

QUANTIFICATION DES CONSTITUANTS DÉTRITIQUES
PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE.
MISE EN ÉVIDENCE DE PÉRIODES DE FORTE ÉROSION
AU COURS DES 60 000 DERNIÈRES ANNÉES :
SITE DE CARAJAS (AMAZONIE ORIENTALE, BRÉSIL)

Abdelfettah Sifeddine
ORSTOM - Bondy

RÉSUMÉ

L'analyse par spectrométrie infrarouge des échantillons riches en matière organique d'un sondage de 6,50 m, prélevé dans une dépression marécageuse de la Serra Sul dos Carajas (Amazonie orientale), a été particulièrement privilégiée, car elle est la mieux adaptée à la nature du sédiment. Les résultats de cette analyse ont été à la base d'une évaluation des flux sédimentaires et en particulier de ceux des constituants détritiques. La variation des flux a permis la mise en évidence de quatre épisodes paléohydrologiques. Les trois plus anciens, caractérisés par d'intenses érosions sur le bassin versant, marqués par des valeurs maximales de flux détritiques et par la néoformation de sidérite, sont datés antérieurs à 60 000, 40 000, et entre 13 000 et 11 000 ans B.P.. Chacun de ces épisodes succède à une période d'assèchement du lac; ils caractérisent la transition entre un climat sec et un climat humide. Le dernier, entre 7000 et 4000 ans B.P., est caractérisé par un flux relativement faible de détritique montrant que l'érosion n'a été que faiblement renforcée.

INTRODUCTION

Le Quaternaire continental du bassin amazonien est encore de nos jours peu connu. Les travaux réalisés ces dernières années laissent penser qu'il a enregistré l'influence des variations climatiques au cours du Quaternaire et même de l'Holocène. Ces études se résument en quelques observations d'ordre écologique (Colinvaux, 1979, Vanzolini, 1986), géomorphologique (Tricart, 1974), pédologique (Soubiès, 1980, Sanford *et al.*, 1985) et palynologique (Van Der Hammen, 1974, Absy, 1979). Dans les forêts denses ces fluctuations se seraient manifestées par un déséquilibre du biotope végétal et l'installation de la savane, favorisant des phénomènes d'érosion et d'alluvionnement. Nous montrerons ici comment ces phénomènes peuvent être appréhendés par la spectrométrie infrarouge.

SITE D'ÉTUDE

Le plateau ferrifère de la Serra Dos Carajas, situé

entre 5°50' et 6°35' S de latitude et 49°30' et 52°00' W de longitude, présente un double intérêt pour la reconstitution de l'environnement climatique du Quaternaire. Situé en position haute, il échappe à la complexité de la dynamique fluviale des plaines amazoniennes. Actuellement soumis à un climat relativement sec pour une zone de forêt dense humide, il est caractérisé par des précipitations annuelles de 1500 à 2000 mm/an. On peut donc penser qu'il a été très sensible aux changements du climat. La végétation que l'on rencontre sur ce plateau cuirassé est soit une savane arbustive dense à *Mimosa acutipila* et *Sobralia liliastrum*, soit une savane arbustive et buissonnante ouverte à *Byrsonimia Coriacea*, *Croton argyrophyllus* et *Graminea* où *Borreria* et *Compositae* atteignent leurs extensions maximales.

MATÉRIELS D'ÉTUDE ET DATATION

Deux campagnes de carottage ont été menées en 1987 et 1988 par une équipe Franco-Brésilienne

(ORSTOM, CNPq) sur le site de Carajas. Les prélèvements ont été effectués dans différents lacs et marécages à l'aide d'un carottier à vibrations (Martin *et al.*, 1989).

Une carotte, de 650 cm de longueur, prélevée au centre du lac n°8, a fait l'objet d'une étude très détaillée (datation ^{14}C , géochimie isotopique et organique, diffraction aux rayons X, analyse infrarouge quantitative). De bas en haut on note l'existence de quatre séquences sédimentaires: I, II, III, et IV (Fig. 1). Chacune de ces séquences débute par une couche sableuse riche en sidérite contenant du quartz, de l'hématite et de la goethite, qui passe progressivement à une couche silteuse organique. La distribution des âges ^{14}C en fonction de la profondeur fait apparaître un palier très marqué (Absy *et al.*, 1991), situé au sommet de la séquence n°III, confirmant l'existence d'une lacune de sédimentation entre 22870 et 12520 ans B.P..

