de charbons observés le long de la plupart des profils de sols dans ce site.

Les données sur les isotopes du carbone et le radiocarbonate

Les données sur le radiocarbonate présentées dans la Figure 2 correspondent principalement au SOM total, aucune tentative n'a été faite pour dater la fraction humique en utilisant les techniques conventionnelles du ^{14}C en raison de la trop faible teneur en carbone des sols étudiés. Les données de ^{14}C avec des valeurs entre 130 and 109 pmc, montrent clairement l'influence du ^{14}C des explosions atomiques aériennes dans les trente premiers centimètres du profil du sol. La pénétration du carbone de la bombe est plus prononcée dans les sites de transition à la forêt. Les dates les plus anciennes dans la partie la plus basse du profil de sol sont de l'ordre de 3 500 ans BP. Alors que SOM est un mélange de carbone récent et ancien, cet âge pourrait correspondre à l'âge minimum du carbone présent dans ces profils. Les données radiocarbones des échantillons de charbons dans le site du Cerrado, qui peuvent être utilisées pour mieux cerner le temps représenté dans les profils de sol, montrent un âge radiocarbonate de 530 ans à 20-30 cm et de 5 930 ans à 90-100 cm. La date obtenue sur le charbon situé à faible profondeur se corrèle très bien avec la date obtenue sur le SOM. La date obtenue sur le charbon à plus forte profondeur est d'environ 2 000 ans supérieure à celle obtenue sur le SOM et l'on pourrait penser que la date sur charbon représente l'âge maximum du carbone à 1 m. Cela implique que le ^{13}C dans 2 m du profil du sol présenté dans ce papier pourrait représenter au moins les changements de la végétation pour les derniers 8 000 ans. Les âges en fonction de la profondeur obtenus sur les échantillons de matières humiques et de charbons dans les autres sites étudiés au Brésil (en incluant le bassin de l'Amazonie) ont fourni un âge d'environ 10 000 ans BP pour les horizons de sols de 2 m (Martinelli, *et al.*, sous presse ; Pessenda *et al.*, sous presse a et b).

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ pour le SOM dans les régions de forêt et de transition vers la forêt sont comprises entre

- 28,3 ‰ et - 25,1 ‰, et - 29,0 ‰ à - 24,1 ‰, respectivement (Figure 3). Le profil pourrait représenter l'effet de la décomposition de la matière organique dans la partie peu profonde du sol, qui enrichit le carbone restant en ^{13}C (Nadelhoffer et Fry, 1988 ; Heidmann et Scharpenseel, 1992), et un changement léger dans la composition isotopique des communautés de plantes dans la partie la plus profonde du profil du sol. Ce modèle est typique pour la matière organique des sols générée par une végétation de type C_3 (Cerri, 1985 ; Boutton *et al.*, 1991 ; Pessenda *et al.*, sous presse a). Ces résultats indiquent que la végétation de type C_3 a été prédominante dans les régions représentées par le site de transition (Pimenta Bueno, région centrale sud de l'État du Rondonia) et le site de forêt (Ariquemes, région nord de l'État du Rondonia), pendant le temps représenté par cet enregistrement.

Une plus grande variation des valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ entre - 30 ‰ and - 14 ‰ est observée dans les sols des sites représentatifs des communautés végétales du Cerradão et du Cerrado (Figure 3). Le profil du $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de la profondeur pour le site du Cerradão montre une tendance du $\delta^{13}\text{C}$ allant de - 27,5 ‰ à - 25,1 ‰ à la surface (0-20 cm), tendant vers des valeurs de - 18,8 ‰ entre 30 et 90 cm, continuent de diminuer au dessous de 90 cm pour atteindre des valeurs de - 30,0 ‰ à 200 cm. Cette tendance suggère une prédominance de la végétation en C_3 dans l'intervalle compris entre la surface et 30 cm, changeant vers une communauté végétale dominée par les plantes en C_4 dans l'intervalle 30 and 120 cm et retournant vers une communauté végétale dominée par les plantes en C_3 dans la partie la plus profonde du sol. Des profils de ^{13}C similaires ont été signalés par Schwartz *et al.*, (1986) en Afrique et par Desjardins *et al.*, (1991) au Brésil, impliquant un changement dans le type de végétation : tout d'abord un type dominé par les plantes en C_4 passant à un type dominé par des plantes en C_3 . Une étude détaillée de la composition de la végétation actuelle du site du Cerradão et les données de $\delta^{13}\text{C}$ montrent qu'environ 96 % de la végétation sont constitués de plantes en C_3 (Gomes, 1995). Les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ de la végétation actuelle se situent entre - 36,7 ‰ et - 28,6 ‰, avec une valeur moyenne en $\delta^{13}\text{C}$ de - 31,9 ‰. Aucune valeur de $\delta^{13}\text{C}$ typique de plantes en C_4 n'a été obtenue dans le site, mais en revanche on a observé sur un seul type de plante une valeur de $\delta^{13}\text{C}$ d'environ - 19,2 ‰ qui caractériserait des plantes à photosynthèse de type CAM.

