

4

Enregistrement de la phase sèche d'Afrique Centrale vers 3 000 ans BP par la spectrométrie IR dans les lacs Sinnda et Kitina (Sud-Congo)

JACQUES BERTAUX, DOMINIQUE SCHWARTZ, ANNIE VINCENS,
ABDELPETTAH SIPPEDDINE, HILAIRE ELENGA, MAJID MANSOUR,
ANDRÉ MARIOTTI, MARC FOURNIER, LOUIS MARTIN,
DENIS WIRRMANN, MICHEL SERVANT

Introduction

L'assèchement climatique holocène supérieur mis en évidence dans le Sud du Congo (Schwartz, 1992) a provoqué des changements majeurs de végétations, observés en particulier dans la vallée du Niari (lac Sinnda, Vincens *et al.*, 1994) et dans le massif forestier du Mayombe (lac Kitina, Elenga *et al.*, 1996), sur la base de l'étude du contenu pollinique de sédiments lacustres. Parallèlement à ces études paléobotaniques, une quantification par spectrométrie IR des phases minérales de ces sédiments a permis de calculer les flux minéraux, dans le but de comprendre les relations entre la dynamique sédimentaire et l'évolution du couvert végétal, lui-même conséquence de la variabilité climatique.

Sites étudiés, matériel et méthodes

Le lac Sinnda (12° 48' E, 3° 50' S) est situé dans la vallée du Niari, au Nord de Loudima. Dans cette région, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1100 mm, avec une saison sèche de cinq mois. La vallée du Niari est dans son ensemble occupée par des savanes qui séparent les massifs forestiers du Mayombe et du Chaillu (Figure 1). Le lac Kitina (12° E, 4° 16'S) est situé sur la bordure ouest du Mayombe, au cœur d'une forêt sempervirente de transition vers un type semi-caducifolié. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 1300 mm, avec une saison sèche de quatre mois.

Les carottes SN2 (lac Sinnda, 380 cm) et KT3 (lac Kitina, 625 cm) ont été prélevées à l'aide d'un carottier à vibration (Martin et Flexor, 1987), respectivement sous une profondeur d'eau de 4,70 et 4,50 m.

La carotte SN2 est représentée dans sa partie supérieure (0 à 80 cm environ) par un sédiment argilo-organique brun-noir riche en débris végétaux (Figure 2); la partie inférieure (80 à 380 cm) est un sédiment argileux gris relativement pauvre en matière organique. La limite entre ces deux niveaux est constituée par un paléosol, identifié comme étant un sol hydromorphe de type gley. Des fentes de dessiccation remplies de matériel identique au sédiment de la partie supérieure recourent le sommet de la partie inférieure. Des analyses par diffraction X, par spectrométrie infrarouge et l'observation de frottis de sédiments au microscope polarisant montrent que le sédiment est composé de matière organique dont une importante fraction figurée d'origine végétale, de quartz, kaolinite, illite, talc, calcite et silice amorphe biogène (diatomées, spicules et phytolithes), avec des traces de smectites et pyrite.

L'analyse isotopique ($\delta^{13}\text{C}$ et δO^{18}) de la calcite (Tableau 1) semble exclure une précipitation synsédimentaire dans un milieu riche en matières organiques, et suggère plutôt une origine détritique, par érosion de carbonates marins. L'illite, le talc et les smectites ne font pas partie du cortège minéralogique des sols ferrallitiques, et comme la calcite proviennent probablement de l'érosion d'affleurement d'altérites. Six datations C^{14} sur matière organique totale sont disponibles sur cette carotte (Tableau 2).

Pour la carotte KT3, de 0 à 60 cm, le sédiment est une vase organique gris foncé. De 60 à 210 cm, le matériau est plus organique, la base de ce niveau étant constituée de deux bandes organiques sombres. De 210 à 625 cm, le sédiment est une argile organique grise riche en vivianite ter-

