

# Datation par le $^{14}\text{C}$ de charbons inclus dans le sol pour l'étude du rôle de la remontée biologique de matière et du colluvionnement dans la formation de latosols de l'état de São Paulo, Brésil

Susy E.M Gouveia\*, Luiz C.R Pessenda

Centro de Energia Nuclear na Agricultura, av. Centenário, n° 303, CP 96, 13416–000 Piracicaba SP, Brésil

Reçu le 30 août 1999 ; accepté le 6 décembre 1999

Présenté par Georges Pédro

**Abstract** —  $^{14}\text{C}$  dating of charcoal in the soil for the study of biological remount of soil matter and of the colluvium in the formation of ferralsols of São Paulo State, southern Brazil. This paper complements a scientific investigation, published in a precedent *Compte Rendu*, that showed that the burial of charcoal in a oxisol of the Minas Gerais State, southern Brazil, is a result of the biological remount of soil matter removed from deeper parts by the fauna. Such transported material would then constitute the soil layer containing charcoal (generally up to 2 m). The new results obtained at two sites in São Paulo State confirm, on the one hand, the role of the fauna in the development of these oxisols and, on the other hand, that colluvium can intervene in the burial of charcoal. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

biological remount / colluvium /  $^{14}\text{C}$  dating / charcoal / Brazil

**Résumé** — Ce travail vient compléter celui présenté dans un précédent *Compte rendu*, qui montrait que l'enfouissement des charbons dans un latosol de l'État du Minas Gerais est dû à la remontée de matière prélevée en profondeur par la faune. La couche de sol contenant des charbons (généralement plus de 2 m) serait donc constituée par le matériel ainsi transporté. Les nouveaux résultats obtenus dans deux sites de l'État de São Paulo, tout en confirmant le rôle de la faune dans la mise en place de ces latosols, montrent que des phases de colluvionnement provoquant l'enfouissement des charbons peuvent également intervenir. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

remontée biologique / colluvionnement / datation  $^{14}\text{C}$  / charbons / Brésil

## Abridged version

### 1. Introduction

In tropical countries, where the biological activity is intense, the transport of soil matter from deep layers to the surface is a frequent phenomenon. The main agents

of this transport are termites and ants [5, 6]. Earthworms work only in the top 60 cm [4].

Generally, charcoal is observed in the oxisols of Brazil. These soils are porous due to their microaggregated structure. The charcoal presence can only be explained by the occurrence of palaeofires during drier episodes and/or the human disturbance [8, 9, 10, 12]. In spite of

\* Correspondance et tirés à part

being degraded by soil genesis [6, 11], the buried charcoal can be considered biologically inert and physically stable in relation to the isotope changes with the external environment.

## 2. Study sites and methods

Two sites were studied in the São Paulo State, in Botucatu and Jaguariúna (*figure 1*). The soils of Botucatu are developed on basalt, with interference of sandstone, and the soils of Jaguariúna on diabase. The two profiles of Botucatu are located in the top of two neighboring hills and the soil is oxisol. The soils of Jaguariúna are in the same slope (*figure 2*). One profile is located near the top, immediately downhill of the emergent rock, which is present until the top of the slope, and the soil is an oxisol. The other profile is located 75 m downhill and it corresponds to an Acrisol. In both sites the vegetation is a subtropical semideciduous forest (cerradão).

Soil samples were collected from excavations of 250-cm depth. Sampling involved the collection of up to 10 kg of material at 10-cm intervals.  $^{14}\text{C}$  analyses on charcoal were carried out at the Radiocarbon Laboratory of the Centro de Energia Nuclear na Agricultura (Brazil) using the benzene method and liquid scintillation counting and for small samples at the Isotrace Laboratory of the University of Toronto (Canada), employing the AMS technique.

## 3. Results

The soils of Botucatu are clayey or clay-sandy (*figure 3*). The profile II presents a maximum carbon concentration between 60 and 120 cm, due to the presence of a sombric horizon (*figure 4*). Higher amounts of charcoal are observed in 50–60 cm, 90–100 cm and 110–140 cm, corresponding to the period 3 000–6 000 yr BP (*table 1*). In Jaguariúna the soils are clayey and the maximum amount of charcoal is observed in 100–120 cm and 160–170 cm (*table 1*).

