

## La sédimentation organique lacustre en milieu tropical humide (Carajas, Amazonie orientale, Brésil) : relation avec les changements climatiques au cours des 60 000 dernières années

par ABDELFETTAH SIFEDDINE\*, PHILIPPE BERTRAND\*\*, MARC FOURNIER\*, LOUIS MARTIN\*,  
MICHEL SERVANT\*, FRANÇOIS SOUBIES\*, KENITIRO SUGUIO\*\*\* et BRUNO TURCQ\*\*\*\*

*Mots clés.* – Amazonie, Brésil, Sédimentation organique lacustre, Palynofaciès, Flux sédimentaires, Paléoenvironnements, Paléoclimats, Quaternaire.

*Résumé.* – L'étude pétrographique et l'étude géochimique de la matière organique des sédiments d'une carotte prélevée au centre d'une dépression marécageuse située sur un étroit plateau cuirassé émergeant de la forêt amazonienne, ont permis de caractériser et d'évaluer en pourcentages relatifs les différentes fractions organiques. L'approche pétrographique permet de compléter et de renforcer les informations fournies par les paramètres géochimiques utilisés et de mieux les comprendre.

Cette étude a permis de définir de nouveaux marqueurs de paléoenvironnements, tout à fait concordants avec les données palynologiques obtenues sur la même carotte. Pendant les phases de plein développement de la forêt autour du plateau (conditions humides), la matière organique est mieux préservée et le sédiment est caractérisé par des valeurs importantes du flux de COT. En revanche, pendant les phases de reprise de la forêt, succédant à des périodes d'ouverture de celle-ci (retour à des conditions humides succédant à des conditions plus sèches), la matière organique majoritairement amorphe, est dégradée. L'augmentation progressive des valeurs du flux de COT et des valeurs du rapport C/N attestent de l'amélioration de la qualité et de la quantité de la matière organique sédimentaire. Les fortes valeurs du flux de COT enregistrées pendant la dernière ouverture de la forêt (7000 – 4000 ans B.P.) ont été reliées à la présence de microcharbons de bois. Ces derniers apportés en aérosols et sédimentés dans les lacs traduisent l'existence d'incendies successifs de la forêt humide entourant le plateau. Ces incendies successifs témoignent de l'existence de périodes de stress hydriques mettant la forêt humide en état de brûler. Ces différentes informations, associées aux données de la palynologie, ont permis de faire une reconstitution cohérente de l'évolution de l'environnement au cours des 60 000 dernières années.

### The lacustrine organic sedimentation in tropical humid environment (Carajas, eastern Amazonia, Brazil) : relationship with climatic changes during the last 60 000 years B.P.

*Key words.* – Amazonia, Brazil, Lacustrine organic sedimentation, Palynofacies, Sedimentary fluxes, Palaeoenvironments, Palaeoclimate, Quaternary.

*Abstract.* – The petrographic and geochemical studies of the organic material from a sediment core recovered from the central part of a marshland basin situated on a narrow plateau surrounded by the Amazonian rainforest has allowed characterization and evaluation of the relative percentages of the different organic fractions. The petrographical approach allowed confirmation and a better understanding of the geochemical results.

In order to prove the potential of organic palaeoenvironment markers, the results of this study were compared with those of the palynology obtained from the same samples. This comparison is consistent and provides a new framework of interpretation of palaeoclimatic changes. Indeed, during full development of the rain forest surrounding the plateau, the resistant organic material which one observes in the organic levels of lacustrine sediments, is principally composed of algal material and translucent ligno-cellulosic debris which have a weak vitrinite reflectance and a grain size ranging from 60 µm-100 µm. Elsewhere these levels are characterized by high fluxes of total organic carbon (TOC) and nitrogen (N). On the contrary, during regeneration of the forest (humid conditions) following the opening of the rain forest (dry conditions), the organic material, situated in siderite levels, is composed of amorphous organic matter (autochthonous organic fraction) and opaque ligno-cellulosic debris (allochthonous fraction) with small grain size. The distribution of vitrinite reflectance in these levels is multimodal with average and high values. The increase of fluxes of TOC and N and the low C/N ratios shows improvement in the quality and quantity of organic matter. In the organic levels, emplaced during the Holocene forest regression, the maximum fluxes of TOC coincide with the presence of carbonized wood debris, proving the existence of frequent forest fires.

*Extended Abstract.* – The Amazonia rain forest regression during past dry climate phases have been postulated by indirect evidences based on geomorphological and ecological studies. A pollen diagram obtained on a lacustrine core (CSS2) collected in southeastern Amazonia reveals the occurrence of four episodes of forest regression during the last 60,000 years [Absy *et al.*, 1991]. We present a study of organic matter sedimentation, realized on the same core, which allows a better understanding of palaeoenvironmental changes during that period. The studied site is a lake situated on a narrow ferralitic plateau : the Serra Sul dos Carajas, which is surrounded by the Amazonian forest (fig. 1). On the plateau the savannah results of the bad edaphic conditions. Numerous lakes and bogs occupy the small depressions of the lateritic crust.

The 6.5 m-long vibro-core has been collected in the centre of a small bog. The core presents four sedimentary sequences (fig. 2). Each sequence is composed by a basal clastic unit rich in siderite and containing quartz, kaolinite, goethite and hematite, overlain by an organic-rich unit presenting wood fragments in its upper part. Ten radiocarbon ages show that the sedimentation concerns the last 60,000 years. A marked hiatus is evidenced at the base of the upper sedimentary sequences and probably, sedimentation gaps also occur at the base of the other lower sedimentary sequences (fig. 2). Out of these gaps the sedimentation rate is almost steady.

Total organic carbon (TOC) and nitrogen have been measured upon 104 samples by Walkley and Black and Kjeldall methods respectively. 20 samples from the different lithological units have been analyzed by mass spectrometry for <sup>13</sup>C measurements.

\* ORSTOM, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex, France.

\*\* URA 724 du CNRS, Université d'Orléans, BP 6759 45067 Orléans cedex 2, France ; actuellement : URA 197 CNRS, Univ. Bordeaux I, 33405 Talence cedex, France.

\*\*\* Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, C.P. 20899, 01498 – 970, São Paulo (Brésil).

\*\*\*\* ORSTOM, Programa de Geoquímica, Instituto de Química, U.F.F., 24020007 Niteroi (Brésil).

Manuscrit déposé le 18 octobre 1993 ; accepté après révision le 20 juin 1994.

09 OCT. 1995

Bull. Soc. géol. Fr., 1994, n° 6

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 42477 ed1

Cote : B

Studies of organic matter petrography have been made (1) upon density separated sediment ( $d < 2.2$ ) mounted on plexiglass slides and polished for reflected light observations and (2) upon chemically treated sediment (palynofacies). First a "total slide" is obtained by acid attack (HCl-HF) and a residual slide is made after a subsequent treatment with  $\text{HNO}_3$  and KOH. Reflectance of vegetal fragments has been measured by microphotometer under oil immersion.