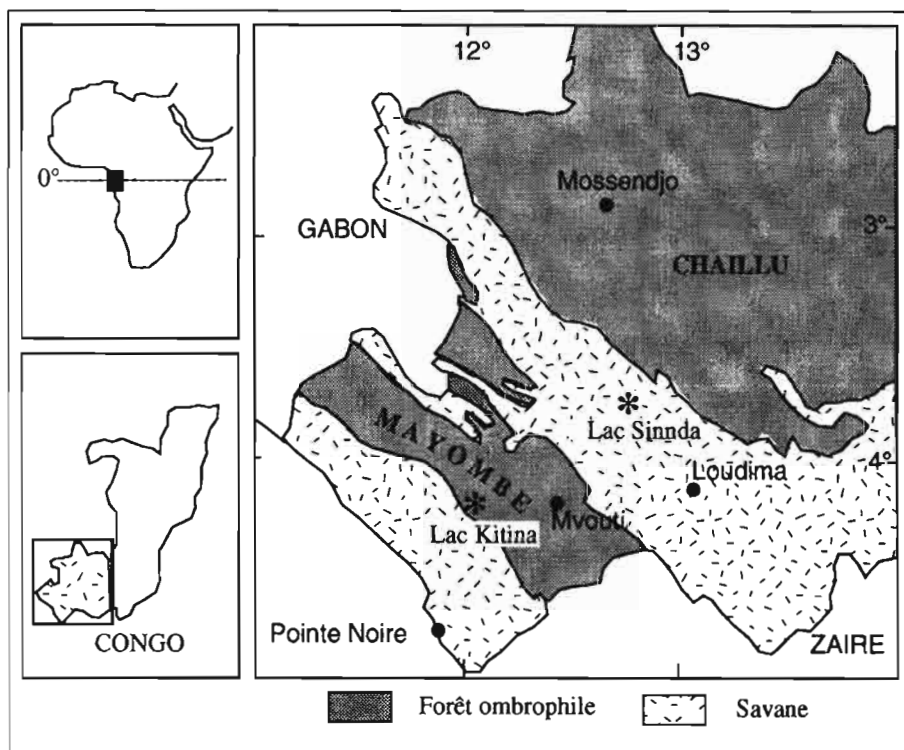


Figure 1
Localisation
des lacs Kitina
et Sinnda.

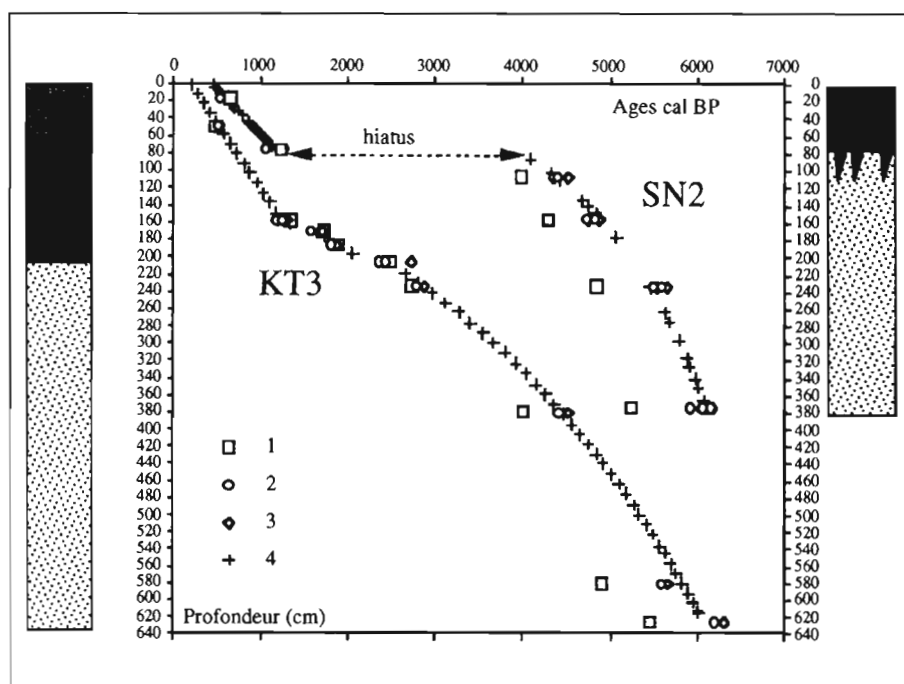


Figure 2
Logs stratigraphiques
schématiques, datation C^{14}
et extrapolations des âges
calendaires BP sur les carottes
SN2 et KT3.
(1) C^{14} BP.
(2) Âges calendaires
BP minimum.
(3) Âges calendaires BP
maximum.
(4) Âges calendaires
BP extrapolés.