MÉTHODES

Dans une première phase, l'analyse sédimentologique classique a été faite à partir des observations à la loupe binoculaire et de la diffraction aux rayons X (Sifeddine, 1991). La diffractométrie aux rayons X de ces sédiments riches en matière organique peu évoluée a nécessité un traitement oxydant énergique. L'analyse infrarouge de ces échantillons traités a révélé la formation lors de ce traitement d'artefacts de silice amorphe, alors que les échantillons bruts ne présentent aucune trace de silice amorphe, ni en infrarouge, ni au microscope. C'est pourquoi les résultats présentés sur la figure 1 ont été obtenus sur des sédiments bruts.

1. Principe de la méthode

Le principe de la spectrométrie d'absorption IR est basé sur la perte d'énergie du rayonnement infrarouge par diffusion et surtout par absorption lors du passage des ondes à travers un milieu matériel. La perte par diffusion, peu importante, est due à la réflexion des ondes lors de la traversée d'un milieu d'indice de réfraction différent. La perte par absorption est plus importante. Elle intéresse certains domaines de longueurs d'onde du spectre infrarouge et se produit lorsque l'énergie irradiante correspond à l'énergie nécessaire pour faire passer les molécules d'un état de vibration normale à un état de vibration excitée. Cette excitation s'opère lorsque les vibrations moléculaires entrent en résonance avec les vibrations électromagnétiques. La fréquence de l'onde radiante doit correspondre à un des modes de vibration de la molécule.

Si J est l'énergie transmise après la traversée de la matière, J_0 l'énergie incidente émise par la source, la loi de Lambert-Beer permet d'écrire: $J = J_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l \cdot c}$ où c est la concentration de la substance à doser, l la longueur du trajet optique à travers la matière, et α le coefficient d'extinction spécifique du type de molécule rencontré (cf. Fröhlich, 1981).

En définissant l'absorbance $A = \alpha \cdot l \cdot c$ et la transmission T en % par le rapport $T = J/J_0$, il vient :

$$A = \log 1/T$$

La mesure de T en % se fait directement sur l'ordonnée de l'enregistrement des spectres IR. Cependant sur les spectres de phase solide, la transmittance n'est jamais égale à 100% en raison du diluant. On démontre alors que

$$A = \text{Log } T_0/T$$

où T_0 est déterminé en traçant une ligne de base qui est la tangente commune aux épaulements encadrant la bande d'absorption et T la longueur de la bande d'absorption.

Les fréquences d'absorption du rayonnement IR caractérisent des groupements chimiques et des radicaux indépendamment de leur état cristallin. Les groupements chimiques CO_3^{2-} , SiO_4^{2-} , OH^+ ... ont des fréquences de vibration connues permettant de différencier les carbonates, les silicates, les sulfates etc. Un grand nombre de spectres de référence sont ainsi disponibles (Van Der Marel et Beutelspacher, 1976).

2. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été préparés conformément à la procédure mise au point pour les roches sédimentaires (Fröhlich, 1981). L'analyse a été faite sur un spectromètre d'absorption dispersif Pye Unicam SP 2000. Pour chaque échantillon, les principaux constituants ont été déterminés et dosés sur les mêmes spectres. Le calcul des concentrations, mené à partir de plusieurs bandes d'absorption pour chaque minéral, a nécessité souvent des opérations en séquence, en raison du recouvrement partiel des absorptions de certains constituants (Fröhlich, 1989). La précision des mesures est variable d'un constituant à l'autre et peut aller dans le cas qui nous intéresse, de 2 à 5%.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de l'analyse infrarouge sont regroupés dans la figure 1. Parmi les constituants déterminés sur les spectres (matière organique, goethite, hématite, sidérite, quartz, kaolinite, silice amorphe), seuls les quatre derniers ont été pris en considération et dosés en vue de comparer les variations de leur contribution au dépôt. On rappelle que ces mesures donnent des valeurs de concentration en gramme par gramme de sédiment. Ils montrent pour chacun de ces quatre constituants des courbes de même allure.