In each sedimentary sequence TOC values are 2-3% in the clastic unit and reach 60% in the organic-rich unit (fig.3). With exception of the topmost 50 cm, the nitrogen content follows the TOC pattern: 0.1% in the clastic units and 3-4% in the organic-rich unit. The C/N ratio is low (10-11) in the clastic unit and high in the organic-rich unit (30-50). Isotopic analysis show little variations of  $\delta^{13}\text{C}$ : -20 to -27‰ in the clastic layers, with the more positive values in the lower sequences (fig.3), and -28 to -30‰ in the organic-rich units. Although precision of  $^{14}\text{C}$  data is limited, the data set strongly suggests that the sedimentation rate remains steady out of the sedimentary hiatus. This steady sedimentation rate allows to calculate sedimentary fluxes ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ) for the period under study. The fluxes are mainly influenced by element concentration and sediment porosity and density. The TOC flux follows the same general pattern than the TOC concentration. A zone of maximum flux exists between 40 and 80 cm depth in the core.

Observation with reflected light of the petrographic slides shows that the clastic layers contain dominantly inertinite (oxidized ligno-cellulosic fragments) whereas the organic-rich layers are rich in vitrinite (humified ligno-cellulosic fragments) and algal material composed by *Botryococcus*. The upper organic-rich layer is characterized by the presence of large quantity of small glossy star-shaped fragments. These particles are pyrofusinites (charcoal fragments), formed during forest fires and transported by the wind into the lacustrine environment. Measurements of reflectance upon ligno-cellulosic fragments allows to characterize the heterogeneity of the organic content. The results, under the form of histograms (fig. 5), show that in the clastic units the range is very wide, between 0.2 and 2%, whereas the range for the organic unit is 0.3 to 0.4%. In the upper organic unit this distribution is different: around 80cm the distribution is unimodal at 1%, then the range widens and adopts a bimodal distribution between 40 and 20cm with a first mode between 0.2 and 0.5% and a second one between 0.8 and 1.5%. Above 20 cm the histograms become again unimodal with a low value (0.3%).

Palynofacies analysis identified three types of allochthonous constituents: opaque ligno-cellulosic fragments, translucent ligno-cellulosic fragments, reddish amorphous organic matter, and one type of autochthonous component: greyish lumpy amorphous organic matter. The clastic layers are characterized by fine ( $< 20\mu\text{m}$ ) opaque ligno-cellulosic fragments and by greyish lumpy amorphous organic matter. This last one constitutes 60 to 80% of the organic material (fig. 6) and is formed by small rounded-shaped particles which probably are bacterial spores. The organic-rich units are rich in well-preserved translucent ligno-cellulosic fragments, their size ranges between 60 and 100  $\mu\text{m}$ . They represent 30% of the organic particles. The reddish amorphous organic matter can reach 60% of the organic content in these units. In the upper organic-rich unit, between 80 and 40 cm, we note again the presence of fine opaque ligno-cellulosic fragments, representing 30 to 50% of the organic content and corresponding to the pyrofusinites.

The petrographical approach allows confirmation and a better understanding of the geochemical results.

In order to prove the potential of organic palaeoenvironment markers, the results of this study were compared with those of the palynology obtained from the same samples [Absy *et al.*, 1991] (fig. 7). This comparison is consistent and provides a new framework of interpretation of palaeoclimatic changes. Indeed, during full development of the rain forest surrounding the plateau (humid conditions), the well preserved organic material which one observes in the organic levels of lacustrine sediments corresponds to high fluxes of TOC and nitrogen. On the contrary, during regeneration of the forest following the opening of the rain forest (dry conditions), the organic material, situated in siderite levels, is composed of amorphous organic matter (autochthonous organic fraction) and opaque ligno-cellulosic debris (allochthonous fraction) with small grain size. The increase of fluxes of TOC and N and the low C/N ratios shows improving in the quality and quantity of organic matter accompanying the forest development and the presence of algal material (*Botryococcus*) which indicates a better development of the lake. In the organic levels, emplaced during the Holocene forest regression, the maximum fluxes of TOC coincide with the presence of carbonised wood debris, proving to the existence of frequent forest fires. This study shows how sensitive is the lacustrine organic matter to environmental changes.

## I. - INTRODUCTION

Des études géomorphologiques [Ab'Saber, 1977; Tricart, 1974], écologiques [Absy, 1985; Colinvaux, 1979; Ochsenius, 1985; van der Hammen, 1974; Vanzolini, 1986] et paléohydrologiques [Servant *et al.*, 1981; 1993] ont montré que, dans les régions intertropicales, la forêt dense humide avait fortement régressé à différentes époques du Quaternaire, sous l'influence des changements climatiques globaux. Jusqu'ici, ces phénomènes étaient mieux connus en Afrique qu'en Amérique du Sud. Récemment, l'analyse palynologique d'une carotte de sédiments lacustres, prélevée dans le Sud-Est de l'Amazonie (Serra Dos Carajas), a montré qu'il s'était produit quatre phases d'ouverture de la forêt tropicale humide au cours des 60 000 dernières années [Absy *et al.*, 1991]. Dans le passé, les études sur le Quaternaire récent d'Amazonie ont le plus souvent concerné les régions basses inondables où les modifications de l'environnement sont contrôlées à la fois par les conditions locales et par celles à l'échelle du bassin versant. Cependant, la complexité

de la dynamique fluviale rend l'interprétation difficile. La Serra Dos Carajas (entre 5°50' et 6°35' S et 49°30' et 52°00' W) est un étroit plateau cuirassé dominant la forêt tropicale humide (fig. 1). Il existe sur ce plateau de nombreuses dépressions fermées ou semi fermées qui, dans ce cas, peuvent être interconnectées. De dimensions hectométriques, elles sont occupées par de petits lacs de 1 à 18 mètres de profondeur ou par des marécages. On rencontre tous les stades d'évolution entre des dépressions occupées par des lacs en eaux libres sans sédiments, des lacs en eaux libres en grande partie remplis de sédiments fins riches en matières organiques, des marécages couverts de graminées et des marécages couverts de palmiers. La végétation actuelle du plateau est constituée, soit par une savane arbustive dense à *Mimosa acutipila* et *liliastrum*, soit par une savane arbustive et buissonnante ouverte à *Croton argyrophyllus* et Graminea où les *Borreria* et *Compositae* atteignent un développement maximum. Toutefois, les spectres polliniques des sédiments actuels montrent une nette prédominance des sédiments forestiers originaires de la péri-