reuse bleue. Les analyses par spectrométrie infrarouge et l'observation de frottis montrent que le sédiment est composé de matière organique, quartz, kaolinite, gibbsite, sidérite, vivianite et silice amorphe biogène, essentiellement diatomées et phytolithes. La sidérite (et la vivianite) proviennent de précipitation synsédimentaire (diagenèse précoce) dans le lac, en relation avec des apports détritiques (apport de fer sous forme d'hydroxydes amorphes et flux relativement important de carbone organique) dans un milieu à faible teneur en sulfates dissous (Rajan *et al.*, 1996). Six datations C^{14} AMS sur matière organique totale ont été effectuées (Tableau 2).

Les analyses minérales quantitatives (44 échantillons pour SN2 et 54 pour KT3) ont été effectuées selon la

méthode de Bertaux *et al.* (1996). Les composants minéraux majeurs ont été dosés : quartz, kaolinite, talc, calcite et silice amorphe pour SN2 ; quartz, kaolinite, gibbsite, sidérite et silice amorphe pour KT3. Chaque phase minérale présente dans le sédiment a un spectre d'absorption IR spécifique (Figure 3a), et dans les conditions analytiques utilisées (broyage au dessous de 2μ , dilution de 0,25 % dans du KBr) l'intensité des bandes d'absorption est proportionnelle à la masse de la phase dans le mélange (Fröhlich, 1981). Le spectre d'un mélange est égal à la somme linéaire des spectres de chaque composé (Figure 3b), pondérés de leur proportion dans le mélange.

À partir de la connaissance des spectres IR des constituants, une décomposition du spectre d'un mélange est

Échantillons (profondeur, cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
102-104	- 2,5	- 5,6
109-111	- 2,4	- 5,2
133-136	- 2,5	- 5,1
140-142	- 2,3	- 5,6

Tableau 1 Analyses isotopiques de la calcite de différents niveaux de la carotte SN2.

Carotte	Échantillon (profondeur, cm)	Laboratoire et N°	Méthode	Age ^{14}C BP	intervalle(s) age cal BP
SN2	18	Bondy 1108	conventionnelle	650 ± 80	547 - 664
SN2	77	Bondy 1106	conventionnelle	1230 ± 70	1062 - 1261
SN2	107	Beta 62248	AMS	3990 ± 70	4359 - 4363 4404 - 4527
SN2	157	Beta 66672	AMS	4290 ± 70	4739 - 4741 4827 - 4872
SN2	234	Utrecht	AMS	4850 ± 70	5489 - 5520 5575 - 5649
SN2	379	Utrecht 2359	AMS	5240 ± 70	5923 - 6043 6065 - 6098 6148 - 6168
KT3	50	Utrecht 3590	AMS	490 ± 40	506 - 536
KT3	158	Utrecht 3591	AMS	1340 ± 50	1194 - 1204 1239 - 1294
KT3	171		AMS	1740 ± 60	1566 - 1703
KT3	168	Utrecht 3592	AMS	1900 ± 40	1808 - 1875
KT3	207		AMS	2490 ± 60	2370 - 2404 2428 - 2729
KT3	235	Utrecht 3593	AMS	2770 ± 40	2791 - 2877
KT3	380	Utrecht 3594	AMS	4020 ± 40	4417 - 4527
KT3	520	Utrecht 3595	AMS	4900 ± 40	5595 - 5655
KT3	625	Utrecht 2358	AMS	5460 ± 70	6192 - 6305

Tableau 2 Datations ^{14}C et conversion en âges cal. BP sur les carottes SN2 et KT3.

possible par un calcul matriciel ; les indices affectés à chaque spectre étalon donnent les proportions relatives de chaque phase, et permettent de calculer un spectre simulé dont la conformité avec celui de l'échantillon souligne la validité de l'analyse (Figure 3b). On peut par ailleurs suivre l'évolution quantitative d'une phase donnée en mesurant la surface d'une de ses bandes d'absorption spécifique non recouverte par une absorption d'un autre composé (Figure 3c, exemple de la calcite pour la carotte SN2). Dans ce travail, seuls seront donnés les résultats concernant les minéraux détritiques issus des sols des bassins versants, c'est-à-dire le quartz, la kaolinite et la gibbsite.