Une comparaison des informations suggérée par les données ^{13}C obtenues dans les profils de sols et la composition de la végétation actuelle du site du Cerradão implique qu'il y a eu un changement dans les communautés végétales dans le passé, caractérisé par la présence de plantes en C_4 qui ne sont pas représentées dans les communautés actuelles. On peut postuler que la végétation-type était semblable à la communauté végétale actuelle du Cerrado.

Le ^{13}C du site du Cerrado semble montrer une évolution semblable, mais beaucoup plus enrichie en ^{13}C que le site du Cerradão (Figure 3). Les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ se situent entre - 21,7 ‰ entre 0 et 10 cm, puis tendent

vers des valeurs plus positives (- 14,8 à - 15,7 ‰) de 10 à 80 cm pour revenir à des valeurs plus négatives (entre - 17,5 et - 19,0 ‰) de 90 et 200 cm. Ce site montre clairement l'influence des plantes en C_4 durant une partie du temps représenté par ce site.

Les relevés de la végétation actuelle et les données de $\delta^{13}\text{C}$ indiquent qu'environ 80 % de la végétation du Cerrado sont des plantes en C_3 . Le reste est composé de plantes en C_4 (Gomes, 1995). Les données de ^{13}C montrent des valeurs entre - 26,9 and - 31,7 ‰ pour les plantes en C_3 avec une moyenne de - 29 ± 1,8 ‰. Les plantes en C_4 se situent entre - 11,1 et - 13,0 ‰, avec une valeur moyenne de - 11,7 ± 0,7 ‰. Une comparaison de ces données avec le profil ^{13}C des sols suggère que les plantes en C_4 étaient beaucoup plus abondantes dans le passé que de nos jours dans le Cerrado.

Conclusions

Les données ^{13}C des sols le long du transect Vilhena-Ariquemes dans la région de Rondonia indiquent clairement que les communautés végétales des régions représentées par des sites forestiers et des sites localisés dans les zones de transition n'ont pas changé de manière significative durant l'époque représentée par les profils de sol. Les changements les plus significatifs ont eu lieu dans les écosystèmes du Cerradão et du Cerrado. Les profils de sol dans ces sites montrent chacun une influence marquée des plantes en C_4 pendant la plus grande partie du temps représentée par ces sols. La partie la plus récente montre un influence majeure des plantes en C_3 , ce qui est parfaitement démontré dans le site du Cerradão. Les données ^{13}C sur SOM et sur la végétation actuelle suggèrent que le Cerradão était dans le passé similaire au Cerrado actuel et que les plantes en C_4 étaient dominantes dans le Cerrado (actuellement composé d'environ 20 % seulement de plantes en C_4). Ces changements pourraient être associés à une période plus sèche qu'aujourd'hui dans la région amazonienne. Différentes études ont montré la présence de périodes plus sèches entre 20 000-13 000 et 8 000-4 000 ans BP dans des zones proches et à l'intérieur de la région amazonienne (Servant et Fontes, 1978 ; Wirrmann *et al.*, 1988 ; Absy *et al.*, 1991 ; Ybert, 1992). La chronologie de ces changements suggérée par les données ^{13}C sur SOM dans la région du Rondonia sera discutée et présentée dans une future publication.