The ages increase regularly with soil depth in Botucatu I (*figure 5* and *table 1*). In Botucatu II, there is an inversion in the interval 120–130 cm (5 660 years BP)

and 180–190 cm (4 150 yr BP). In the higher part of the slope in Jaguariúna, there is a gap between 170–180 cm and 200–210 cm (6 240–9 120 yr BP). In Jaguariúna downhill, between 130–140 and 160–170 cm, the group of results from 8 010 yr BP to 8 710 yr BP probably corresponds to the gap of the higher part.

## 4. Interpretation

The higher charcoal content in the profiles probably is associated to the periods of frequent fires.

The soil profiles of Botucatu and of the higher part of slope in Jaguariúna, located at the top or immediately downhill of the emergent rock, probably have not received colluvium. Therefore, the charcoal burial is mainly due to soil fauna, confirming the results obtained in Salitre, Minas Gerais State [1]. The surface accumulation rates of soil matter were  $0.24 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  in Botucatu I,  $0.26 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  in Botucatu II,  $0.25 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  in the Jaguariúna higher part, in very good agreement with the rates obtained in Salitre that range from 0.21 to  $0.23 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ .

In Jaguariúna downhill it is verified that the group of ages obtained between 130–140 cm and 160–170 cm (8 010 to 8 710 yr BP), corresponds to the gap observed in the higher part between 170–180 cm and 200–210 cm (6 240 to 9 120 yr BP). This probably can be explained by a colluvium of soil and charcoal from the higher part to downhill, that would have occurred between about 8 000 and 9 000 yr BP.

## 5. Conclusions

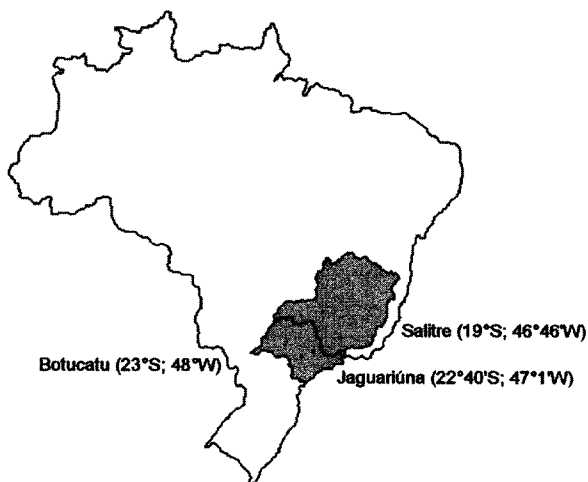
The radiocarbon dating of charcoal in the soils of São Paulo State confirms the main role of soil fauna in the transport of matter from the deeper layers to the surface, already verified in Minas Gerais state. The dating and the distribution of charcoal in the studied soils suggests the occurrence of frequent fires between 3 000 and 6 000 yr BP in Botucatu and between 4 000 and 9 000 yr BP in Jaguariúna, that would correspond to dry periods [2]. These datings also permit to verify the occurrence of periods of colluvium, as in Jaguariúna between about 8 000 and 9 000 yr BP.

## 1. Introduction

En pays tropical, où l'activité biologique est intense, le transport de matière par la macro-faune des couches profondes du sol vers la surface est un phénomène fréquent. Les principaux agents de ces transferts sont les termites et les fourmis [5, 6]. Le matériel ainsi transporté peut provenir de profondeurs importantes, plus de 10 m pour les fourmis *Atta*, selon Miklós [6]. Les vers de terre sont abondants, surtout en régions humides et subhumides [3], mais, s'ils sont capables de descendre profondément

lors des périodes défavorables (saison sèche), ils ne remanient le sol que sur les soixante centimètres supérieurs [4].

Les charbons sont presque toujours présents dans les latosols du Brésil. Ceux-ci sont des sols très meubles, du fait de leur structure microagrégée caractéristique. La présence des charbons dans le sol et leur distribution, qui montre des niveaux de concentration plus importante, ne peuvent s'expliquer que par l'occurrence de paléo-incendies survenus lors d'épisodes climatiques plus secs ou dus à l'activité humaine [8, 9, 10, 12].



