

La sédimentation organique lacustre en zone tropicale sud au cours des 36 000 dernières années (Lac Tritrivakely, Madagascar)

Abdelfettah Sifeddine, Fatima Laggoun-Défarge, Elisabeth Lallier-Vergès, Jean-Robert Disnar, David Williamson, Françoise Gasse et Elisabeth Gibert

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 321, série II a,
p. 385 à 391,
1995

A. S. : UR 12, ORSTOM,
72, route d'Aulnay, 93143 Bondy
Cedex, France ;

F.L. D., E.L. V. et J.R. D. : URA 724
du CNRS, Université d'Orléans,
45067 Orléans Cedex, France ;

D. W. : LGQ, UPR 1201 du CNRS,
Luminy, Case 907, 13288 Marseille
Cedex 9, France ;

F. G. et E. G. : URA 723 du CNRS,
LHGI, Université d'Orsay,
91405 Orsay Cedex, France.

Résumé L'étude pétrographique (palynofaciès) et géochimique (pyrolyse Rock Eval) de la matière organique sédimentaire d'une carotte prélevée dans un lac de cratère de Madagascar révèle une sédimentation organique de type tourbeux avant 36 ka, entre ca 28 et 15 ka et entre 6 et 0 ka, mise en place au cours de périodes d'assèchement. Entre ca 36 et 28 ka, elle se caractérise par une sédimentation lacustre (phytoplancton dominant) et des migrations de végétation du bassin versant vers le lac lui-même. Des apports de matière organique allochtone témoignent de l'établissement d'un couvert végétal sur le bassin versant et du lessivage de sols, lors des périodes humides. Les variations d'écosystèmes et de peuplement sont à mettre en relation avec l'évolution du régime hydroclimatique depuis 36 ka, en termes de périodes sèches et humides.

Mot-clés : Lac Tritrivakely, Palynofaciès, Géochimie organique, Quaternaire supérieur, Paléoenvironnements, Madagascar.

Abstract Lacustrine organic sedimentation in the southern tropical zone in the last 36 kyears (Lake Tritrivakely, Madagascar)

Petrographic (palynofacies) and geochemical (Rock Eval pyrolysis) studies of sedimentary organic matter of a core from a crater lake in Madagascar show a peaty sedimentation before 36 ky and between ca 28 and 15 ky, and between 6 and 0 ky. Between 36 and 28 ky, the organic sedimentation is characterized by an alternance between phytoplanktonic sedimentation and migrations of vegetation from the basin slope to the lake itself. Contributions of oxidized allochthonous organic matter prove also the presence of vegetation on the surrounding basin and soil leaching. The variation of the ecosystems and their development reveal the hydroclimatic changes during the last 36 kyrs, in terms of arid and humid periods.

Keywords: Lake Tritrivakely, Palynofacies, Organic geochemistry, Late Quaternary, Palaeoenvironments, Madagascar.

**Abridged
English
Version**

A multidisciplinary study of the sedimentary record in Lake Tritrivakely (Madagascar) was undertaken in order to determine the palaeoclimatic evolution during Late Quaternary in the southern tropical zone. This crater lake recorded more than 36 ky of the earth's climate within the uppermost 16 m of the sedimentary column (Gasse *et al.*, 1994).

The quantity and the quality of the sedimentary organic matter are considered as two parameters which give information on palaeoenvironmental changes (Lallier-Vergès *et al.*, 1993; Sifeddine *et al.*, 1994). Organic markers may reveal the development of ecosystems (plankton, higher-plants), the settlement of plant cover and soil leachings on the surrounding basin, short-term events (forest-

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

N° : 43161

Cote : B ex 1.

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 28 février 1995,
acceptée après révision
le 2 mai 1995.

ORSTOM Documentation



010003903

fires) and the type of early diagenetic conditions that occurred during the sedimentation (Meyers and Ishiwatari, 1993; Patience *et al.*, 1995 *a*, 1995 *b*). Here, we present organic petrographic and geochemical results obtained on about 160 samples.