Remerciements

Nous voudrions remercier C. C. Cerri et M. C. Picollo, de la section de chimie des sols du CENA/USP, pour leur aide pendant les travaux de terrain. Nous remercions également M. V. L. Cruz, G. Pessin et R. Roveratti, du Laboratoire ^{14}C du CENA/USP, pour la préparation des échantillons et les analyses ^{14}C , ainsi que que R. Drimmie, directeur du Laboratoire Environmental Isotopes de l'Université de Waterloo (Canada), pour les analyses ^{13}C . Cette recherche a été financée par le FAPESP # 94/1272-1 et le CNPq # 522179/94-0 de L. C. R. Pessenda. Une bourse CAPES et une contribution de salaire ont été attribuées par l'Université de Rondonia à M. B. M. Gomes.

Références

- Ambrose, S. H. ; Sikes, N. E. 1991. Soil carbon evidence for Holocene habitat change in the Kenya Rift Valley. *Science*, **253**, 1402-1405.
- Absy, M. L. ; Cleef, A. ; Fournier, M. ; Martin, L. ; Servant, M. ; Siffedine, A. ; Silva, M. ; Soubiès, F. ; Suguio, K. ; Turcq, B. ; Van der Hammen, T. 1991. Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **312 II**, 673-678.
- Bush, M. B. ; Colinvaux, P. A. 1988. A 7,000-year pollen record from the Amazon lowlands, Ecuador. *Vegetatio*, **76**, 141-154.
- Boutton, T. W. 1991. Stable carbon isotope ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environmental. Dans : D. C. Coleman et B. Fry (dir. publ.), *Carbon Isotope Techniques*. Academic Press, p. 173-185.
- Cerri, C. C. ; Feller, C. ; Balesdent, J. ; Victoria, R. ; Plenecassagne, A. 1985. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C , à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **300 II**, 9, 423-426.
- Desjardins, T. ; Volkoff, B. ; Andreux, F. ; Cerri, C. C. 1991. Distribution du carbone total et de l'isotope ^{13}C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Science du Sol*, **29**, 175-187.
- Goodland, R. ; Pollard, R. 1973. The Brazilian cerrado vegetation a fertility gradient. *Ecology*, **61**, 219-224.
- Gomes, M. B. M. 1995. Estudo paleoambiental no estado de Rondônia utilizando datação por ^{14}C e razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da matéria orgânica do solo. *Master Thesis*, Center for Nuclear Energy in Agriculture CENA, University of Sao Paulo, Piracicaba, Sao Paulo, Brazil. 106 p.
- Guillet, B. ; Faivre, P. ; Mariotti, A. ; Khobzi, J. 1988. The ^{14}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 Columbia (South America). *Paleoecology, Paleoclimatology, Paleoecology* **65**, 51-58.
- Heidmann, P. B. ; Scharpenseel, H. W. 1992. The use of natural ^{14}C and ^{13}C in soils for studies on global climate change. *Radiocarbon*, **34** (3), 535-540.
- Krishnamurthy, R. V. ; DeNiro, M. J. ; Pant, R. K. 1982. Isotopic evidence for Pleistocene climatic changes in Kashmir, India. *Nature*, **298**, 640-641.
- Ledru, M. P. 1993. Late quaternary environmental and climatic changes in central Brazil. *Quaternary Research*, **39**, 90-98.
- Ledru, M. P. 1994. Localisation de la forêt d'Araucaria du Brésil au cours de l'Holocène. Implications paléoclimatiques. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **317**, 517-521.
- Liu, K. B. ; Colinvaux, P. 1985. Forest changes in the Amazon basin during the last glacial maximum. *Nature*, **138**, 556-557.
- Markgraf, V. 1989. Paleoclimates in Central and South Africa since 18,000 BP based on pollen and lake-level records. *Quaternary Science Reviews*, **8**, 1-24.