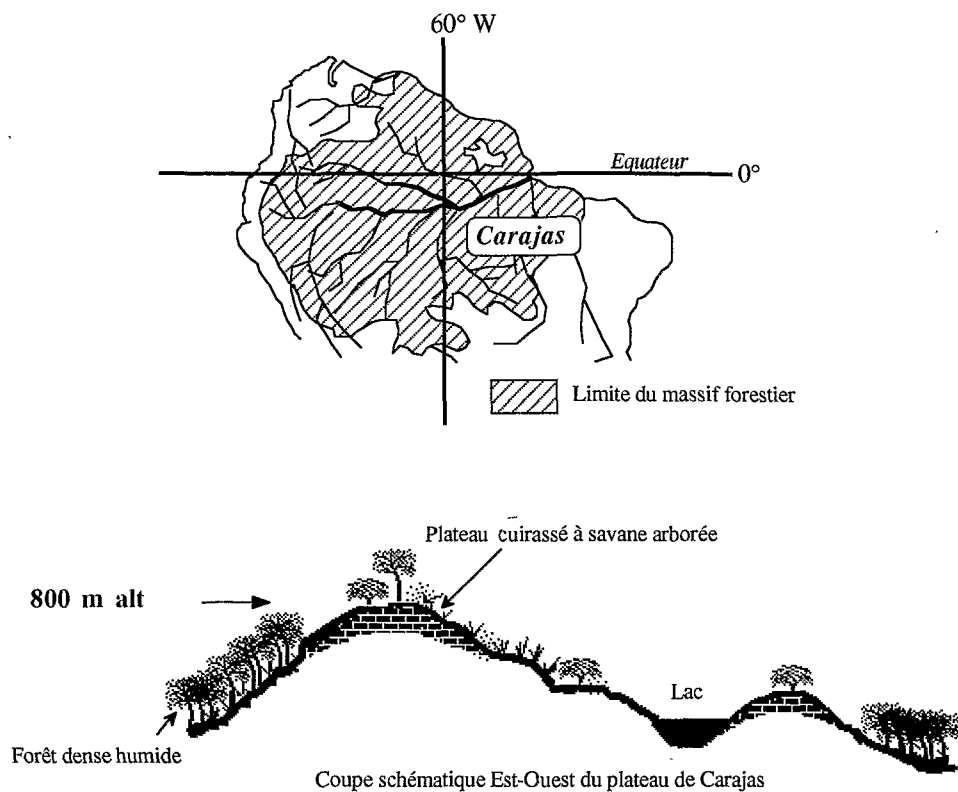


FIG. 1. — Carte de localisation de la Serra Dos Carajas.

FIG. 1. — Location map of the Serra Dos Carajas.

phérie du plateau (76%). Cela montre que les lacs du plateau de Carajas, véritables pluviomètres installés au-dessus du massif forestier, recueillent essentiellement des pollens d'arbres provenant de la forêt environnante. Il est donc clair que, par leur contenu pollinique, les sédiments des lacs enregistrent simultanément non seulement les variations de la végétation du plateau mais également celles de la forêt environnante. Par ailleurs, n'étant pas influencé par la dynamique fluviale, ce site est particulièrement intéressant. De plus, cette région, actuellement soumise à un climat relativement sec pour une zone de forêt dense humide (précipitations de l'ordre de 1500 à 2000 mm/an), est particulièrement sensible à de possibles variations climatiques. Le présent travail étudie les propriétés pétrographiques et géochimiques de la matière organique lacustre et les compare aux résultats de l'étude palynologique. Ceci devrait permettre de séparer les effets locaux (enregistrés par l'étude sédimentologique) des effets régionaux (enregistrés par l'étude palynologique).

## II. — MATÉRIEL D'ÉTUDE ET MÉTHODES

Une carotte de 6,50 mètres de longueur (CSS2) a été prélevée à l'aide d'un carottier à vibration [Martin et Flexor, 1989] au centre d'une de ces dépressions, aujourd'hui occupée par un marécage couvert de graminées. Les sédiments de cette carotte ont fait l'objet d'une étude générale [Sifeddine, 1991] : datations par le radiocarbone, minéralogie, analyse pollinique, géochimie isotopique ( $^{13}\text{C}$ ) de la matière organique, géochimie et pétrographie de la matière organique. Seuls les résultats concernant l'étude géochimique et l'étude pétrographique de la matière organique seront présentés ici.

Quatre séquences sédimentaires (fig. 2) ont pu être identifiées. Chacune d'elle débute par une couche de couleur brun-jaunâtre, de granulométrie sableuse essentiellement formée de granules de sidérite et accessoirement de quartz, d'hématite et de goethite. Cette couche basale est surmontée

par une couche organo-silteuse de couleur gris-noirâtre riche dans sa partie supérieure en fragments de bois. La limite supérieure des séquences très bien marquée, est irrégulière.

Dix datations  $^{14}\text{C}$  ont été effectuées sur la matière organique. La distribution des âges en fonction de la profondeur est cohérente et montre que la colonne sédimentaire couvre une durée d'environ 60 000 ans B.P. La courbe de distribution des âges fait apparaître un palier très marqué à la limite supérieure de la séquence III (fig. 2). Il est probable que d'autres paliers existent également à la base de chaque séquence sédimentaire mais ils sont moins bien définis. La courbe de distribution des âges montre que la sédimentation peut être considérée comme pratiquement constante dans chaque séquence sédimentaire.

Le carbone organique total (COT) et l'azote ont été dosés sur 104 échantillons prélevés tous les 6 cm, en utilisant respectivement la méthode de Walkley et Black et celle de Kjeldall [Bradstreet, 1965]. En ce qui concerne la mesure du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  exprimé sous la forme  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB), vingt échantillons, prélevés en fonction des faciès lithologiques, ont été analysés par spectrométrie de masse.

Pour les analyses pétrographiques de la matière organique, deux types d'observations ont été faites au microscope : (a) une observation en lumière naturelle réfléchie et sous excitation UV (raie 365 nm du mercure, séparation densimétrique à l'aide d'une liqueur dense inorganique de densité  $< 2,2$ , et montage en section polie); (b) une observation en lumière transmise sur le matériel organique séparé de sa fraction minérale par voie chimique. A cette fin, deux préparations montées entre lame et lamelle sont faites pour chaque échantillon : (a) une lame «totale» (après attaque HCl-HF) contenant la matière organique et quelques minéraux résistants, notamment des sulfures associés à la matière organique; (b) une lame résiduelle (après attaque  $\text{HNO}_3\text{-KOH}$  et séparation densimétrique) ne contenant qu'une fraction organique. Dans les sédiments récents, il

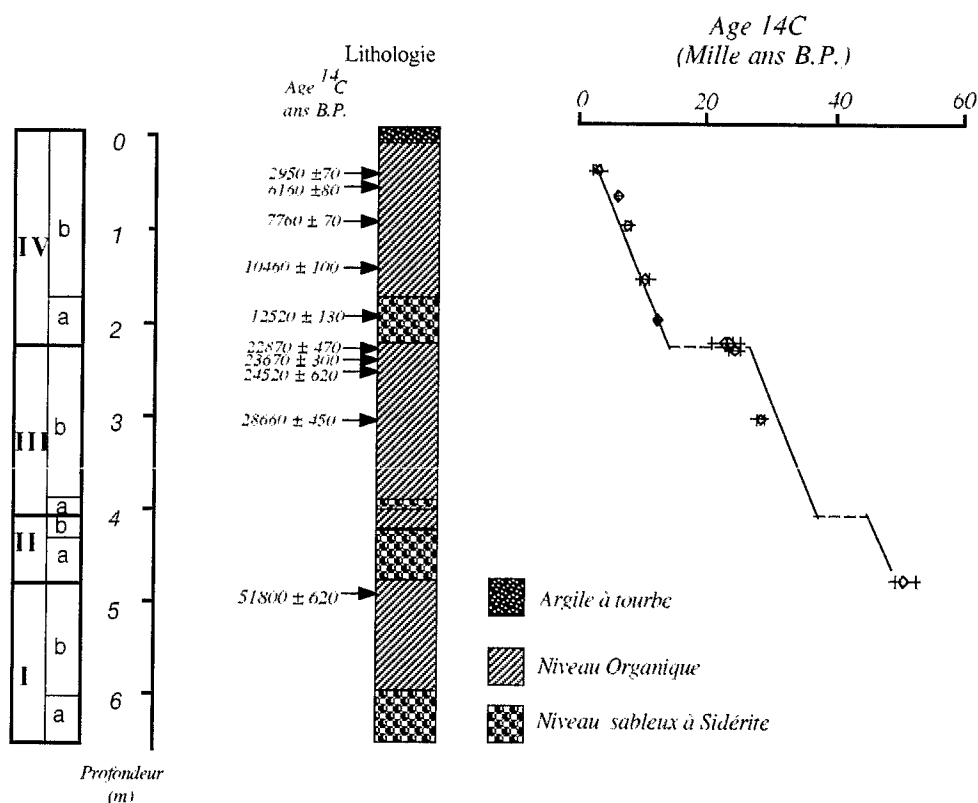


FIG. 2. — Variation des âges  $^{14}\text{C}$  le long de la carotte CSS2.