Il est à remarquer l'importance sporadique de la sidérite authigène, dont la teneur peut aller jusqu'à 40% du sédiment sec. On remarque également, surtout dans des niveaux bien marqués, l'importance du quartz et de la kaolinite dont les teneurs évoluent parallèlement. Les niveaux les plus riches peuvent ainsi montrer près de 40% de

détritiques (quartz, kaolinite). Au sommet de la série, les dépôts organiques montrent une proportion constante, et souvent non négligeable de détritique (jusqu'à 16% du sédiment brut, séché). Le niveau organique de la série supérieure se distingue des autres par sa grande richesse en silice amorphe attribuée sans aucun doute aux spicules d'éponges dont la teneur atteint sa valeur maximale entre 75 et 80 cm de profondeur (18% du sédiment brut).

La validité du signal minéralogique que constituent les courbes de la figure 1 est attesté par la stabilité de la vitesse de sédimentation pour chaque séquence sédimentaire. Les résultats de cette analyse ont été à la base d'une évaluation des flux sédimentaires. Ces flux exprimés en $g.cm^{-2}.an^{-1}$ ont été calculés par multiplication des taux d'accumulation ($g.cm^{-3}$) et du taux de sédimentation moyen

fragments de bois au sommet des dépôts organiques de chaque séquence sédimentaire témoigne de l'implantation d'une végétation arborée dans le fond asséché du lac.

Les âges ^{14}C et les flux du quartz et de la kaolinite nous permettent de mettre en évidence quatre épisodes paléohydrologiques datés respectivement d'environ 60 000 ans B.P., 40 000 ans B.P., entre 13 000 et 11 000 ans B.P. et entre 7000 et 4000 ans B.P.. Le dernier présente des particularités paléohydrologiques qui le distinguent des trois autres.

Les trois épisodes les plus anciens sont caractérisés par l'augmentation des flux de quartz, de kaolinite et de fer, traduisant une forte érosion du plateau cuirassé de Carajas. Cela peut s'expliquer par des précipitations orageuses, et un