Pour tous les échantillons analysés par spectrométrie infrarouge les densités ont été déterminées par pesée d'un volume constant de sédiment sec.

Résultats

Chronologie

Les âges C^{14} BP ont été calibrés en âges calendaires BP (âges cal. BP) avec le programme CALIB (version 3.0.3c) de Stuiver et Reimer (1993), en utilisant le fichier INT-CAL93.14C (Tableau 2). Pour un âge C^{14} BP avec une incertitude donnée, un ou plusieurs intervalles sont obtenus par intersection avec la courbe de calibration ; les intervalles à 1 sigma ont été retenus (Stuiver et Reimer, 1993). Par exemple, l'échantillon à 18 cm de la carotte SN2, daté à 650 ± 80 ans BP, donne un âge calendaire minimum de 547 ans BP et un âge calendaire maximum de 664 ans BP (Tableau 2). Pour calculer les flux détritiques, il est nécessaire d'extrapoler les âges calendaires à

tous les niveaux échantillonnés. Cette extrapolation a été faite en utilisant les équations des courbes approchant au mieux l'ensemble des âges calendaires, minimum et maximum, en prenant tous les intervalles quand il en existe plusieurs. L'évolution des âges extrapolés par cette méthode en fonction de la profondeur (Figure 2) montre que ce procédé revient à un lissage des différentes datations disponibles, et que l'incertitude maximum qui en résulte est, à la base des deux carottes (c'est-à-dire à 6000 ans cal. BP), de plus ou moins 200 ans. Les deux carottes couvrent les derniers 6000 ans de l'Holocène.

Pour la carotte SN2, la présence d'un paléosol hydromorphe avec fentes de dessiccation montre que le lac s'est asséché et a été remplacé par un marécage. Ceci explique le hiatus sédimentaire entre 4000 et 1200 ans cal. BP, démontré par la coupure lithologique nette et l'évolution des âges avec la profondeur (figure 2). Dans une telle configuration, la date de la reprise de la sédimentation (vers 1200 ans cal. BP) doit être assez fiable. En revanche, l'âge de l'arrêt de la sédimentation est au maximum de 4000 ans cal. BP ; il peut être plus récent car on ne peut exclure une certaine érosion des dépôts précédant le hiatus. Sur le site de Kitina, la sédimentation a été continue avec un ralentissement marqué du taux de sédimentation entre 3000 et 1200 ans cal. BP.

Évolution des flux des minéraux détritiques en provenance des sols

La kaolinite, le quartz et la gibbsite (pour le site de Kitina) sont des minéraux des sols ferrallitiques caractéristiques du contexte climatique régional, et les varia-