Tritrivakely is a maar lake located on a high plateau (19°47'S, 46°55'E, 1,778 m). It is about 1 km wide and 50 m deep, without surface outlet. The lake water is mainly supplied by rainfall. Nowadays, the lake consists of a peat-bog with *Cyperus* and *Juncus*, and also *Graminae* when the water-level is very low. The sediments were sampled in the LTII core (from the centre of the lake), each 10 cm. The chronology was obtained for the upper 5 m, by five radiocarbon analyses realized on macrophytes. For lower levels, the chronology was recalibrated using palaeomagnetism correlations and previous datings obtained on the LT-IV core (Gasse *et al.*, 1994).

Organic geochemical parameters are obtained by Rock Eval pyrolysis, *i.e.*: Total Organic Carbon Content (TOC in weight %) and Hydrogen Index (HI in mg HC/g org C). TOC contents represent the abundance of the organic matter whereas HI values indicate its hydrogen content which is related to its origin and its degree of pedo-diagenetic alteration.

The petrographic study of organic matter consists of a palynofacies study. This approach allows identification of the main organic constituents and leads to their relative proportions.

Several constituents were observed and grouped depending on their origin and mode of transportation to the lake.

- the surrounding basin at the local scale: higher-plant debris (well-preserved, oxidized or gelified), cuticles and membranes, reddish amorphous pedogenetic organic matter. The gelified debris are typical of plants developed within the sedimentation basin (peat vegetation); whereas oxidized and well-preserved debris are mostly specific from higher plants deriving from land;

- the surrounding basin at the local and regional scale (due to their mode of transportation by the winds): spores, pollen, forest-fire debris;

- the sedimentation basin: greyish amorphous organic matter deriving from phytoplankton (Patience *et al.*, 1995 *b*).

We called "autochthonous organic matter" the organic debris specific from the sedimentation basin: phytoplankton, algae, peat vegetation and "allochthonous organic matter" the organic debris specific from the surrounding basin (mainly higher-plant debris).

Two ratios have been calculated: the first one considers the proportions of phytoplankton-derived organic matter (AOM-G) on gelified plant debris (DG). The second ratio considers the proportions of land-derived organic debris (LCO) on gelified plant debris, and assesses the evolution of plant development both in the sedimentation basin (peat installation) and on the surrounding watershed.

RESULTS AND INTERPRETATION

The variation of TOC, HI and relative proportions of petrographic constituents show eight main sedimentary organic units for which we propose the following palaeoenvironmental and palaeoclimatic interpretation (fig.).

- Before 36 ky (Unit I), the lake was functioning as a peat-bog as shown by very high proportions of gelified plant debris and low proportions of land-derived organic matter. The latter indicate a reduced plant cover and/or a very low land supply, because of the border vegetation acting as a filter. At the end of this episode (Unit II), a slight increase of the water column depth is recorded by a higher phytoplanktonic contribution. The comparison with other parameters indicates that this period was cooler than recent times.

- Between 36 and 28 ky, water was still really present in the lake as assessed by the higher phytoplanktonic contribution compared to the gelified debris. The land-derived contribution is much more pronounced than in lower units (mainly in sub-unit III-2) probably due to both the extent of higher plants on the surrounding basin and the lack of vegetation filter. This is interpreted as a humid period with a very high erosive intensity.

- Between 28 and 13 ky, the organic sedimentation reveals an aridification of climatic conditions as shown by the settlement of another peat-bog.

– Around 13 ky, the warming of the Holocene is recorded by the installation of a lacustrine sedimentation (dominant phytoplankton) and the development of some vegetation cover on the surrounding basin. Furthermore, the Holocene is also characterized by alternating dry and wet episodes.

– The 6 ky BP period begins by the establishment of a peat-bog which progressively turns into lacustrine sedimentation and then turns back to the recent peat-bog.