FIG. 2. — Variation of  $^{14}\text{C}$  ages in the CSS2 core.

est probable qu'une partie encore hydrolysable de la matière organique a été détruite lors de ces traitements. Néanmoins, cette partie est toujours minoritaire par rapport au contenu organique brut.

La mesure du pouvoir réflecteur des débris végétaux a été réalisée en immersion d'huile grâce à un microphotomètre associé au microscope. Elle peut s'appliquer à n'importe quel objet pourvu qu'il présente une surface polie suffisamment grande ( $25 \mu\text{m}^2$ ). Cette technique utilisée à l'origine pour la mesure du pouvoir réflecteur en tant que paramètre de rang dans l'étude de la diagenèse des charbons, a été employée dans ce travail pour tenter de caractériser l'hétérogénéité du cortège organique des sédiments lacustres de Carajas.

### III. — RÉSULTATS

#### A) Géochimie organique

Dans chaque séquence sédimentaire, le COT constitue 2 à 3 % du sédiment total dans les niveaux à sidérite, et plus de 50 % dans les niveaux organiques (fig. 3). Par ailleurs, on observe également quelques variations mineures, comme dans le niveau organique de la séquence III, entre 310 et 234 cm de profondeur, où le pourcentage du COT est plus faible (fig. 3). Par contre, les valeurs du COT sont particulièrement élevées dans le niveau organique supérieur de la séquence IV (60 % entre 40 et 80 cm de profondeur).

Exception faite des premiers 50 centimètres, la teneur en azote en fonction de la profondeur varie généralement comme celle du COT (fig. 3). Elle augmente progressivement à la transition entre chaque niveau à sidérite et le niveau organique qui le surmonte, passant de 0.1 % dans les niveaux à sidérite à 3 à 4 % dans les niveaux organiques. Dans le niveau organique de la séquence sommitale, et plus précisément entre 40 et 80 cm de profondeur, la teneur en azote diminue jusqu'à 1.5 %. Au delà, elle augmente jusqu'à

atteindre des valeurs plus fortes (3 à 3.5 %) que dans les niveaux organiques inférieurs.

Le rapport C/N est caractérisé par des valeurs comprises entre 10 et 11 dans le niveau détritique supérieur et entre 10 et 20 dans les niveaux détritiques moyen et inférieur. Il varie entre 30 et 50 dans les deux niveaux organiques (fig. 3).

Les analyses isotopiques montrent que les valeurs du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de la matière organique totale varient peu le long de la carotte : entre -28 et -30 ‰ dans les niveaux organiques, et entre -20 et -25 ‰ dans les niveaux à sidérite. Ceci est probablement lié à la diversité du contenu organique des sédiments étudiés qui sont constitués d'un mélange d'éléments d'origines différentes et ayant subi des transformations biologiques. La conséquence est un signal isotopique moyen tout au long de la carotte. Il est à noter que les niveaux à sidérite des deux premières séquences enregistrent un enrichissement en  $^{13}\text{C}$  par rapport au niveau à sidérite supérieur (-20 à -23 ‰ contre -25 à -27 ‰) (fig. 3).

Tout en gardant à l'esprit l'imprécision de la chronologie, on peut penser, au vu de la distribution des âges le long de la carotte, que la vitesse de sédimentation a été à peu près constante dans chaque séquence. Cette réserve faite, il est possible donc de calculer les flux sédimentaires exprimés en  $\text{g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  à l'intérieur de chaque séquence sédimentaire. Ces flux sont obtenus en multipliant la teneur de chaque constituant (g/g) par la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) et par le taux de sédimentation moyen ( $\text{cm.an}^{-1}$ ) pour chaque séquence sédimentaire.

Les courbes des flux de COT et de l'azote varient de la même manière que celles des pourcentages. Ils augmentent d'une manière progressive entre les faciès à sidérite et les faciès organiques qui les surmontent. Les flux maxima sont atteints par le niveau organique sommital entre 40 et 80 cm de profondeur (entre  $0.0015$  et  $0.0018 \text{ g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  pour le COT et entre  $5.10^{-4}$  et  $6.10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  pour l'azote) (fig. 4).