**Figure 1.** Carte de localisation des sites d'étude et de celui de Salitre.

**Figure 1.** Map of Brazil showing the study sites.

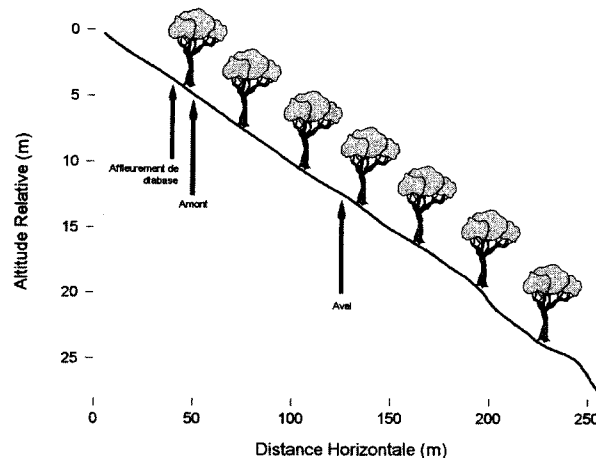
Bien que dégradés par la pédogenèse [6, 11], les fragments de charbon enterrés sont considérés comme biologiquement inertes et physiquement stables en ce qui concerne les échanges isotopiques avec le milieu externe, ce qui en fait un des matériaux les plus appropriés pour la datation par le  $^{14}\text{C}$ .

Dans un précédent Compte rendu [1], il a été montré que l'enfouissement des charbons dans un latosol de l'État du Minas Gerais (Salitre) était dû à la remontée de matière prélevée en profondeur par la faune. Dans le but de vérifier la généralité du phénomène, nous avons étudié deux nouveaux sites localisés dans l'État de São Paulo, dans les environs de Botucatu et de Jaguariúna (figure 1).

## 2. Caractérisation des sites et méthode d'étude

Les sols étudiés à Botucatu sont développés sur basalte, avec interférence de grès, et ceux de Jaguariúna sur diabase et sur migmatite. Les deux profils de Botucatu ont été observés sur deux sommets d'interfluve distants d'environ 1 500 m. Ils correspondent à des *latosols* (sols ferrallitiques). Les deux profils de Jaguariúna sont localisés sur un même versant (figure 2). L'un est proche du haut de pente, immédiatement à l'aval de la diabase qui est subaffleurente jusqu'au sommet et est développé sur cette roche, l'autre est situé à 75 m à l'aval du premier et est développé sur une migmatite mélanocrate. Le profil de l'amont est un latosol, celui de l'aval est un *podzolic* (sol ferrallitique lessivé).

Dans les deux sites, la végétation est une forêt basse (*cerradão*). Le climat est subtropical (pluviosité et température moyenne: 1 314 mm et 19,4 °C à Botucatu, 1 410 mm et 22 °C à Jaguariúna).



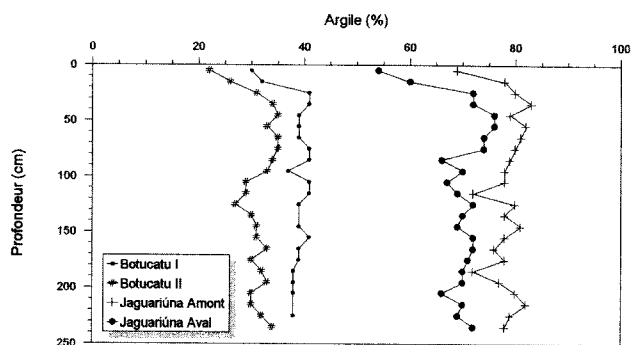
**Figure 2.** Localisation des tranchées de Jaguariúna.

**Figure 2.** Location of excavations in Jaguariúna.

L'échantillonnage des profils a été réalisé dans des fosses profondes de 3 m, par prélèvement d'environ 10 kg de terre par tranche de 10 cm. Les charbons sont prélevés à la main pour les plus gros, par flottation pour le reste. Ils sont soumis à un traitement acide puis basique et, enfin, de nouveau acide, afin d'éliminer les composés organiques humifiés. Les charbons de chaque couche de 10 cm sont regroupés et datés ensemble. Il s'agit d'un âge moyen. Les échantillons de charbon les plus abondants (> 2 g pour 10 kg de terre) ont été datés au Brésil, au Centre d'énergie nucléaire appliquée à l'agriculture (Cena), par synthèse benzénique et spectrométrie de scintillation liquide [7]. Les échantillons moins abondants (< 2 g pour 10 kg de terre) ont été soumis à une combustion et des fractions aliquotes du  $\text{CO}_2$  dégagé envoyées au laboratoire Isotracc de Toronto, Canada, pour datation par AMS (Accelerator Mass Spectrometry).