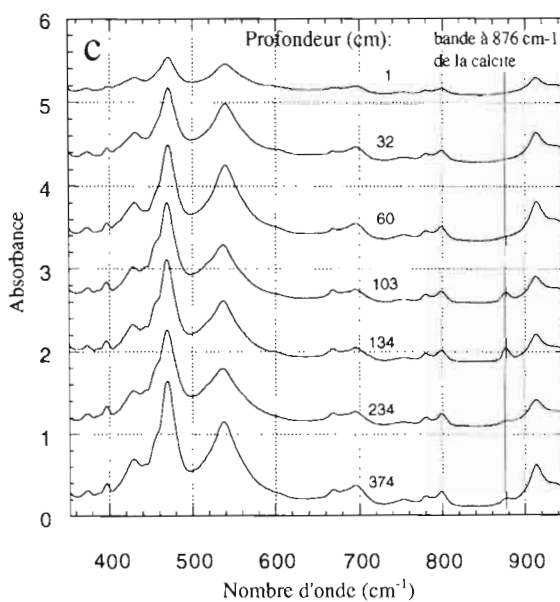
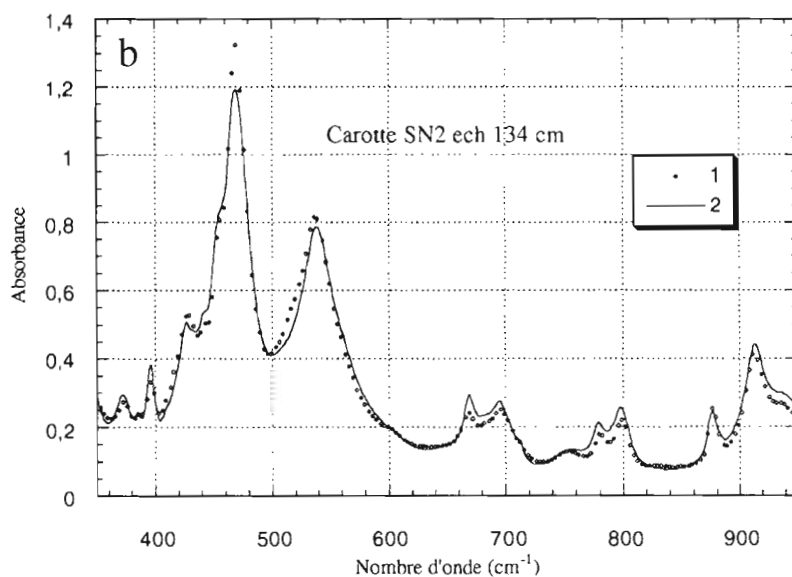
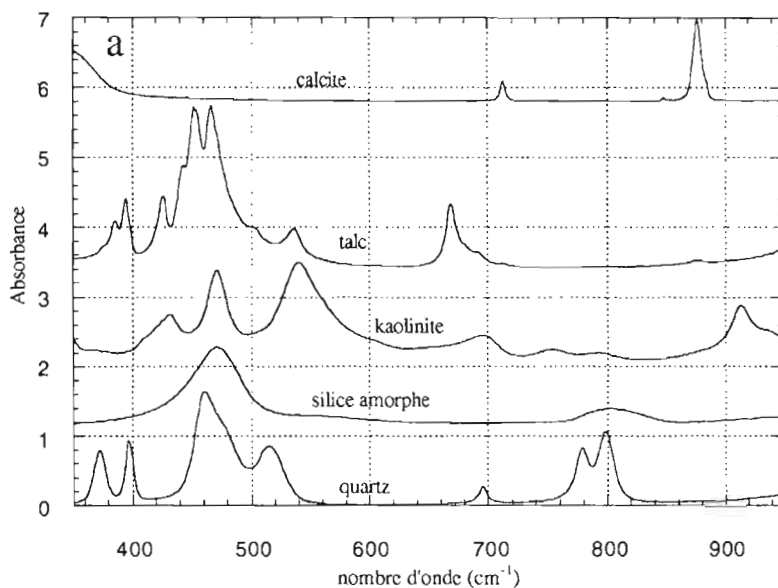


Figure 3 Quantification par spectrométrie IR des phases minérales des sédiments.
 (a) Spectres IR de chaque phase minérale contenue dans les sédiments (Sinnda).
 (b) Exemple de simulation :
 1. Spectre IR mesuré de l'échantillon à 134 cm de la carotte SN2 ; 2. Spectre calculé en faisant la somme pondérée de chacun des constituants.
 (c) Exemple de l'évolution des spectres IR le long de la carotte SN2. La surface de la bande à 876 cm^{-1} de la calcite reflète la quantité de ce minéral dans chaque niveau.

tions de flux de ces minéraux vers les zones lacustres de sédimentation sont de toute évidence moins tributaires de conditions locales que les flux de minéraux tels que les carbonates ou le talc. La Figure 4 ne concerne donc que les trois premiers minéraux cités.

Sur le site de Kitina, l'origine commune du quartz, de la kaolinite et de la gibbsite est attestée par le parallélisme de leurs évolutions. Il en est de même pour le quartz et la kaolinite à Sinnda.

Pour ce qui concerne les principales évolutions observées, on constate une grande similitude de comportement sur les deux sites :

- ▷ jusqu'à environ 5 000 ans cal. BP, les flux oscillent autour de valeurs qui sont les plus importantes enregistrées.
- ▷ ensuite, on note sur les deux sites une décroissance des flux de minéraux détritiques. Cette diminution est plus marquée sur le site de Sinnda, et va même jusqu'à provoquer l'arrêt de la sédimentation, conduisant au hiatus observé.
- ▷ À Kitina, où l'enregistrement des flux est continu, on observe une période de flux détritiques minimum entre environ 2 500 et 1 200 ans cal. BP. Durant cet intervalle la sédimentation est à dominance organique ; cela correspond aux niveaux très sombres entre 160 et 210 cm, avec un taux de sédimentation très faible.
- ▷ À partir de 1 200 ans cal. BP, les flux augmentent à nouveau sur les deux sites.