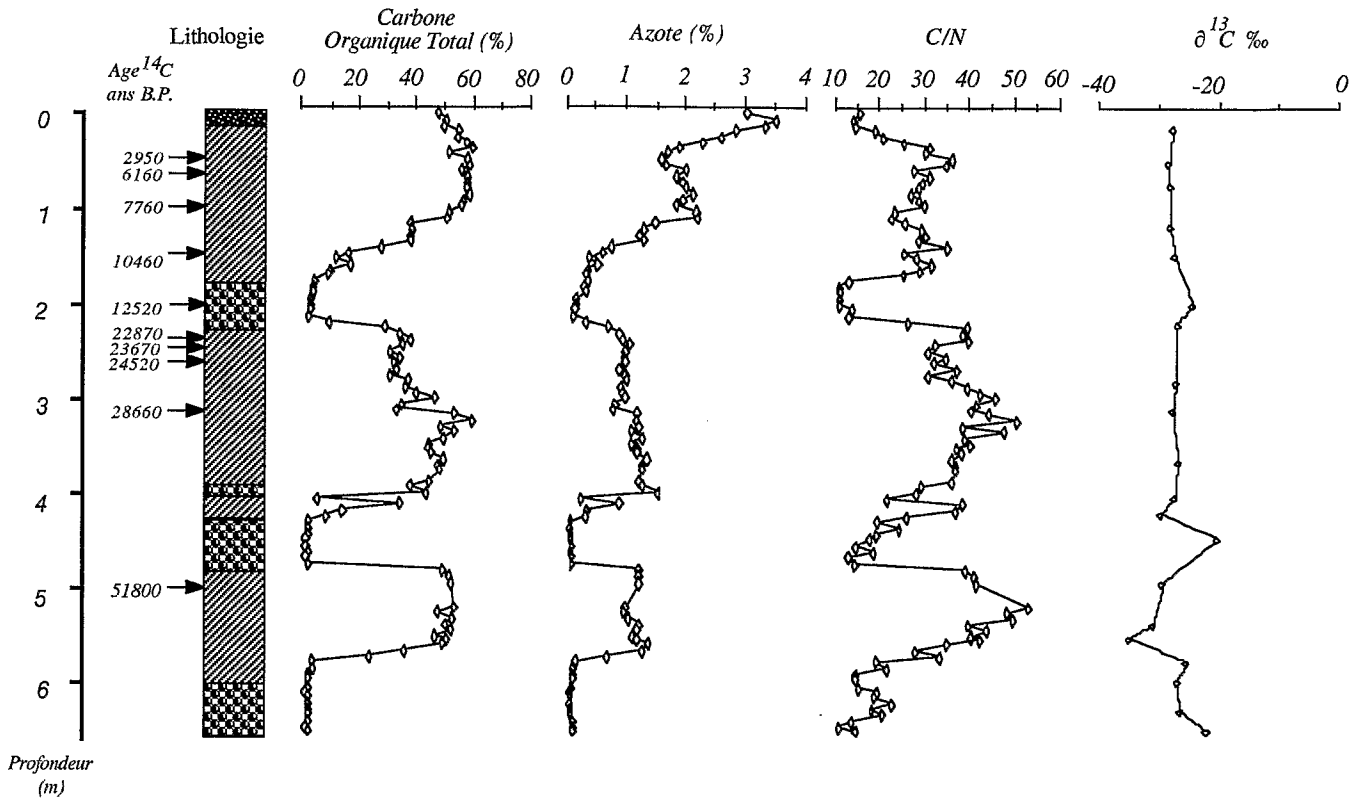


FIG. 3. — Variations des teneurs en carbone organique total (COT), en azote, et des rapports C/N et ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) le long de la carotte CSS2.  
 FIG. 3. — Variations of the percentages of total organic carbon (TOC), nitrogen (N), C/N and ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) ratios in the CSS2 core.

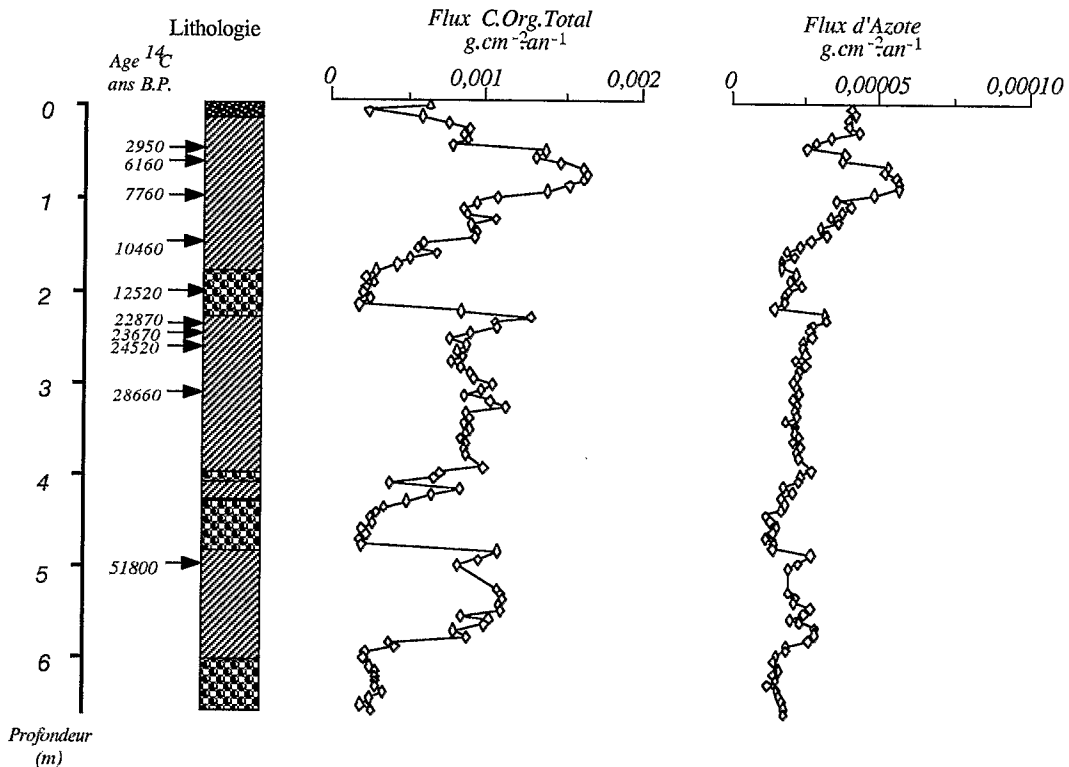


FIG. 4. — Variations des flux du carbone organique total (COT) et de l'azote (N) le long de la carotte CSS2.  
 FIG. 4. — Variations of the fluxes of the total organic carbon (TOC) and nitrogen (N) in the CSS2 core.

## B) Pétrographie organique

L'observation en lumière réfléchi montre que dans chaque séquence sédimentaire, les niveaux organiques sont riches en vitrinite (débris ligno-cellulosiques humifiés) généralement bien conservée, qu'ils sont pauvres en inertinite (débris ligno-cellulosiques oxydés) et présentent un matériel algaire constitué principalement par des colonies de *Botryococcus*. Les niveaux à sidérite contiennent essentiellement de l'inertinite. Le niveau organique de la séquence sommitale est caractérisé par la présence, en grande quantité, de petits débris très brillants de forme étoilée. Ces particules, appelés pyrofusinite (débris carbonisés), se forment lors d'incendies et sont transportés en aérosol jusqu'à leur lieu de dépôt [Scott, 1989].

La mesure du pouvoir réflecteur des débris ligno-cellulosiques a permis de quantifier l'hétérogénéité du contenu organique. Les résultats, regroupés sous forme d'histogrammes (fig. 5), montrent que, dans les niveaux organiques de chaque séquence sédimentaire, les valeurs du pouvoir réflecteur varient entre 0.3 et 0.4%. Par contre, dans les niveaux à sidérite, elles sont très étalées et comprises entre 0.2 et 2%. Dans le niveau organique de la séquence sommitale, les valeurs du pouvoir réflecteur montrent une distribution différente : vers 80 cm de profondeur, elles ont une distribution unimodale autour de 1% (fig. 5), entre 20 et 40 cm on distingue deux populations, une avec des valeurs comprises entre 0.2 et 0.5%, et une autre avec des valeurs entre 0.8 et 1.5%. En deçà de 20 cm de profondeur, les valeurs redevennent basses et ont une distribution unimodale (autour de 0.3%).