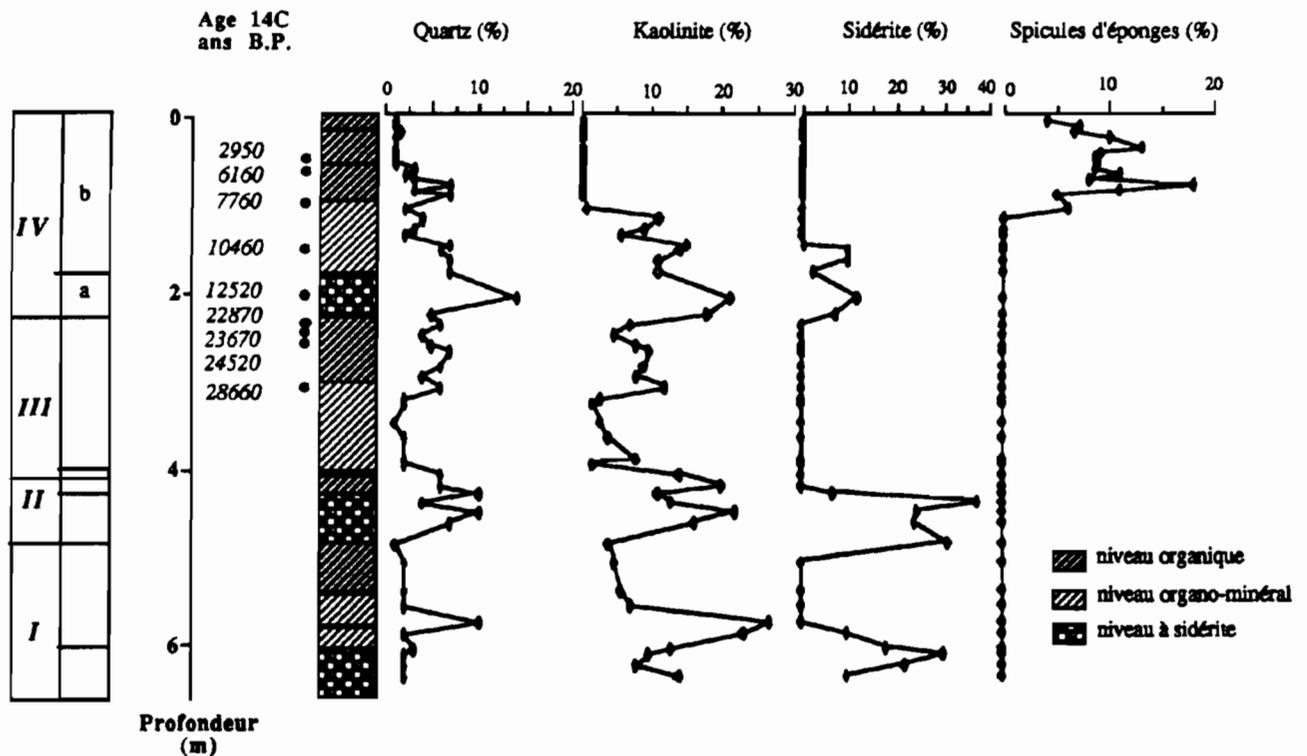


Figure 1 - Lac n°8, carotte CSS2 : évolution des teneurs en quartz, kaolinite, sidérite et silice amorphe (spicules d'éponges).

($cm.an^{-1}$) pour chaque séquence sédimentaire. Cette représentation nous renseigne sur les apports des différents constituants indépendamment les uns des autres.

La variation des flux détritiques (Fig. 2) permet de mettre en évidence des périodes de sécheresse dont le maximum s'est manifesté par un arrêt de la sédimentation dans le lac. Les deux plus anciennes sont antérieures à 60 000 et 40 000 ans B.P., la troisième encadrée par deux âges ^{14}C se situe entre 23 000 et 13 000 ans B.P.. Il est toutefois important de noter que l'époque sèche datée entre 23 000 ans B.P. et 13 000 ans B.P. s'est amorcée vers 28 000 ans B.P. puisque à partir de cette date on note une augmentation des flux détritiques (quartz, kaolinite). La présence de

intense ruissellement sur un bassin versant probablement encore pauvre en végétation et mal protégé. Pendant ces phases la forêt amorce son installation autour du plateau mais n'atteindra son développement maximum que tardivement (Absy et al., 1991).

La période d'ouverture de la forêt la plus récente datée entre 7000 et 4000 ans B.P. se différencie des autres par une quasi absence des taxons de savane et par la présence d'espèces pionnières de la strate basse «Piper». Les faibles flux détritiques, enregistrés dans les dépôts organiques mis en place pendant cette période, suggèrent une faible intensité d'érosion. L'apparition d'une seule espèce d'éponge *Corvomeyenia thumi* (Volkmer Ribeiro, communication