CONCLUSIONS

The study of the organic sedimentation revealed three main palaeoclimatic changes for

the period between 36 ky and the Holocene, and three changes during the Holocene period. Short-term events are also recorded in each of these periods. These changes especially concern the hydroclimatic regimes. Aridification periods (before 36 ky, between 28 and 13 yr and during some episodes of the Holocene) are characterized by a peat-bog installation, whereas wet periods (between 36 and 28 ky, and some episodes of the Holocene) are characterized by a lacustrine phytoplanktonic production and the occurrence of higher plants on the land. Moreover, the last 6,000 years are marked by two periods when the lake dried up; the most recent is also due to the filling of the basin.

INTRODUCTION

Une étude de l'enregistrement sédimentaire du lac Tritrivakely (Madagascar) a été entreprise, afin de déterminer l'évolution paléoclimatique des hauts plateaux malgaches au cours du Quaternaire supérieur. Ce lac de cratère a enregistré plus de 36 000 ans d'histoire sur les 16 premiers mètres de sédiments. Les premiers résultats obtenus sur l'une des carottes ont montré que le lac avait enregistré des variations de la tranche d'eau en relation avec des alternances de périodes sèches et humides, ainsi que des variations de température (Gasse *et al.*, 1994).

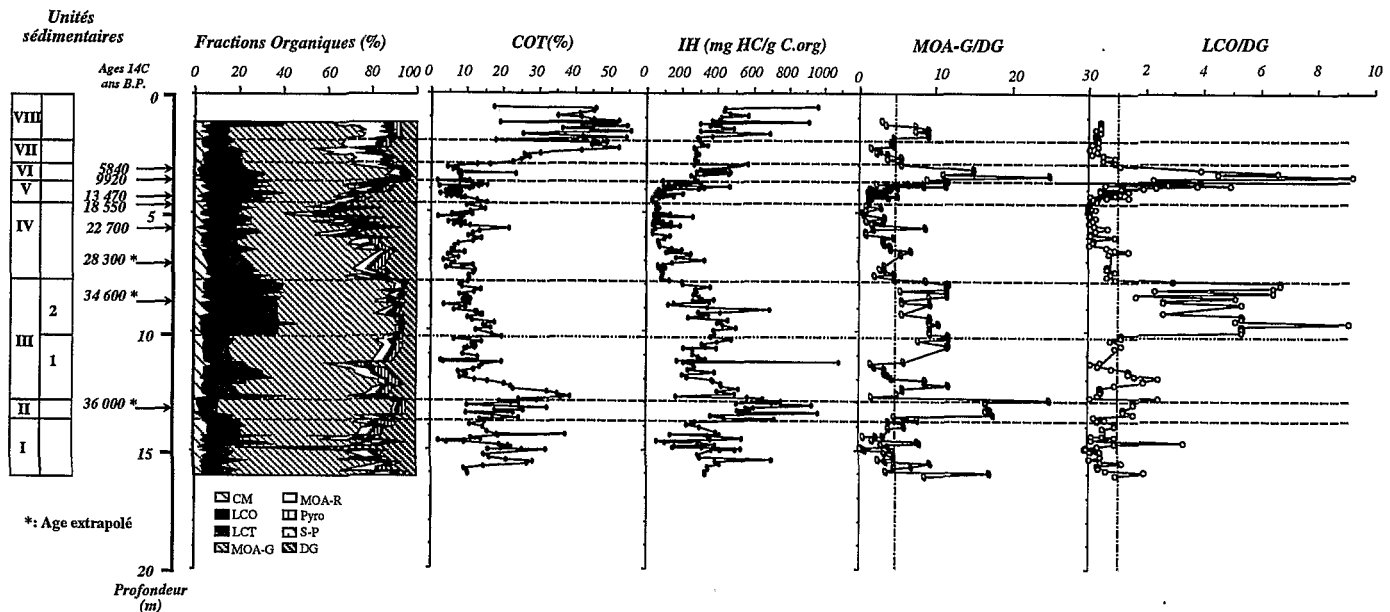
La quantité et la qualité de la matière organique (MO) sédimentaire se sont révélées deux paramètres très sensibles aux variations paléoenvironnementales (Lallier-Vergès *et al.*, 1993 ; Sifeddine *et al.*, 1994). Des études récentes ont, d'autre part, montré que les marqueurs organiques peuvent rendre compte de développements successifs des différents écosystèmes par la contribution respective de sédimentation majoritairement planctonique ou dérivée de plantes supérieures, d'événements brutaux parfois sous action anthropique (feux de forêt), ainsi que des conditions de diagenèse précoce régnant dans le bassin de sédimentation (Meyers et Ishiwatari, 1993 ; Patience *et al.*, 1995 a, 1995 b).