Discussion

L'examen de l'évolution des flux détritiques à Sinnda et Kitina fournit des informations sur la dynamique sédimentaire dans ce type de milieu, et ses relations avec les variations d'environnement, elles-mêmes en rapport avec la variabilité climatique.

Il convient tout d'abord d'insister sur la similitude des variations de flux observées sur ces deux sites distants d'environ 80 km et situés dans des environnements très

différents. Un inconvénient souvent mis en avant lors de l'interprétation des séries sédimentaires continentales est l'importance des facteurs locaux de sédimentation qui impose une grande prudence quand à la signification régionale des évolutions observées. Sans nier l'influence de paramètres locaux, il apparaît que les minéraux issus des sols environnant les deux lacs sont transportés vers les zones de sédimentation par un processus dynamique ayant une portée régionale suffisamment marquée pour laisser son empreinte dans les deux sites.

Les études palynologiques sur les deux sites (Vincens *et al.*, 1994; Elenga *et al.*, 1996) ont montré qu'ils enregistrent une dégradation du couvert végétal forestier, bien perceptible postérieurement à 4 000 ans BP (environ 4 500 ans cal. BP, Bartlein *et al.*, 1995) à Sinnda et vers 2 500 ans BP (environ 2 600 ans cal. BP) à Kitina. À Sinnda, dès 5 000 ans BP (5 700 ans cal. BP), une modification de la forêt liée à des conditions moins humides est déjà signalée (Vincens *et al.*, 1994). Ces changements de végétation sont les réponses à la phase sèche mise en évidence au Congo vers 3 000 ans BP. En ce qui concerne les flux détritiques, la dégradation du couvert végétal forestier s'accompagne d'une diminution des flux sur les deux sites, ce qui est à l'opposé d'une dynamique sédimentaire de type ruissellement sur des pentes plus susceptibles à l'érosion. Ceci est vrai même à Sinnda où une végétation de type savane s'installe. Ici, l'évolution des flux semble être directement corrélée à l'intensité des pluies. Ceci rappelle ce qui est observé sur les sédiments profonds du delta du Niger (Pastouret *et al.*, 1978) et les sédiments hémipélagiques du delta du fleuve Congo (Giresse *et al.*, 1982). Dans les deux cas, les teneurs en quartz des sédiments sont maximales durant la période la plus humide de l'Holocène inférieur et sont interprétées comme enregistrant l'intensité des pluies et l'érosion et le transport des minéraux des sols qui en résultent par ces deux grands fleuves. Il faut donc envisager une dynamique sédimentaire liée à l'importance du débit au niveau du ou des distributaires prin-