## 3. Résultats

Les teneurs en argile et le carbone total sont présentés sous forme de graphiques dans les figures 3 et 4. Les sols de Botucatu sont argileux pour le profil I, sablo-argileux pour le profil II. Les taux de carbone total varient nettement d'un profil à l'autre, le plus argileux étant le plus riche en carbone, ce qui est normal sur une même roche-mère. Toutefois, Botucatu I présente un maximum relatif de carbone entre 50 et 120 cm, qui correspond à un horizon plus sombre noté sur le terrain entre 50 et 160 cm, couleur probablement due à la pulvérisation de charbons par la pédogenèse [11]. À proximité de Botucatu I et II, Miklós [6] a observé des micro-charbons en lame mince dans ses horizons sombres. Ceux-ci résulteraient d'un apport de résidus de combustion localement plus abondants et correspondraient à des incendies plus intenses. Les sols de Jaguariúna sont



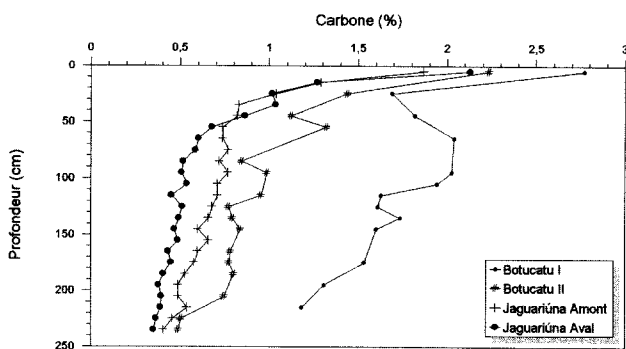
**Figure 3.** Teneurs en argile des sols de Botucatu et de Jaguariúna en fonction de la profondeur.

**Figure 3.** Clay content of soils of Botucatu and Jaguariúna in relation to soil depth.

très argileux, le profil amont présentant la texture la plus fine. La texture est induite par la roche-mère. Les taux de carbone sont peu différents d'un profil à l'autre.

La distribution des charbons et les âges correspondants sont portés sur la *figure 5*. On constate une répartition irrégulière des charbons. Un maximum relatif est observé entre 110 et 140 cm dans le profil Botucatu I, entre 50 et 60 cm, ainsi que entre 90 et 100 cm, en Botucatu II. Dans le profil de Jaguariúna amont, un maximum de charbon se présente entre 100 et 120 cm. Dans le profil de Jaguariúna aval, les charbons ont presque disparu entre la surface et 80 cm. Plus bas, ils sont nettement moins abondants qu'en Jaguariúna amont. L'âge des différents maxima est présenté dans le *tableau I*.

En ce qui concerne les âges (*figure 5* et *tableau II*), ceux-ci croissent régulièrement du sommet vers la base dans le profil I de Botucatu. Pour Botucatu II, on observe une inversion (5 660 ans BP en 120–130 et 4 150 en 180–190 cm). En Jaguariúna amont, apparaît un hiatus important entre 170–180 cm et 200–210 cm,