Cet article concerne les résultats d'une étude quantitative et qualitative de la MO des sédiments du lac Tritrivakely, réalisée afin d'identifier des marqueurs d'environnement, caractéristiques respectivement du bassin versant et du bassin de sédimentation, tous deux connus pour réagir d'une manière différente aux variations climatiques (Lallier-Vergès *et al.*, 1993).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le Lac Tritrivakely (19°47'S, 46°55'E) est un lac de maar situé à 1 778 m d'altitude dans une zone à climat tropical montagnard (précipitations moyennes de l'ordre de 1 500 mm/an). Ce lac, de diamètre d'environ 1 km, est sans exutoire de surface. Son alimentation en eau est assurée par un aquifère et par les eaux de pluie et de ruissellement. Actuellement, il ne subsiste du lac qu'un marécage à *Cyperus* et *Juncus*. Cette étude a été effectuée sur un échantillonnage décimétrique dans les 16 premiers mètres de la carotte LT II, prélevée au centre du lac.

Cinq datations radiocarbone ont été réalisées sur des macrophytes par le LHGI (Orsay) sur les 5 m supérieurs. En dessous, la chronologie a été recalée à partir de l'échelle chronostratigraphique établie sur la carotte LT IV (Gasse *et al.*, 1994) – prélevée à proximité de celle étudiée, au centre du lac – sur la base de corrélations établies par les enregistrements du paléomagnétisme. Néanmoins,



Variations des teneurs en carbone organique total (COT), de l'index d'hydrogène (IH), des palynofaciès et des rapports

(MOA-G/DG, LCO/DG) le long de la carotte LT II. CM : cuticules, membranes. LCT : ligno-cellulosiques translucides (préservés).

LCO : ligno-cellulosiques opaques (oxydés). MOA-G : matière organique amorphe grisâtre (dérivée du phytoplanctonique). MOA-R : matière organique amorphe rougeâtre (pédogénétique). Pyro : pyrofusinite (débris carbonisés). SP : spores, pollens.

Variations of percentages of total organic carbon (TOC), hydrogen index (HI), palynofaciès and ratios (MOA-G/DG, LCO/DG) in core LT II. CM: cuticles, membranes. LCT: translucent ligno-cellulosic (preserved). LCO: opaque ligno-cellulosic (oxidized).

MOA-G: greyish amorphous organic matter (phytoplanktonic-derived). MOA-R: reddish amorphous organic matter (pedogenetic).

Pyro: pyrofusinite (carbonized debris). S-P: spores, pollen.

aucune corrélation n'a pu être établie pour la partie supérieure (tourbeuse) des sédiments.

Les paramètres de géochimie organique utilisés dans cette étude et obtenus par la méthode de pyrolyse Rock-Eval sont les teneurs en Carbone Organique Total (COT, %) et l'Index Hydrogène (IH, mg HC/g C Org.). Le COT représente l'abondance de matière organique, tandis que l'IH témoigne de la richesse en hydrogène de la MO, fonction de son origine génétique ainsi que de son degré d'altération diagenétique.