Dans l'analyse des palynofaciès, quatre types d'éléments figurés ont été définis en fonction de leur état de préservation et de leur origine génétique : des débris ligno-cellulosiques opaques (LCO), des débris ligno-cellulosiques translucides (LCT), de la matière organique amorphe rougeâtre (MOAR), tous d'origine allochtone et de la matière organique amorphe grisâtre grumeleuse d'origine autochtone (MOAG). Leur variation a été suivie le long de la carotte CSS2 afin d'apprécier leurs contributions au dépôt. Cette analyse en lumière transmise révèle que dans chaque séquence sédimentaire, les niveaux détritiques à sidérite sont caractérisés par l'abondance de débris ligneux opaques à parois amincies et de granulométrie très fine (< 20 µm) et par de la matière organique amorphe grisâtre se présentant sous forme d'amas globuleux à structure grumeleuse. Cette matière organique amorphe qui constitue 60 à 80% du total, est composée principalement de petites particules rondes qui sont vraisemblablement des spores de bactéries (P. Kaiser, communication orale). Le dernier niveau à sidérite se distingue des autres par la présence de débris ligneux translucides de grande taille (60 µm) qui peuvent constituer 15% du matériel organique figuré (fig. 6). Par contre, les niveaux organiques sont riches en débris ligneux translucides à structure cellulaire parfois bien conservée et de granulométrie grossière (60 à 100 µm). Ils constituent jusqu'à 30% du matériel organique figuré (fig. 6). La matière organique amorphe rougeâtre atteint parfois 60% du contenu organique. Dans le niveau organique de la séquence sommitale (entre 40 cm et 80 cm de profondeur), on note la réapparition de débris ligneux opaques très fins qui représentent 30 à 50% du matériel organique figuré. Ces débris opaques sont vraisemblablement des pyrofusinites.

## IV. — DISCUSSION ET COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS DE PALYNOLOGIE

Nous avons vu que le plateau de Carajas émergeait de la forêt tropicale humide. Cependant, plus de 76% des pol-

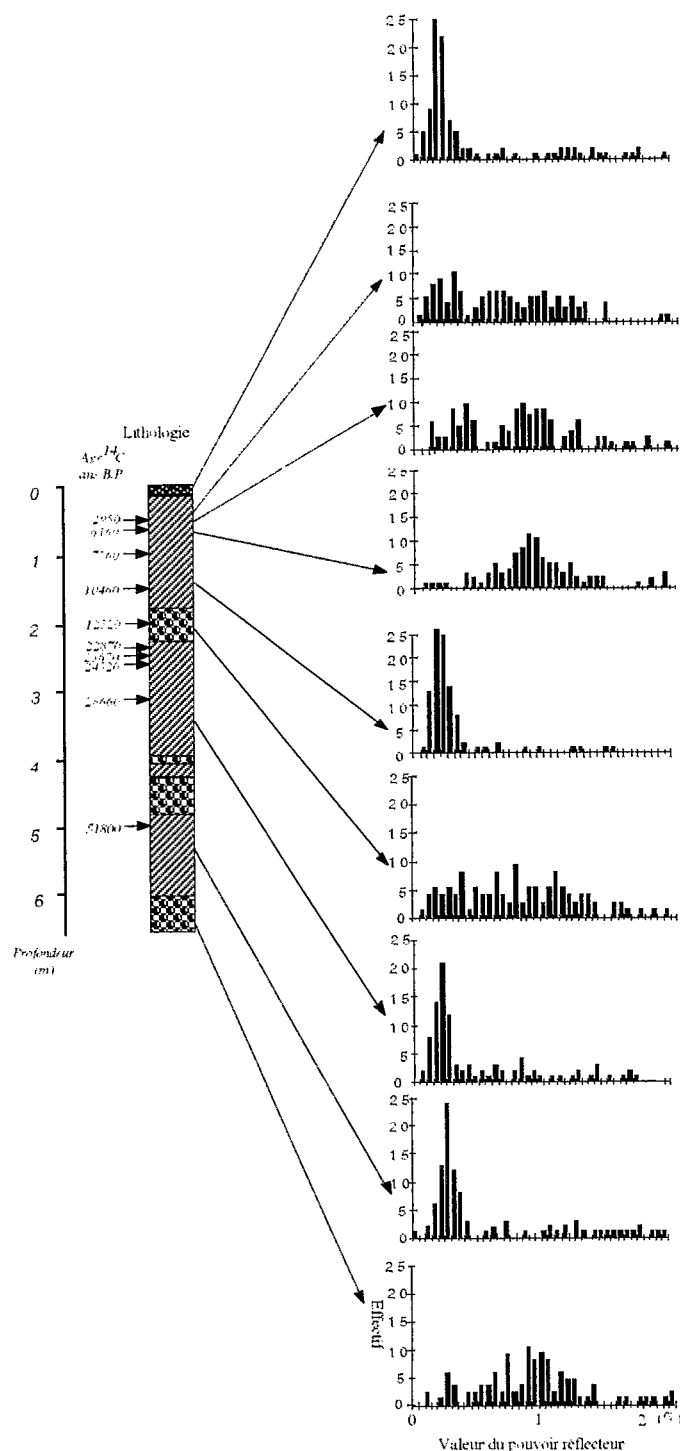


FIG. 5. — Variations des valeurs du pouvoir réflecteur le long de la carotte CSS2.

FIG. 5. — Variation of the reflectance values in the CSS2 core.

lens arborés de la partie superficielle des sédiments lacustres proviennent de cette forêt [Absy *et al.*, 1991]. Les variations du spectre pollinique de la CSS2 sont donc de bons indicateurs des variations de l'environnement régional. Les corrélations, entre l'enregistrement local (étude sédimentologique) et l'enregistrement régional (étude palynologique), montrent que la matière organique sédimentaire est très sensible aux variations des paléoenvironnements (fig. 7). En effet, dans les niveaux organiques, mis en place après