**Figure 4.** Teneurs en carbone des sols en fonction de la profondeur.

**Figure 4.** Carbon content in relation to soil depth.

**Tableau I.** Âge des maxima de charbon.

**Table I.**  $^{14}\text{C}$  dating of the highest amount of charcoal found in the soils of Botucatu and Jaguariúna.

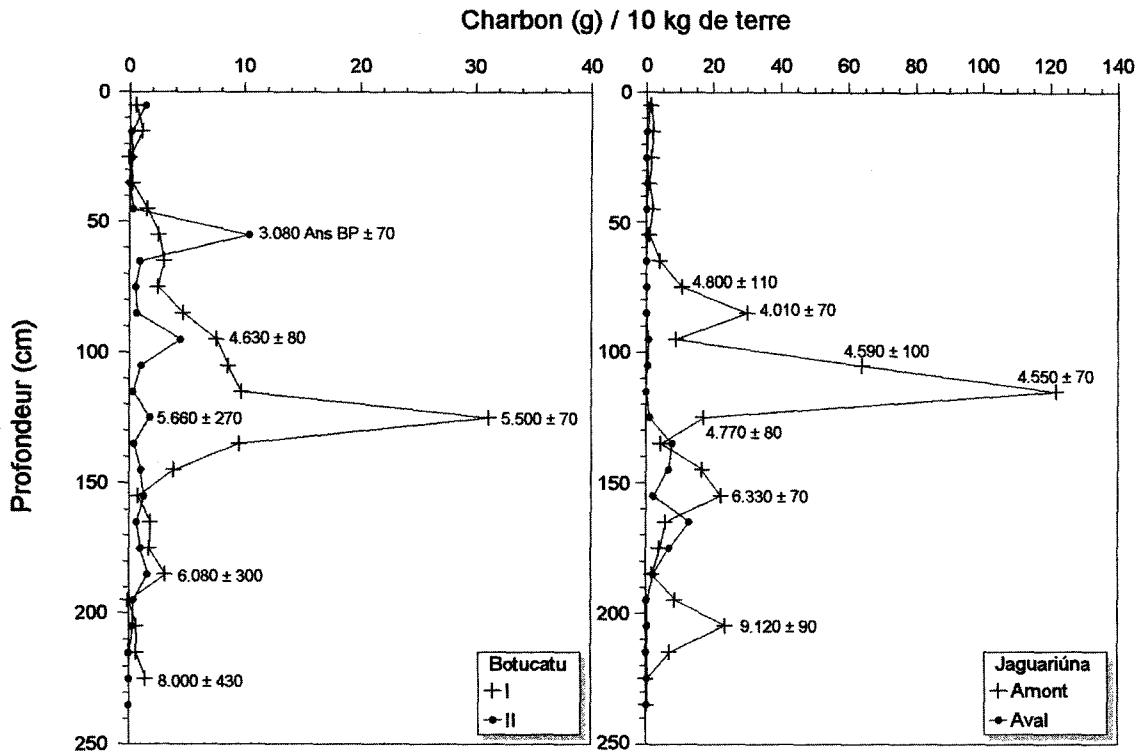
	Profondeur (cm)	Charbon (g)	Âge (ans BP)
Botucatu I	110–140	50,6	5 500 ± 70
Botucatu II	50–60	10,5	3 080 ± 70
	90–100	4,5	4 630 ± 80
Jaguariúna Amont	100–120	121,9	4 550 ± 70
Jaguariúna Aval	160–170	13,0	8 710 ± 80

l'âge passant de 6 240 à 9 120 ans BP, puis revenant à 8 660 ans BP en 210–220 cm. En Jaguariúna aval, on observe un saut important entre 90–100 cm (5 580 BP) et 130–140 cm (8 010 BP), puis un groupe de résultats allant de 8 010 ans BP à 8 710 ans BP, avec une inversion entre 160–170 cm (8 710 BP) et 170–180 cm (8 440 BP). On constate que ce groupe de résultats correspond au hiatus observé entre 170–180 cm et 200–210 cm en Jaguariúna amont.

## 4. Interprétation

Les maximums relatifs des charbons dans les sols correspondent probablement à des périodes où les incendies ont été plus fréquents (*tableau I*) et, par suite, à des périodes plus sèches. En Jaguariúna aval, on peut attribuer l'absence de charbons entre 0 et 80 cm à l'existence d'un horizon Bt, où la pédoturbation est nettement plus forte que dans les horizons microagrégés et aurait pulvérisé les charbons. En effet, les horizons microagrégés sont très poreux et les contraintes physiques dues au gonflement et au retrait sont faibles. Au contraire, dans un horizon Bt à structure polyédrique, ces contraintes sont fortes et susceptibles de pulvériser les charbons.