L'étude pétrographique de la matière organique a consisté en un examen au microscope optique, en lumière transmise, de la matière organique totale (MOT) isolée des phases carbonatées et silicatées par attaques acides, appelée analyse des palynofaciès. Cette approche permet d'identifier les différents constituants organiques, et de quantifier leurs proportions relatives.

Différents constituants ont été observés et regroupés en fonction de leur origine et de leur mode d'apport au lac. Il s'agit pour :

- le bassin versant à l'échelle locale : des débris de plantes supérieures tels que les débris ligno-cellulosiques translucides (préservés), opaques (oxydés) ou gélifiés (dégradation des débris dans l'eau), des cuticules ou membranes, de la MO amorphe rou-

geâtre, considérée comme d'origine pédogénétique (Lallier-Vergès *et al.*, 1993). Les débris gélifiés sont marqueurs de la présence de végétaux dans le bassin de sédimentation, ce qui est le cas des tourbières ; alors que les débris de végétaux supérieurs préservés ou oxydés, ainsi que la fraction pédogénétique, sont des marqueurs de l'établissement d'une végétation sur le bassin versant.

- le bassin versant à l'échelle locale et régionale en raison du mode de transport par les vents : des spores et des pollens, ainsi que des débris carbonisés (feux de végétation) ;

- le bassin de sédimentation : de la MO amorphe grisâtre dérivée du phytoplancton (Patience *et al.*, 1995 *b*) et/ou des algues.

Par convention, nous appelons « MO autochtone », la matière organique spécifique du bassin de sédimentation (phytoplancton, algues, végétation de bas-fond et de tourbière) et « MO allochtone », la matière organique spécifique du bassin versant (essentiellement des plantes supérieures). Dans le cas de tourbières, ces appellations sont quelque peu ambiguës, puisque le bassin de sédimentation peut alors être envahi par des végétaux supérieurs eux-mêmes spécifiques du bassin versant.

Un premier rapport, considérant les proportions de matière organique amorphe gri-

sâtre dérivée du phytoplancton (MOA-G) sur celles des débris de végétaux gélifiés (DG), a été calculé pour caractériser le passage d'une sédimentation lacustre à une sédimentation de type tourbeux, et en conséquence, pour évaluer l'importance de l'épaisseur de la tranche d'eau.

Un second rapport, considérant les proportions entre les débris de végétaux supérieurs oxydés (LCO) et les débris de végétaux gélifiés (DG), rend compte d'une certaine manière, du peuplement des écosystèmes et de leur évolution respectivement sur le bassin versant et dans le bassin de sédimentation.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La variation du COT, de l'IH et des proportions relatives des constituants organiques du palynofaciès le long de la carotte LT II a permis de différencier des « unités sédimentaires », aux faciès organiques relativement bien définis (fig.). Cette succession de faciès organiques semble directement liée aux variations du régime hydroclimatique qui contrôle à la fois les développements variés des écosystèmes et les fluctuations du niveau d'eau.

– **Avant ca 36 ka** : les valeurs de COT varient globalement entre 10 et 30 % et celles d'IH présentent de fortes variations (± 200 mg/HC g C org.) autour de 300 (Unité I : 16-13,85 m). Cette période est marquée, à sa base, par la dominance de MO dérivée du phytoplancton par rapport aux débris gélifiés (MOA-G/DG variant autour de 3) et une très faible contribution des végétaux supérieurs du bassin versant (LCO/DG < 1). Ceci suggère que le lac aurait fonctionné comme une tourbière. A la fin de cet épisode (Unité II : 13,85-13 m), les plus fortes valeurs d'IH (jusqu'à 800) reflètent une plus forte contribution de matière organique dérivée du phytoplancton (rapport MOA G/DG voisin de 20), ce qui traduit une augmentation de la tranche d'eau. La quasi-absence de débris végétaux allochtones traduit alors le faible apport en provenance du bassin versant, probablement lié à un faible couvert végétal associé à une

filtration des éléments détritiques par une ceinture palustre. La confrontation avec d'autres paramètres obtenus sur la même série sédimentaire (Gasse *et al.*, 1994) permet de penser qu'il s'agit là d'une période sèche et plus froide que la période actuelle.