- Martinelli, L. A. ; Pessenda, L. C. R. ; Valencia, E. P. E. ; Camargo, P. B. ; Telles, E. C. C. ; Cerri, C. C. ; Victória, R. ; Aravena, R. ; Richey, J. ; Trumbore, S. (sous presse). Carbon-13 depth variation in soils of Brazil and relations with climate changes during the Quaternary. *Oecologia*.
- Nadelhofer, K. F. ; Fry, B. 1988. Controls on natural nitrogen – 15 and carbon – 13 abundances in forest soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, **52**, 1633-1640.
- Pessenda, L. C. R. ; Camargo, P. B. 1991. Datação radiocarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectrometria de cintilação líquida de baixo nível de radiação de fundo. *Quimica Nova*, **14** (2), 98-103.
- Pessenda, L. C. R. ; Valencia, E. P. E. ; Camargo, P. B. ; Telles, E. C. C. ; Martinelli, L. A. ; Cerri, C. C. ; Aravena, R. ; Rozanski, K. (sous presse, a). Radiocarbon measurements in Brazilian soils developed on basic rocks. *Radiocarbon*, **38** (2).
- Pessenda, L. C. R. ; Aravena, R. ; Melfi, A. J. ; Telles, E. C. C. ; Boulet, R. ; Valencia, E. P. ; Tomazello, M. (sous presse, b). Carbon isotopes (^{13}C , ^{14}C) in soil to evaluate vegetation change during the Holocene in Central Brazil. *Radiocarbon*, **38** (2).
- Schwartz, D. ; Mariotti, A. ; Lanfranchi, R. ; Guillet, B. 1986. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the Congo. *Geoderma*, **39**, 97-103.
- Schwartz, D. 1988. Some podzols on Bateke sands and their origins, People's Republic of Congo. *Geoderma*, **43**, 229-247.
- Servant, M. ; Fontes, J. C. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, **10** (1), 9-23.
- Servant, M. ; Maley, J. ; Turcq, B. ; Absy, M. L. ; Brenac, P. ; Fournier, M. ; Ledru, M. P. 1993. Tropical forest changes during the late Quaternary in African and South American lowlands. *Global and Planetary Change*, **7**, 25-40.
- Victória, R. L. ; Fernandes, F. ; Martinelli, L. A. ; Piccolo, M. C. ; Camargo, P. B. ; Trumbore, S. 1995. Past vegetation changes in the Brazilian pantanal arboreal-grassy savanna ecotone by using carbon isotopes in the soil organic matter. *Global Change Biology*, **1**, 165-171.
- Volkoff, B. ; Cerri, C. C. 1987. Carbon isotopic fractionation in subtropical Brazilian grassland soils. Comparison with tropical forest soil. *Plant and Soil*, **102**, 27-31.
- Wirmann, D. ; Mourguiart, P. ; De Oliveira, L. 1988. Holocene sedimentology and ostracods repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretation. *Quat. South Am. Antartic. Peninsula*, **6**, 89-127.
- Ybert, J. P. 1992. Ancient lakes environments as deduced from pollen analysis. Dans : C. Dejoux et A. Iltis (dir. publ.), *Lake Titicaca*. Kluwer, Dordrecht, p. 40-42.

Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux

MICHEL SERVANT, SIMONE SERVANT-VILDARY,
ÉDITEURS SCIENTIFIQUES



IRD

UNESCO

MAB

CRS



Les responsables d'édition adressent leurs sincères remerciements à
Christian Levêque, Samy Mankoto, Bernard Riéra et Léo Rona-Beaulieu.

Ouvrage publié avec le soutien de :

Centre national de la recherche scientifique, Programme Environnement,
vie et sociétés, 3, rue Michel-Ange, F-75016 Paris

UNESCO, 7 place de Fontenoy, F-75007 Paris
Programme sur l'Homme et la Biosphère (MAB)
Projet PNUD ZAI/97/001-ERAIFT

Ministère des affaires étrangères
Comité MAB France

IRD (Institut de recherche pour le développement),
313, rue Lafayette, F-75010 Paris

ISBN 92-3-203753-X
Mise en page : Valérie Herman
Impression : Imprimerie Jouve
Photo de couverture : Lac Tabéré, Adamaoua, Cameroun

© UNESCO 2000