Les datations pour les deux profils de haut de pente (Botucatu I et II), où le colluvionnement n'a pu intervenir, montrent une croissance régulière de l'âge des charbons avec la profondeur, si l'on excepte l'inversion observée en Botucatu II. Cette dernière peut être due à la combustion de racines ou à un remaniement par la macrofaune. Quoi qu'il en soit, ces résultats confirment les conclusions tirées de ceux obtenus à Salitre en 1995, qui attribuaient à la faune du sol l'enfouissement des charbons et, par suite, la mise en place des matériaux du sol sur, au moins, les deux premiers mètres. Le raisonnement est basé sur le fait que la variation de l'âge des charbons avec la profondeur est la même en haut de pente et sur le versant, ce qui exclut un enfouissement par colluvionnement. En Jaguariúna amont, on aboutit à des conclusions semblables, même si le profil n'est pas situé exactement en haut de pente, parce qu'il est dominé par une portion de versant où la diabase est subaffleureante. Les vitesses d'accumulation de matière



**Figure 5.** Distributions des charbons dans les sols de Botucatu et de Jaguariúna en fonction de la profondeur et datations correspondantes.  
**Figure 5.** Charcoal distribution of Botucatu and Jaguariúna in relation to soil depth and corresponding radiocarbon ages.

**Tableau II.** Datations par le <sup>14</sup>C (ans BP) des charbons dans les sols de Botucatu et de Jaguariúna et vitesses d'accumulation pour chaque profil (excepté Jaguariúna aval).

**Table II.** <sup>14</sup>C dating (y BP) of charcoal in the soils of Botucatu and Jaguariúna and the surface accumulation rate for each profile (except Jaguariúna downhill).

Profondeur (cm)	Botucatu		Jaguariúna	
	I	II	Amont	Aval
50–60		3 08 ± 70		
60–70	3 040 ± 180			
70–80			4 800 ± 110	
80–90	4 150 ± 110		4 010 ± 70	
90–100	4 630 ± 80	4 630 ± 80	4 320 ± 150	5 580 ± 70
100–110	4 830 ± 70		4 590 ± 100	
110–120			4 550 ± 70	
120–130	5 500 ± 70	5 660 ± 270	4 770 ± 80	
130–140	5 560 ± 80			8 010 ± 100
140–150			6 020 ± 70	8 160 ± 110
150–160			6 330 ± 70	
160–170				8 710 ± 80
170–180			6 240 ± 150	8 440 ± 120
180–190	6 080 ± 300	4 150 ± 450		
190–200				
200–210			9 120 ± 90	
210–220		6 690 ± 70	8 660 ± 80	
220–230	8 000 ± 430			8 070 ± 80
230–240				7 720 ± 80
Vitesse d'accumulation superficielle de matière (mm·an <sup>-1</sup> )	0,24	0,26	0,25	

en surface par la faune, calculées en faisant la moyenne des taux obtenus pour chaque profondeur datée, sont de  $0,24 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en Botucatu I,  $0,26 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en Botucatu II,  $0,25 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en Jaguariúna amont. On rappellera qu'à Salitre, ce taux varie, de l'amont à la mi-pente, de  $0,21$  à  $0,23 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ . Ces vitesses sont sous-estimées, car elle ne prennent pas en compte la part de cette matière remontée entraînée par l'érosion.

En Jaguariúna amont, on a signalé plus haut l'existence d'un hiatus dans la séquence verticale des dates, entre 170–180 cm et 200–210 cm (6 240–9 120 ans BP). Or, en Jaguariúna aval, on observe un groupe de dates assez proches les unes des autres (8 010–8 710 ans BP), entre 130–140 cm et 160–170 cm, groupe de dates qui correspond justement à celles qui manquent, entre 180–190 cm et 190–200 cm, en Jaguariúna amont. Il est dès lors possible d'expliquer cette situation par un colluvionnement de terre et de charbons de Jaguariúna amont vers Jaguariúna aval, colluvionnement qui se serait produit en gros entre 8 000 et 9 000 ans BP. Si l'on admet cette hypothèse, le calcul du taux d'accumulation de matière par la faune en surface n'a pas de sens en Jaguariúna aval.