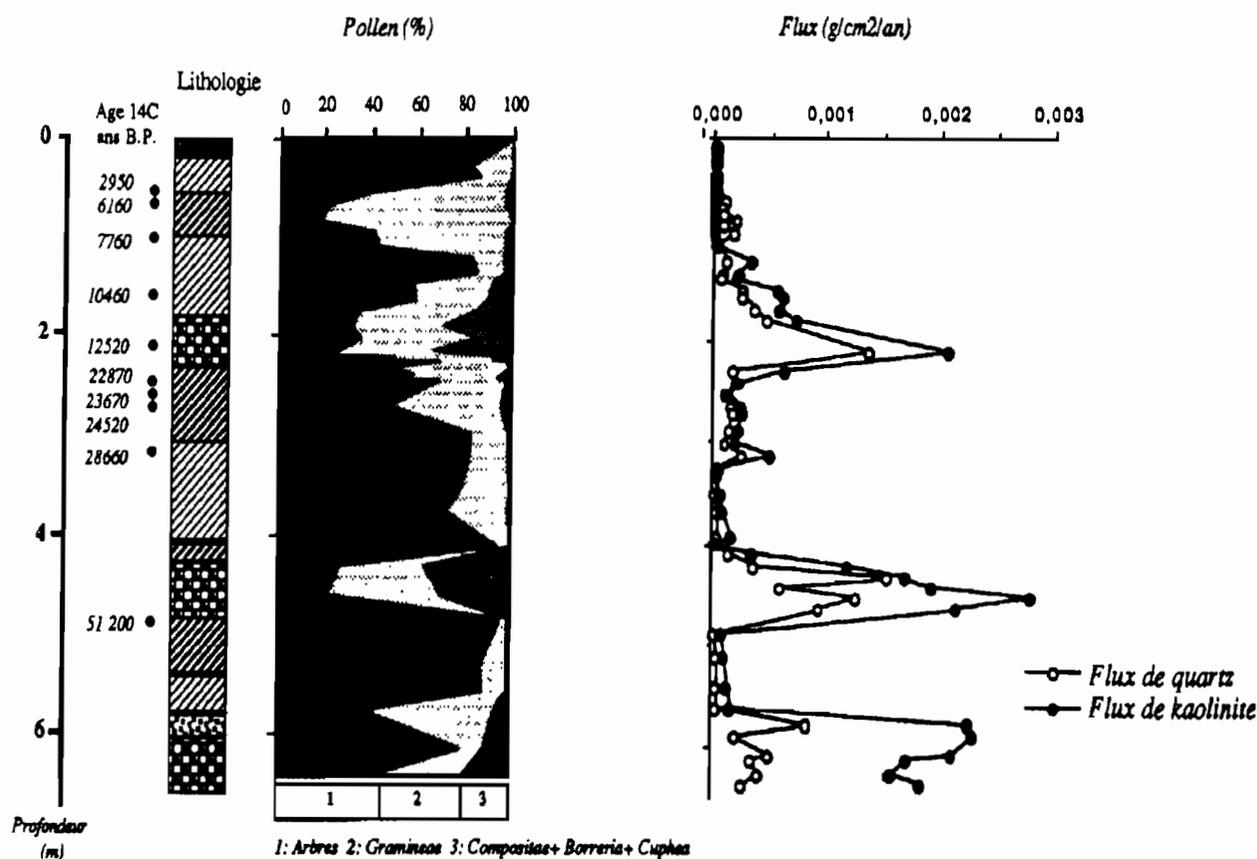


Figure 2 - Lac n°8, carotte CSS2 : évolution des flux en détritiques et du couvert végétal.

orale) montre que pendant cette période le lac était bas mais sans toutefois être sec en permanence, sinon les éponges n'auraient pu se développer. Cela semble indiquer l'existence d'une succession d'assèchements et de remises en eau du lac en relation avec des événements climatiques. Cette hypothèse est renforcée par la présence de microcharbons, ce qui implique de fréquents incendies au cours des périodes sèches.

CONCLUSION

La signature minéralogique des événements climatiques récents, à l'aide de cette analyse quantitative globale, paraît très lisible. Ainsi les niveaux à sidérite riches en quartz et en kaolinite caractérisent-ils les phases de forte érosion sur le plateau de Carajas par opposition aux niveaux organiques où le détritique chute à des valeurs minimales. La néoformation des carbonates de fer traduit la remise en eau du lac. Les spicules d'éponges traduisent des conditions d'assèchement épisodiques locales du lac. Les microcharbons du bois sont des enregistreurs des incendies autour du plateau, donc des conditions de sécheresse épisodiques régionales.

Le dernier maximum glaciaire, daté entre 22 000 et 15 000 ans B.P., et les deux épisodes froids antérieurs du

Pléistocène supérieur sont marqués à Carajas par un arrêt de la sédimentation (hiatus) entre 23 000 et 13 000 ans B.P. et vers 40 000 et 60 000 ans B.P..

Trois épisodes d'intenses érosions, s'étant produits respectivement après 60 000, 40 000 ans B.P. et entre 13 000 et 11 000 ans B.P., sont mis en évidence à Carajas. Ces épisodes sont marqués par l'augmentation des flux détritiques (quartz, kaolinite) et par la néoformation de sidérite. Ces époques érosives marquent un changement brusque entre un climat probablement aride et un climat à précipitations orageuses.

La période de 7000 à 4000 ans B.P., différenciée des autres par une quasi-absence des taxons de savane et par la présence d'espèces pionnières de la strate basse «Piper», est marquée à Carajas par des flux détritiques très faibles, et par une abondance de microcharbons de bois, témoin de fréquents incendies. Cette phase climatique, caractérisée par la succession de phases sèches et humides à Carajas, est identifiée dans d'autres régions d'Amérique du Sud. Elle s'est traduite par des modifications de la température de surface de l'Océan Pacifique équatorial de type El Nino (Martin et al., 1992, 1993), par une réduction du débit de l'Amazonie (Showers, 1988), par des incendies (Soubiès, 1980), d'intenses érosions (Servant et al., 1989). Sur l'Altiplano Bolivien le niveau du lac Titicaca après s'être

abaissé d'une soixantaine de mètres a oscillé autour d'un niveau plus au moins constant (Wirrmann, 1989; Mourguiart, 1991). Ces évolutions paléoclimatiques de l'Amérique du

Sud entre 7000 et 4000 ans B.P. s'opposent à celles de l'Afrique Occidentale puisque à 6000 ans B.P. on note une augmentation des niveaux des lacs (Servant, 1993).