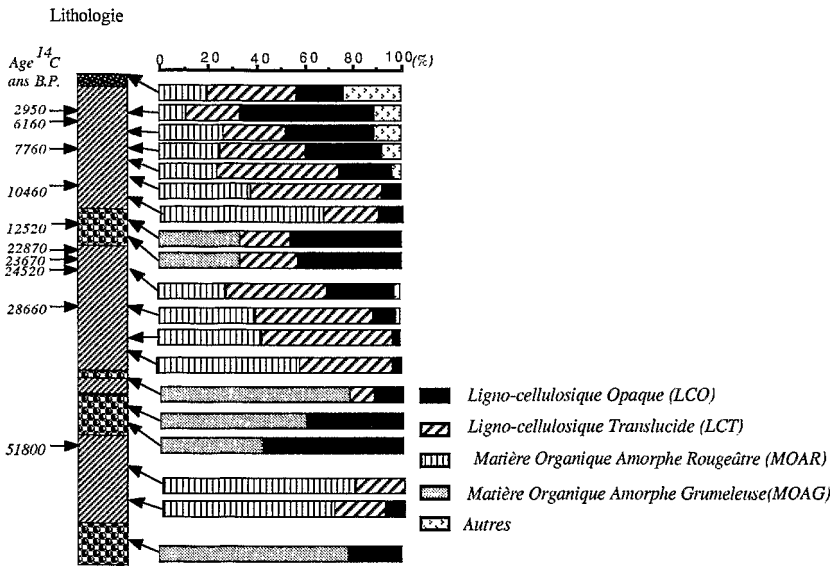
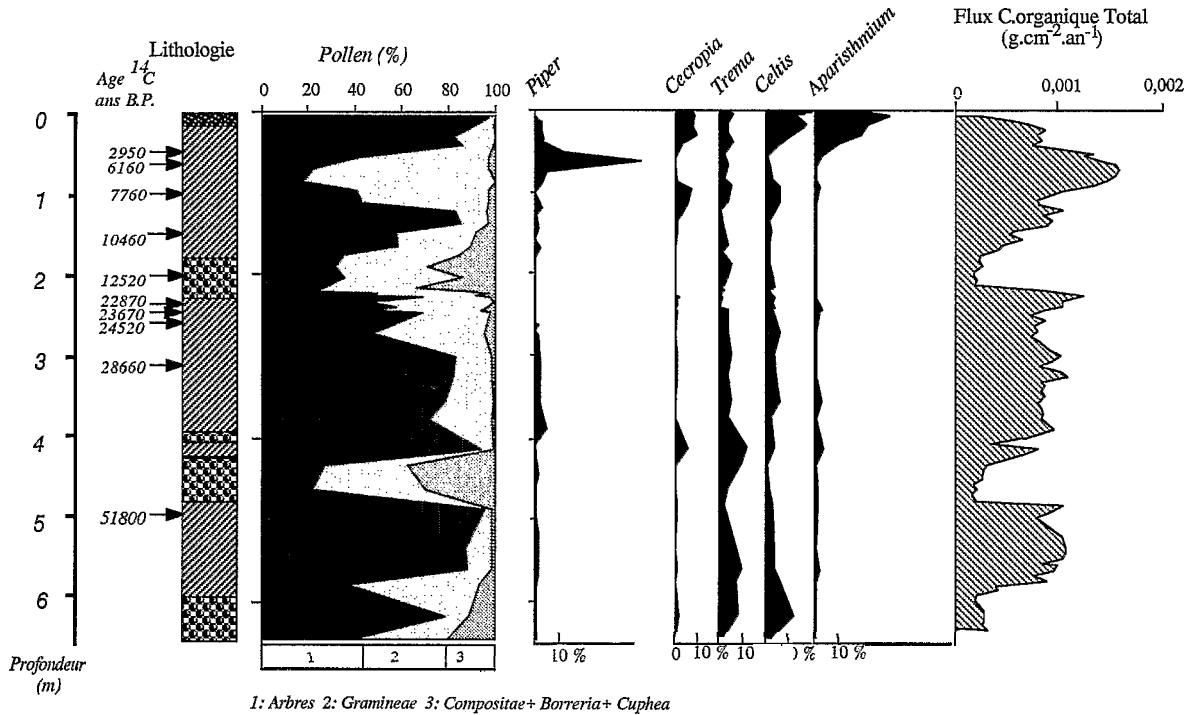


FIG. 6. – Composition des palynofaciès de la carotte CSS2.

FIG. 6. – Palynofaciès composition of the CSS2 core.



1: Arbres 2: Gramineae 3: Compositae+ Borreria+ Cuphea

FIG. 7. – Comparaison entre les flux du carbone organique et le spectre palynologique de la carotte CSS2.

FIG. 7. – Comparison between organic carbon fluxes and palynological spectra of the CSS2 core.

60 000 ans B.P., et 40 000 ans B.P. et entre 11 000 et 8 000 ans B.P., pendant les périodes de plein développement de la forêt autour du plateau de Carajas, la sédimentation, essentiellement organique, est caractérisée par des valeurs importantes des flux de COT et de l'azote. Cette richesse en carbone organique et en azote correspond à : (1) la présence d'une matière organique allochtone représentée essentiellement par des débris ligneux bien conservés à faible pouvoir réflecteur ; (2) un important matériel autochtone (planctonique) composé principalement de colonies

de *Botryococcus* non altérées. Cette bonne conservation de la matière organique sédimentaire atteste de la présence d'une tranche d'eau importante. Il est à noter, dans le niveau organique de la séquence III à partir de 314 cm daté d'environ 28 000 ans B.P., une modification dans la sédimentation organique. Celle-ci se matérialise par l'apport d'une fraction organique allochtone oxydée (augmentation des LCO) [Caratini *et al.*, 1983], et par un début d'altération des fractions autochtones, marqué par une diminution des valeurs du flux de COT et de l'azote. Cette modification

plaide en faveur d'une diminution progressive de la tranche d'eau jusqu'à l'assèchement complet du lac. La présence de fragments de bois et de spores d'une plante aquatique de bordure (Isoètes) dans la partie supérieure de ces niveaux vers 22 000 ans B.P. est en faveur de cette hypothèse. Après l'assèchement complet du lac, caractérisé par un hiatus entre 22 000 et 13 000 ans B.P., la sédimentation organique reprend. Cette reprise est contemporaine du développement de la forêt autour du plateau. Elle se caractérise par : (1) un apport en grande quantité d'une fraction organique allochtone dominée par les débris ligno-cellulosiques opaques oxydés sur le bassin versant pendant la phase antérieure, ce qui explique les valeurs très étalées du pouvoir réfecteur ; (2) un apport en grande quantité d'éléments minéraux pendant les phases érosives [Siffeddine, 1991], entraînant le début de la production lacustre primaire. Le maintien d'une végétation de bordure (Isoètes) au centre du lac suggère que le plan d'eau était instable et que le lac était soumis à des phases d'assèchement. Cette instabilité du plan d'eau favorise la dégradation de la matière organique autochtone lors de la diagenèse précoce (méthanogenèse), alors que la fraction allochtone composée principalement de débris ligno-cellulosiques oxydés, est inactive. Cette dégradation de la matière organique et l'apport en grande quantité de fer ferrique lors des phases érosives favorisent la néoformation de la sidérite sous un milieu réducteur [Curtis, 1987]. L'augmentation progressive des valeurs des flux de COT et de l'azote est dû à l'amélioration de la quantité et de la qualité de la matière organique représentée par une fraction allochtone plus préservée ce qui explique les faibles valeurs du pouvoir réfecteur, et par une fraction autochtone formée de colonies de *Botryococcus* qui deviennent de moins en moins altérées.

La phase la plus récente d'ouverture de la forêt (datée entre 7 000 et 4 000 ans B.P.) différenciée, comme nous l'avons vu, des précédentes par la rareté des taxons de savane, est caractérisée par ailleurs par la présence d'un fort pourcentage (> 40%) de pollens d'une végétation pionnière (*Piper*) [Absy *et al.*, 1991]. Ce fort pourcentage de pollens de *Piper*, durant près de 3 000 ans B.P., est tout à fait remarquable. Il indique qu'en moyenne les conditions climatiques étaient favorables à l'établissement de la forêt dense humide mais que les séquences végétales postpionnières n'ont pu se développer normalement. On peut penser que des incidents ont régulièrement bloqué le développement de la forêt. Par ailleurs, les dépôts organiques sédimentés à la même époque sont caractérisés par un flux maximum de COT qui s'explique par la présence d'abondants microcharbons de bois produits par des incendies de forêts [Scott, 1989] et transportés par aérosol. Ces microcharbons de bois sont incorporés aux autres fractions organiques, ce qui explique la distribution des pouvoirs réfecteurs dans ce niveau. Il est donc logique de penser que les incidents qui ont régulièrement bloqué le développement de la forêt sont des incendies qui, quelles que soient leurs origines (naturelle ou anthropique), n'ont pu se produire que pendant des périodes sèches. L'occurrence de telles périodes sèches a

pu être reliée à des modifications de la température de surface de l'océan Pacifique équatorial de type El Niño [Martin *et al.*, 1992, 1993]. Ceci laisse penser que le climat a connu une forte variabilité entre 7 000 et 4 000 ans B.P. Il en existe des évidences dans d'autres régions d'Amérique du Sud : paléo-incendies marqués par la présence de charbons de bois dans les sols sous forêt humide d'Amazonie [Sanford *et al.*, 1985 ; Soubiès, 1980], fortes et brèves périodes de ravinement des versants du Brésil central [Servant *et al.*, 1989], et périodes d'inversion du sens de la dérive littorale de quelques dizaines d'années de durée [Martin et Suguio, 1992] le long de la partie centrale de la côte brésilienne.

