

A 36 ka environmental record in the southern tropics: Lake Tritrivakely (Madagascar)

Françoise Gasse, Elsa Cortijo, Jean-Robert Disnar, Luc Ferry, Elisabeth Gibert, Catherine Kissel, Fatima Laggoun-Defarge, Elisabeth Lallier-Vergès, Jean-Claude Miskovsky, Bruno Ratsimbazafy, Flavien Ranaivo, Laurent Robison, Piotr Tucholka, Jean-Luc Saos, Abdelfettah Siffedine, Maurice Taieb, Elise Van Campo, David Williamson

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 318, série II,
p. 1513 à 1519,
1994

GDR 970, CNRS, ORSTOM,
Paléohydrologie, Paléoclimatologie
Continuantes,
Bât. n° 504, Université Paris-Sud,
91405 Orsay Cedex, France.

Abstract The upper 13 m of a 40 m-long sedimentary profile core taken in a crater lake on the Malagasy Plateau reveals 36,000 yrs of hydroclimatic evolution. A shallow lake occupies the core site from ≈ 35 to ≈ 19 ka BP under climatic conditions cooler than today. The water table is very low and biological productivity extremely reduced during the Last Glacial Maximum. A large warming was initiated at ≈ 14.5 ka BP. The modern bog establishes about 4 ka ago.

Keywords : palaeolakes, palaeoenvironments, palaeoclimate, southern tropics, Late Quaternary.

Résumé Un enregistrement de l'environnement depuis 36 ka en zone tropicale sud: le lac Tritrivakely (Madagascar)

Les 13 m supérieurs d'un sondage de 40 m de long prélevé dans un lac de cratère des plateaux malgaches révèlent 36 000 ans d'histoire hydroclimatique. Un lac peu profond se maintient entre ≈ 35 et 19 ka BP sous climat plus froid que l'actuel. Le milieu est proche de l'assèchement et peu productif entre ≈ 19 et ≈ 15 ka BP. Un réchauffement ample s'amorce dès $\approx 14,5$ ka BP. La tourbière actuelle s'installe vers 4 ka BP.

Mots-clés : paléolacs, paléoenvironnements, paléoclimat, zone sud-tropicale, Quaternaire supérieur.

Version
française
abrégée

Les données paléoclimatiques continues sur plusieurs dizaines de milliers d'années sont encore rares en zones tropicales sud. Nous rapportons ici les premiers résultats de campagnes de forage réalisées en 1992 dans un lac de cratère des hauts plateaux de Madagascar. Le climat régional est réglé par la latitude et la topographie (Donque, 1975). En été, le NW de l'île est balayé par la zone de convergence intertropicale qui apporte de fortes pluies, souvent cycloniques, au Nord et sur les plateaux du centre (figure 1). Les vents d'alizé génèrent des précipitations en toute saison sur le versant oriental, escarpé. Le Sud est aride avec de faibles pluies hivernales de front polaire. La région des plateaux est donc particulièrement favorable pour étudier l'influence relative des fronts polaires et des masses d'air équatoriales au cours du temps.

Tritrivakely (19°47'S, 46°55'E, 1 778 m) se situe sur le plateau d'Ankaratra, constitué de

dômes et de coulées volcaniques pliocènes et quaternaires recouvrant un socle ancien métamorphisé (Besairie, 1946). La région est soumise à un climat tropical montagnard (précipitation moyenne actuelle; $\approx 1 500 \text{ mm a}^{-1}$; température moyenne actuelle: 16°C), avec un été chaud et pluvieux et un hiver frais et sec (Chaperon *et al.*, 1993). Tritrivakely est un maar d'environ 1 km de diamètre, de 50 m de profondeur, sans exutoire de surface et dont les eaux douces (conductivité électrique: $20,6 \mu\text{S cm}^{-1}$; pH = 5,5) affichent une activité ^{14}C de $98,14 \pm 1,75 \%$, soit un âge apparent d'environ 1 000 ans (tableau). Le fond du lac est aujourd'hui occupé par un marécage à *Cyperus* et *Juncus*.

Nous résumons ici les résultats relatifs aux 13 m supérieurs d'une séquence lacustre et palustre continue de 40 m de profondeur. Les faciès dominants sont (figure 2 a): 1) des tourbes à Cypéracées; 2) des vases organo-ar-

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 42480 ex)
Cote : B

09 OCT. 1995

Note

présentée par
Yves Coppens.

remise le 30 janvier 1994,
acceptée après révision
le 18 mars 1994.

gileuses à laminations grossières (5-20 mm) ou millimétriques; 3) des vases argileuses homogènes; 4) quelques lits de sables; 5) des tephres, dont un niveau *in situ* à 11,70 m témoigne d'une éruption très proche.

La chronologie s'appuie sur 14 âges radiocarbone (figure 2 a-b; tableau). Les âges obtenus, entre 0 et 4,6 m et à la base du sondage, sur fragments de feuilles de Cyperacées sont validés par l'activité ^{14}C de l'échantillon sommital (113,5 %) qui traduit l'équilibre entre le CO_2 post-nucléaire. Les âges mesurés sur matière organique totale entre 5,5 et 9,0 m (tableau) peuvent être vieillissés par la présence de particules organiques détritiques.