– **Entre ca 36 et ca 28 ka**, la sédimentation organique est d'abord principalement dérivée du phytoplancton (Unité III-1 : 13-10 m) marquée par de très fortes valeurs de COT – jusqu'à près de 40 % – qui diminuent ensuite assez rapidement jusqu'à ≈ 10 % et par des valeurs d'IH qui varient entre 200 et 500 mg HC/g C org. Ceci traduit une franche remise en eau du bassin de sédimentation liée à une période humide. L'apport en grande quantité de débris végétaux allochtones (LCO/DG variant entre 2 et 6) au cours de la deuxième moitié de cette période (Unité III-2 : 10-8 m), peut s'expliquer par l'intensification des forces érosives des eaux de ruissellement et l'absence de filtre végétal dans le bassin de sédimentation.

– **Entre ca 28 et ca 13 ka**, c'est-à-dire au cours du dernier maximum glaciaire, la sédimentation organique est marquée par des valeurs de COT variant autour de 10 % et de très faibles valeurs d'IH (≈ 80 mg HC/g C org.) qui peuvent, pour une large part, s'expliquer par les proportions assez modestes de matériel d'origine phytoplancitique, comme le montre le rapport MOA-G/DG < 5 (Unité IV : 8-4,5 m). Le rapport LCO/DG diminue, montrant la forte contribution des végétaux supérieurs autochtones (tourbière). Ceci traduit une aridification des conditions climatiques, marquée par la colonisation progressive du fond du lac par une végétation de tourbière filtrant les faibles apports des constituants organiques allochtones du bassin versant.

– **Vers 13 ka** (Unité V : 4,5-4 m), on note d'une part, une remise en eau du lac, comme le montre l'augmentation de la production lacustre marquée par une augmentation des valeurs d'IH qui passent progressivement de 80 à 200 mg HC/g C org., et d'autre part, le développement d'un couvert végétal (*Ericaceae* d'après Gasse *et al.*, 1994) sur le bassin versant attesté par le maintien des valeurs de COT autour de 10 % et par

l'augmentation des valeurs d'IH (de 200 à 550 mg HC/g C org.). Cette augmentation des valeurs d'IH s'accompagne de la présence de la matière organique dérivée du phytoplancton en grande proportion (MOA-G/DG > 5) (Unité VI : 4-3 m) qui traduit le passage d'une période sèche à une période humide. Cette dernière atteindrait son maximum entre 9 et 6 ka.

– **La période de 6 ka à l'actuel** débute par une tourbière marquée par une forte augmentation des valeurs de COT pouvant atteindre 55 % et des valeurs d'IH (autour de 300 mg HC/g C org.). Les rapports MOA G/DG et LCO/DG présentent de faibles valeurs (respectivement < 5 et < 1), soulignant l'abondance des débris de végétaux autochtones (Unité VII : 3-2 m). Puis, une sédimentation de type lacustre reprend, attestée par l'augmentation de la matière organique dérivée du phytoplancton (MOA-G/DG ≈ 10), pour finir par la tourbière actuelle marquée par les apports allochtones très réduits (LCO/DG < 1), alors que les contributions autochtones varient entre phytoplancton et végétaux supérieurs (MOA-G/DG variant entre 3 et 10). Les paramètres géochimiques obtenus sur le dernier mètre (tourbe actuelle) montrent des fluctuations importantes des valeurs de COT (entre 20 et 50 %) et d'IH (entre 400 et 900 mg HC/g C org.) (Unité VIII : 2-0 m). Cela traduit une forte variation de l'épaisseur de la tranche d'eau au cours de cet ultime épisode.