Remerciements

Cette étude entre dans le cadre de recherche des programmes ORSTOM (GEOCIT, HARP et ECOFIT) Elle a été réalisée dans le cadre 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 (DOGEGEO) pour l'apport logistique (hélicoptère) qu'elle nous a fourni pour la réalisation des carottages. Sont également remerciés Messieurs Marc FOURNIER, François FRÖHLICH, Louis MARTIN, Michel SERVANT et Monsieur TAMBAY pour la publication ou la réalisation de ce travail

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Absy M. L., Cleef A., Fournier M., Martin L., Servant M., Siffedine A., Ferreira da Silva M. F., Soubiès 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.
- Colinvaux P. (1979). The ice -age Amazon. – *Nature*, 278, p. 399-400.
- Fröhlich F. (1981). - Les silicates dans l'environnement pélagique de l'océan Indien au cénozoïque – *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle*, Série C, Sciences de la Terre, t. XLVI, 206pp.
- Fröhlich F. (1989). - Deep biogenic silica: new structural and analytical data from infrared analysis geological implications. – *Terra Nova*, Vol.,1, p. 267-273.
- Martin L., Fournier M., Mourghiart P., Siffedine A., Turcq B., Absy M.L. & Flexor J. M. (1993) - Southern Oscillation Signal in South American Palaeoclimatic Data of the Last 7000 Years. – *Quaternary Research*, 39, p. 338-346.
- Martin L., Absy M.L., Flexor J. M., Fournier M., Mourghiart P., Siffedine A. & Turcq B. (1992) - Enregistrements de conditions de type El Niño, en Amérique du Sud, au cours des 7000 dernières années. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, II, 315, p. 97-102.
- Sanford, R., Saldarriaga J., Clark K.E., Uhl C. & Herrera R. (1985) - Amazon rain-forest fires. – *Science*, 227, p. 650-652.
- 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. Sc.*, Paris, II, 292, p. 1295-1297.
- Servant M., Fournier M., Soubiès F., Suguio K. & Turcq B. (1989) - Sécheresse holocène au Brésil (18°-20° latitude Sud). Implications paléométéorologiques. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, II, 309, p. 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, p. 35-47.
- Siffedine A. (1991) - La sédimentation en région tropicale humide (Carajas, 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 pp.
- Soubiès, F. (1980) - Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons de bois (6000-3000 ans B.P.) – *Cah. ORSTOM*, Sér. Géol., 1, p. 133-148.
- Tricart J. (1974) - Existence de périodes sèches au Quaternaire en Amazonie et dans les régions voisines. – *Rev. Géomorph. Dyn.*, 18, p. 145-148.
- Van der Hammen TH. (1974) - The pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. – *Jour. of Biog.*, 1, p. 3-26.
- Van der Marel H.W., & Beutelspacher H. (1976) - Atlas of IR spectroscopy of clay mineral and their admixtures. Elsevier.
- Vanzolini P.E. (1986) - Paleoclimas a especiação em animais da América do Sul tropical. – *ABEQUA, Publ. Avulsa.*, São Paulo, 1, 35 pp.
- Wirrmann D., Ybert J.P., and Mourguiart Ph. (1991) - A 20000 record paleohydrological record from lake Titicaca, in *Lake Titicaca, Synthesis of the Limnological knowledge*, Dejoux C., and Iltis A. (eds), Klawer, sous presse.

Sifeddine Abdelfettah. (1993).

Quantification des constituants détritiques par spectroscopie infrarouge : mise en évidence de périodes de forte érosion au cours des 60000 dernières années : site de Carajas (Amazonie orientale, Brésil).

In : Spectroscopie infrarouge et analyse minéralogique quantitative des roches : méthode et résultats nouveaux.

Bondy : ORSTOM, p. 27-31 multigr.

Spectroscopie Infrarouge et Analyse Minéralogique Quantitative des Roches : Méthode et Résultats Nouveaux : Journée d'Etude, Bondy (FRA), 1993/12/15.