## V. - CONCLUSION

Les informations fournies par cette étude montrent que la qualité et la quantité de la matière organique sédimentaire sont très sensibles aux changements des paléoenvironnements. En effet, dans les niveaux sableux à sidérite riches en détritiques, où la matière organique est le plus souvent représentée par des débris ligneux opaques et un matériel algaire dégradé, les valeurs du flux de COT sont faibles. Par contre, dans les niveaux organiques, où la matière organique, en général bien conservée, est composée principalement par des débris ligneux translucides et un matériel algaire non dégradé, les flux du COT sont élevés. Par ailleurs, le niveau organique sommital (40-80 cm) à microcharbons est caractérisé par des valeurs maximales de ces flux.

De même, les résultats de la pétrographie organique des sédiments de la carotte montrent l'efficacité de cette méthode dans la reconstitution des paléoenvironnements. En effet, la quantité et la qualité des constituants organiques microscopiques varient tout le long de la carotte en bonne corrélation avec les résultats de l'étude palynologique des mêmes échantillons. La remise en eau du lac (début de développement de la forêt autour du plateau de Carajas) est caractérisée par la dominance des débris ligneux opaques accompagnés par un matériel algaire dégradé. C'est pendant cet épisode qu'on note la néoformation de la sidérite. Au contraire, les phases de haut niveau lacustre (extension de la forêt autour du plateau de Carajas) sont marquées par la dominance, des débris ligneux translucides bien conservés et d'un matériel algaire représenté par des colonies de *Botryococcus* non altérées. Cette approche nous a également permis d'individualiser un niveau organique particulier, riche en microcharbons indicateurs de paléo-incendies.

*Remerciements.* - Cette étude entre dans le cadre de recherche des programmes ORSTOM (GEOCIT, et HARP) et ORSTOM-CNRS (ECOFIT). Elle a été réalisée sous l'égide de la convention entre le CNPq (Conseil National de la Recherche Brésilienne) et l'ORSTOM. Nos remerciements s'adressent aussi à la compagnie minière Brésilienne (DOCEGEO) pour l'apport logistique (hélicoptère) qu'elle nous a fourni pour la réalisation des carottages.



## Références

- AB'SABER A.N. (1977). – Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul por ocasião dos períodos glaciais quaternários. – *Paleoclimas*, **3**, 1-19.
- ABSY M.L. (1985). – Palynology of Amazônia: the history of the forests as revealed by the palynological record. In: G.T. PRANCE & T.E. LOVEJOY, Eds. – Amazônia. – Pergamon Press, Oxford, 72-82.
- ABSY M. L., CLEEF A., FOURNIER M., MARTIN L., SERVANT M., SIFEDDINE A., FERREIRA DA SILVA M. F., SOUBIES F., SUGUIO K., TURCQ B., & VAN DER HAMMEN Th. (1991). – Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60 000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. – *C. R. Acad. Sci.*, Paris, II, **312**, 673-678.
- BRADSTREET R.B. (1965). – The Kjeldahl method for organic nitrogen. – Academic Press, New-York and London, 239 p.
- CARATINI C., J. BELLET C. & TISSOT B. (1983). – Les palynofaciès: représentation graphique, intérêt de leur étude pour les reconstitutions paléogéographiques, géochimie des sédiments marins. – ORGON à MISEDOR., CNRS, Paris, 327-352.
- COLINVAUX P. (1979). – The ice-age Amazon. – *Nature*, **278**, 399-400.
- CURTIS C. (1987). – Données récentes sur les réactions entre matières organiques et substances minérales dans les sédiments et sur leurs conséquences minéralogiques. – *Mém. Soc. géol. France, N. S.*, **151**, 127-141.
- MARTIN L., ABSY M.L., FLEXOR J. M., FOURNIER M., MOURGHIART P., SIFEDDINE A. & TURCQ B. (1992). – Enregistrements de conditions de type El Niño, en Amérique du Sud, au cours des 7 000 dernières années. – *C. R. Acad. Sci.*, Paris, II, **315**, 97-102.
- MARTIN L. & FLEXOR J. M. (1989). – Vibro-Testemunhador leve: Construção, utilização e possibilidades. – *2º Congresso da Associação Brasileira de estudo do Quaternário*, **1**, 1-2.
- MARTIN L., FOURNIER M., MOURGHIART P., SIFEDDINE A., TURCQ B., ABSY M.L. & FLEXOR J. M. (1993). – Southern oscillation signal in South American palaeoclimatic data of the last 7000 years. – *Quat. Res.*, **39**, 338-346.
- MARTIN L. & SUGUIO K. (1992). – Variation of coastal dynamics during the last 7 000 years recorded in beach-ridge plain associated with river mouths: example from the central Brazilian coast. – *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **99**, 119-140.
- OCHSENIUS C. (1985). – Pleniglacial desertification, large-animal mass extinction and Pleistocene boundary in South America. – *Revista Geografica Norte Grande*, **12**, 35-47.
- SANFORD R., SALDARRIAGA J., CLARK K.E., UHL. C. & HERRERA R. (1985). – Amazon rain-forest fires. – *Science*, **227**, 650-652.
- SCOTT A. C. (1989). – Observations on the nature and origin of fusain. – *Internat. J. Coal Geol.*, **12**, 443-475.
- SERVANT M., FONTES J.C., RIEU M. & SALIEGE J.F. (1981). – Phases climatiques arides holocènes dans le Sud-Ouest de l'Amazonie (Bolivie). – *C. R. Acad. Sci.*, Paris, II, **292**, 1295-1297.
- SERVANT M., FOURNIER M., SOUBIES F., SUGUIO K. & TURCQ B. (1989). – Sécheresse holocène au Brésil (18°-20° latitude Sud). Implications paléométéorologiques. – *C. R. Acad. Sci.*, Paris, II, **309**, 153-156.
- 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 changes*, **7**, 35-47.
- SIFEDDINE A. (1991). – La sédimentation en région tropicale humide (Carajás, Amazonie, Brésil): relation avec les modifications de l'environnement climatique au cours des 60 000 dernières années. – Thèse du Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 119 p.
- SOUBIES F. (1980). – Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons de bois (6 000-3 000 ans B.P.). – *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, **1**, 133-148.
- TRICART J. (1974). – Existence de périodes sèches au Quaternaire en Amazonie et dans les régions voisines. – *Rev. Géomorph. Dyn.*, **18**, 145-148.
- VAN DER HAMMEN TH. (1974). – The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. – *J. Biog.*, **1**, 3-26.
- VANZOLINI P.E. (1986). – Paleoclimas a especiação em animais da América do Sul tropical. – ABEQUA, Publ. Avulsa., São Paulo, **1**, 35 p.