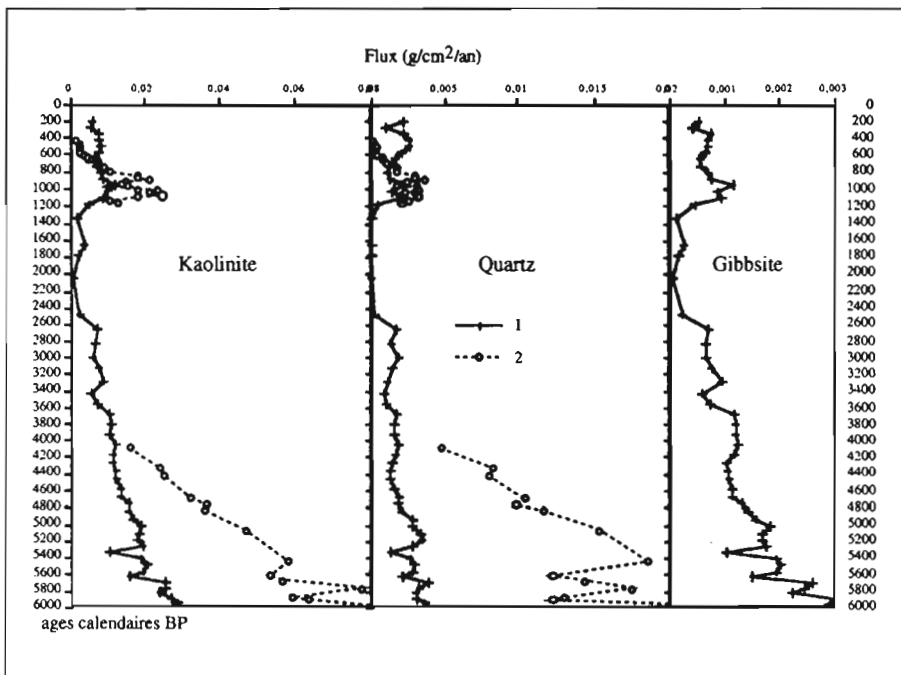


Figure 4 Flux des minéraux détritiques dans les carottes SN2 et KT3 : (1) carotte KT3 ; (2) carotte SN2.

cupaux alimentant les dépressions lacustres, peut-être de type érosion de berge. Le même type de comportement est décrit au lac Barombi M'bo, au Cameroun (Giresse *et al.*, 1991), sous couvert végétal forestier, où une augmentation du taux de sédimentation à l'Holocène inférieur est mise en relation avec une augmentation des précipitations saisonnières. Ce mode d'érosion semble être la règle en zone de forêt équatoriale.

De ce qui précède, il faut avant tout retenir que sur les deux sites étudiés, les flux détritiques des minéraux des sols sont des marqueurs de l'intensité des pluies. Leurs variations sont alors en parfaite cohérence avec ce qui est connu des variations climatiques régionales et leurs conséquences sur les écosystèmes forestiers du Sud-Congo (Vincens *et al.*, ce volume ; Schwartz *et al.*, ce volume) : les variations de flux sont plus brutales à Sinnda qu'à Kitina, ce qui reflète sans aucun doute la plus grande sensibilité du milieu à la variabilité climatique régionale, comme en témoigne d'ailleurs l'établissement d'une végétation de type savane à Sinnda alors que le site de Kitina reste sous forêt tout au long de l'Holocène. Cette plus grande sensibilité aboutit par ailleurs à l'assèchement du lac qui enregistre un long hiatus sédimentaire. Elle est enfin perceptible lors de la remise en eau du lac à 1200 ans cal. BP, avec des flux qui redeviennent d'emblée plus importants qu'à Kitina.

L'utilisation des flux détritiques comme marqueurs de l'intensité des pluies, confortée par la cohérence du signal obtenu sur deux sites différents, permet de démontrer le bénéfice tiré de l'étude minérale quantitative des sédiments pour l'affinement de la chronologie des évolutions climatiques au cours de l'Holocène supérieur.

- ▷ C'est dès avant 5 000 ans cal. BP que les flux et donc la pluviosité diminuent, en réponse à un forçage climatique qui conduit à la phase aride Holocène supérieure.
- ▷ À Kitina, une accentuation de l'aridité est nettement lisible à environ 2 500 ans cal. BP.
- ▷ Sur les deux sites, une brutale augmentation des flux se produit à 1 200 ans cal. BP, avec un synchronisme remarquable, ce qui conduit à penser qu'à cette date le climat évolue rapidement vers des conditions plus humides. Dans les deux sites la reconquête forestière se produit plus tardivement, avec un décalage d'au moins 600 ans qui résulte probablement de la dynamique forestière.

Conclusion

L'évolution des flux de minéraux détritiques en provenance des sols à Kitina et Sinnda, en comparaison avec l'histoire paléobotanique déduite des analyses palynologiques, apporte un éclairage sur la dynamique sédimentaire propre à ce type de milieu intertropical à dominance forestière. Les flux minéraux semblent dépendre principalement de l'intensité des pluies, comme cela avait déjà été suggéré à Barombi M'bo (Cameroun). Cela permet de disposer d'un marqueur utile pour l'étude de la variabilité climatique passée. Les chronologies propres aux flux détritiques, confrontées à celles des changements de végétation, donnent des indications précieuses sur la dynamique de la forêt intertropicale.