**Remerciements.** Les auteurs remercient la Fapesp (Projet 95/5047–5, 96/12777–2), le Pronex (projet 41.96.0938.00) et le CNPq pour leur aide financière, A.A.W. Miklós, professeur à l'USP, pour son aide dans le travail de terrain à Botucatu, H.F. Filizola, chercheur à l'Embrapa-CNPMA pour sa participation au travail de terrain à Jaguariúna, M.V.L. Cruz, du laboratoire de  $^{14}\text{C}$  du Cena/USP, pour la préparation des échantillons.

## Références

- [1] Boulet R., Pessenda L.C.R., Telles E.C.C., Melfi A.J., Une évaluation de la vitesse de l'accumulation superficielle de matière par la faune du sol à partir de la datation des charbons et de l'humine du sol. Exemple des latosols des versants du lac Campestre, Salitre, Minas Gerais, Brésil, C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa 320 (1995) 287–294.
- [2] Gouveia S.E.M., Pessenda L.C.R., Boulet R., Aravena R., Scheel-Ybert R., Isótopos do carbono dos carvões e da matéria orgânica do solo em estudos de mudança de vegetação e clima no Quaternário e da taxa de formação de solos do estado de São Paulo, An. Acad. Bras. Ci. (1999) (in press).
- [3] Lal R., Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems, *Agric. Ecosystems Environ.* 24 (1988) 101–116.
- [4] Lavelle P., *The soil fauna of tropical savannas*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, the Netherlands, 1983, pp. 485–504.
- [5] Lee K.E., Wood T.G., *Termites and soils*, Academic Press, London, New York, 1971, 251 p.
- [6] Miklós A.A.W., *Biodynamique d'une couverture pédologique dans la région de Botucatu (Brésil-SP)*, thèse, université Paris-6, 1992, 247 p.
- [7] Pessenda L.C.R., Camargo P.B., Datação radiocarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectrometria de cintilação líquida de baixa radiação de fundo, *Química Nova* 14 (2) (1991) 98–103.
- [8] Pessenda L.C.R., Aravena R., Melfi A.J., Boulet R., The use of carbon isotopes (C-13, C-14) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in central Brazil, *Radiocarbon* 38 (2) (1996) 191–201.
- [9] Saldarriaga J.G., West D.C., Holocene fires in northern Amazon Basin, *Quaternary Res.* 26 (1986) 358–366.
- [10] Scheel R., Vernet J.-L., Wengler L., Fournier M., Carvões do solo em São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil: Datação, notas sobre o paleoambiente no Quaternário recente, condições de depósito e origem do fogo e proposta de estudos antracológicos, in: Congresso da Abequa, 5, Niterói, Anais, 1995, pp. 169–175.
- [11] Silva A.C., Vidal-Torrado, Gênese dos latossolos húmicos e sua relação com a evolução da paisagem numa área cratônica do sul de Minas Gerais, *R. Bras. Ci. Solo* 23 (1999) 329–341.
- [12] Soubiès F., Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons dans les sols (6 000–3 000 ans BP), *Cah. Orstom, sér. Géol.* 11 (1) (1980) 133–148.

## 5. Conclusions

La datation par le  $^{14}\text{C}$  des charbons contenus dans des sols de l'État de São Paulo, en fonction de leur répartition dans le profil, confirme le rôle majeur de la remontée en surface de matière par la faune dans les latosols, rôle déjà constaté à Salitre dans le Minas Gerais en 1995. La vitesse de cette remontée varie de  $0,24$  à  $0,26 \text{ mm}$  par an, vitesses très proches de celles obtenues à Salitre ( $0,21$  à  $0,23 \text{ mm}$  par an). Ces datations et les teneurs en charbon des couches correspondantes permettent de supposer l'existence, dans le passé, de périodes d'incendie fréquent vers 5 500 ans BP à Botucatu I, 3 000 et 4 600 ans BP à Botucatu II, 4 500 ans BP à Jaguariúna amont et 8 700 ans BP à Jaguariúna aval. Les différences entre deux profils voisins peuvent être dues au fait que ces incendies aient été très localisés. Ces résultats ne permettent donc pas de détecter de périodes d'incendies généralisés.

Ces datations permettent également de détecter l'existence probable, dans le passé, de périodes de colluvionnement, comme à Jaguariúna entre 8 000 et 9 000 ans.