CONCLUSION

L'étude de la sédimentation organique au lac Tritrivakely, a permis de mettre en évidence des changements de fonctionnement hydroclimatique durant les derniers 36 000 ans, à l'échelle d'un bassin versant et d'en inférer des variations paléoclimatiques régionales (périodes d'aridification au cours de l'Holocène) et globales (dernière déglaciation).

Des périodes d'aridification comme la période avant 36 ka, le dernier maximum glaciaire, ou les événements « secs » de l'Holocène, engendrent une diminution de la tranche d'eau, et sont donc témoins d'une migration de la végétation du bassin versant vers les bordures puis, vers le bassin de sédimentation lui-même. La fraction organique est alors dominée par des débris de plantes supérieures colonisant le lac et filtrant les apports détritiques.

Dans le cas de périodes humides avec augmentation de la tranche d'eau (comme les périodes 36-28 ka et le début de l'Holocène), la sédimentation organique est dominée par un développement de production primaire et de végétaux sur le bassin versant. Les 6 000 dernières années sont par ailleurs marquées par deux périodes d'assèchement du bassin, la dernière (actuelle) semblant être liée au comblement progressif du lac.

Cette étude entre dans le cadre de recherche du GdR 0970 (CNRS/ORSTOM).

Remerciements : Nos remerciements s'adressent à D. Kéris, M. Hatton et à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation des carottages ainsi qu'aux partenaires malgaches qui ont pu faciliter la logistique d'accès aux terrains.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GASSE, F., CORTIGO, E., DISNAR, J. R., FERRY, L., GIBERT, E., KISSEL, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., LALLIER-VERGÈS, E., MISKOVSKY, J. C., RATSIMBAZAFY, B., RANAIVO, F., ROBISON, L., TUCHOLKA, P., SAOS, J. L., SIFEDDINE, A., TAIEB, M., VAN CAMPO, E. et WILLIAMSON, D., 1994. A 36 ka environmental record in the southern tropics: Lake Tritrivakely (Madagascar), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 318, série II, p. 1513-1519.
- LALLIER-VERGÈS, E., SIFEDDINE, A., de BEAULIEU, J. L., REILLE, M., TRIBOVILLARD, N., BERTRAND, P., MONGENOT, T., THOUVENY, N., DISNAR, J. R. et GUILLET, B., 1993. Sensibilité de la sédimentation organique aux variations climatiques du Tardé-Würm et de l'Holocène - le lac du Bouchet (Haute-Loire, France), *Bull. Soc. géol. France*, 164, 5, p. 661-673.
- MEYERS, P. A. et ISHIWATARI, R., 1993. Lacustrine organic geochemistry - an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments, *Org. Geochem.*, 20 (7), p. 867-900.
- PATIENCE, A., LALLIER-VERGÈS, E., ALBÉRIC, A., TRIBOVILLARD, N. et DESPRAIRIES, A., 1995. Impact of early diagenesis on the organo-mineral

composition of recent lacustrine sediment: The "lac du Bouchet" (France), *Quaternary Science Review*, accepté pour publication.

PATIENCE, A. J., LALLIER-VERGÈS, E., SIFEDDINE, A., ALBÉRIC, P. et GUILLET, B., 1995 *b*. Organic fluxes and early diagenesis in the lacustrine environment. In *Organic matter accumulation*, LALLIER-VERGÈS, E., TRIBOVILLARD, N. et BERTRAND, P., éd., *Lecture Notes in Earth Sciences*,

Springer Verlag, Heidelberg, 57 (sous presse).

SIFEDDINE, A., BERTRAND, P., FOURNIER, M., MARTIN, L., SERVANT, M., SOUBIES, F., SUGUIO, K. et TURCQ, B., 1994. La sédimentation organique lacustre en milieu tropical humide (Carajas, Amazonie Orientale, Brésil) : relations avec les changements climatiques au cours des 60 000 dernières années, *Bull. Soc. géol. France*, 165, 6, p. 613-621.