Références

- Bartlein, P. J. ; Edwards, M. E. ; Shafer, S. L. ; Barker Jr, E. D. 1995. Calibration of radiocarbon ages and the interpretation of paleoenvironmental records. *Quaternary Research*, **44**, 417-424.
- Bertaux, J. ; Fröhlich, F. ; Ildefonse, P. 1996. Multicomponent analysis of FTIR spectra : quantification of amorphous and crystallized mineral phases in soils and sediments. Manuscrit soumis à *Journal of Sedimentary Research*.
- Elenga, H. ; Schwartz, D. ; Vincens, A. ; Bertaux, J. ; De Namur, C. ; Martin, L. ; Wirrmann, D. ; Servant, M. 1996. Diagramme pollinique Holocène du lac Kitina (Congo) : mise en évidence de changements paléobotaniques et paléoclimatiques dans le massif forestier du Mayombe. *C.R.Acad. Sci. Paris*, **323**, série II a, 403-410.
- Fröhlich, F. 1981. Les silicates dans l'environnement pélagique de l'Océan Indien au Cénozoïque. *Mémoires du Museum National d'Histoire Naturelle*, Série C, **XLVI**, 206 p.
- Giresse, P. ; Bongo-Passi, G. ; Delibrias, G. ; Duplessy, J.-C. 1982. La lithostratigraphie des sédiments hémipélagiques de delta profond du fleuve Congo et ses indications sur les paléoclimats de la fin du quaternaire. *Bull. Soc. géol. France*, (7), **XXIV**, **4**, 803-815.
- Giresse, P. ; Maley, J. ; Kelts, K. 1991. Sedimentation and palaeoenvironment in crater lake Barombi Mbo, Cameroon, during the last 25,000 years. *Sedimentary Geology* **71**, 151-175.
- Pastouret, L. ; Chamley, H. ; Delibrias, G. ; Duplessy, J.-C. ; Thiede, J. 1978. Late quaternary climatic changes in Western Tropical Africa deduced from deep-sea sedimentation off the Niger delta. *Oceanologica Acta*, **1**, 217-232.
- Rajan, S. ; Mackenzie, F. T. ; Glenn, C. R. 1996. A thermodynamic model for water column precipitation of siderite in the Plio-pleistocene Black Sea. *American Journal of Science*, **296**, 506-548.
- Schwartz, D. 1992. Assèchement climatique vers 3 000 B.P. et expansion Bantu en Afrique Centrale atlantique : quelques réflexions. *Bull. Soc. géol. France*, **163**, **3**, 353-361.
- Schwartz, D. ; Elenga, H. ; Vincens, A. ; Achoundong, G. ; Alexandre, A. ; Bertaux, J. ; Girardin, C. ; Guillet, B. ; Maley, J. ; Mariotti, A. ; Namur, C. de ; Reynaud-Farrera, I. ; Youta Happi, J. Origine et évolution des savanes des marges forestières en Afrique Centrale atlantique (Cameroun, Gabon, Congo). Approche aux échelles millénaires et séculaires. Dans : M. Servant et S. Servant-Vildary (dir. publ.), *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*. (Ce volume).
- Stuiver, M. ; Reimer, P. J. 1993. Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon*, **35**, 215-230.

- Vincens, A. ; Buchet, G. ; Elega, H. ; Fournier, M. ;
Martin, L. ; de Namur, C. ; Schwartz, D. ; Servant,
M. ; Wirrmann, D. 1994. Changement majeur de la
végétation du lac Sinnda (vallée du Niari, Sud-
Congo) consécutif à l'assèchement climatique
holocène supérieur : apport de la palynologie. *C. R.
Acad. Sci. Paris*, **318**, série 11, 1521-1526.
- Vincens, A. ; Elega, H. ; Schwartz, D. ; de Namur, C. ;
Bertaux, J. ; Fournier, M. ; Dechamps, R. Histoire
des écosystèmes forestiers du Sud-Congo depuis
6 000 ans. Dans : M. Servant et S. Servant-Vildary
(dir. publ.), *Dynamique à long terme des écosystèmes
forestiers intertropicaux*. (Ce volume).
- Vincens, A. ; Alexandre, A. ; Bertaux, J. ; Dechamps, R. ;
Elega, H. ; Mariotti, A. ; Meunier, J. D. ; Nguetsop,
F. ; Reynaud-Farrera I. ; Schwartz, D. ; Servant-
Vildary, S. Forest response to climate changes in
atlantic equatorial Africa during the last 4 000 years
B.P. and inheritance on the modern landscapes.
Dans : M. Servant et S. Servant-Vildary (dir. publ.),
*Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers
intertropicaux*. (Ce volume).

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