Les propriétés magnétiques des sédiments, analysées tous les centimètres (figure 2 c) ou tous les 5 cm (figure 2 c), expriment des changements drastiques de la concentration en grains de titanomagnétite détritique. Les analyses granulométriques (figure 2 c) et paléobiologiques (figure 3 c-e) sont réalisées tous les 10 cm. La fraction minérale fine ($< 40 \mu\text{m}$) des dépôts est principalement constituée d'allophanes parfois associés à de la vivianite. La fraction $> 40 \mu\text{m}$ est dominée soit par des minéraux détritiques souvent éolisés, soit par la sidérite, minéral authigène abondant au-delà de 6 m et reflétant un milieu de sédimentation réducteur (Berner, 1971). La teneur en carbone organique total (COT) et l'indice d'hydrogène, IH (mg HC/g COT), obtenus par pyrolyse Rock-Eval (figure 3 a-b), sont contrôlés par la production lacustre primaire, l'apport en matériel organique détritique, et les processus de dégradation syn- et post-sédimentaire de la matière organique. L'analyse des diatomées permet d'observer deux principaux types d'assemblages dominés respectivement par: 1) des espèces acidophiles, pour beaucoup aérophiles (*Pinnularia* spp., *Eunotia* spp.) observées dans le marécage actuel (figure 3 c); 2) des épiphytes (*Cymbella sillesiaca*, *Gomphonema gracile*), et/ou des espèces vivant en eau libre (*Fragilaria* spp., *Aulacosira* spp.) reflétant un milieu lacustre aux eaux neutres et plus riches en éléments nutritifs. Les pollens sont abondants sur l'ensemble du profil. Les plantes terrestres sont principalement représentées, entre 13 et 4 m de profondeur, par les Ericacées qui caractérisent aujourd'hui des

zones d'altitude > 2000 m (figure 3 d), et, au-dessus de 4 m, par les Gramineae qui indiquent l'installation d'une savane ou d'une savane boisée.

RÉSULTATS

L'intervalle 13,0-12,5 m (≈ 36 ka BP)

Les valeurs élevées de COT et de IH reflètent une forte productivité biologique dans un marécage à fond réducteur. Les faibles valeurs des paramètres magnétiques indiquent que les particules détritiques ruisselées ne parviennent pas au point de sondage, sans doute filtrées par une ceinture de végétation. Les rares grains détritiques, relativement grossiers, sont attribués à des apports éoliens depuis les arènes granitiques proches. Les diatomées enregistrent un milieu subaérien. Le lac est, hydrologiquement, voisin de son état actuel mais l'abondance des Ericacées témoigne d'un climat plus froid.

L'intervalle 12,5-4,7 m ($\approx 36 - \approx 20$ ka BP)

Un épisode lacustre complexe est représenté par des vases brunes à vitesse moyenne de sédimentation (vms) relativement élevée (figure 2 b). Entre 12,5-12,0 m, la mise en place d'un lac peu profond se manifeste par le développement des pollens de plantes aquatiques, puis des diatomées d'eau libre associées à des épiphytes. Les faciès laminés apparaissent. La teneur en COT chute et se stabilise autour de 10 %. Entre 12 et 6 m, les valeurs des paramètres magnétiques, généralement fortes mais fluctuantes, témoignent de l'importance des apports détritiques fins par lessivage du bassin versant (hormis le pic à 11,7 m qui correspond à un niveau de tephra). La décroissance de IH traduit l'augmentation de la teneur en matière organique oxydée. Cette évolution n'est pas linéaire: les pulsations de IH centrées sur 11-5-10,5 et 9,5-8,0 m, grossièrement synchrones des teneurs maximales en diatomées, traduiraient des phases à forte productivité algale en milieu franchement lacustre. Le retour à des conditions palustres oxydantes est ensuite enregistré par les diatomées aérophiles et la diminution de IH. La flore pollinique terrestre est toujours dominée par les Ericacées.

L'intervalle 4,7-3,0 m (\approx 19.4 ka BP)

Plusieurs niveaux de sable oxydé entre 4,6 et 3,6 m ainsi qu'une vsm très réduite (figure 2 b) suggèrent de brèves phases d'assèchement. Pendant le dernier maximum glaciaire (4,7-4,1 m), la production biologique est extrêmement faible avec des valeurs de COT et IH minimales, une quasi-absence des diatomées et des plantes aquatiques. Les conditions favorables à la vie aquatique s'installent de nouveau dès 14,5 ka BP (4,0 m), soit \approx 17,1 cal ka BP. Le déclin, en deux étapes, des Ericacées, marque la fin des conditions thermiques du dernier épisode glaciaire. La colonisation des pentes par les Gramineae ralentit le taux d'érosion, et la ceinture de Cypéracées filtre les particules détritiques grossières, expliquant le maintien d'une vsm faible.

L'intervalle 3,0-0,0 m

L'Holocène supérieur correspond à l'accumulation d'une tourbe dont les paramètres sédimentologiques et magnétiques sont voisins

de ceux de la base de la carotte. Une recrudescence des Ericacées est à noter vers 3,5-3,0 ka BP avant la mise en place des conditions actuelles.

CONCLUSION

Le lac Tritrivakely a enregistré environ 36 000 ans d'histoire sur les 13 m supérieurs de sédiments. Le Dernier Maximum Glaciaire et la dernière déglaciation sont représentés, bien que très condensés en stratigraphie. Compte tenu de la compaction des sédiments en profondeur, on est en droit d'attendre des 40 m carottés à Tritrivakely un enregistrement continu du dernier cycle climatique. Des corrélations avec l'évolution climatique de l'Antarctique (*voir par exemple Jouzel et al., 1989*) et de l'Océan Indien tropical (*Rostek et al., 1993*) pourront être tentées lorsque nos paléodonnées pourront être transcrites en terme de paramètres climatiques en s'appuyant sur un référentiel actuel substantiel.

INTRODUCTION

Continuous palaeoclimatic records covering several tens of thousand years are still scarce over the southern tropics. We report here preliminary results of two 1992 coring expeditions in a crater lake from the central plateaux of Madagascar. Madagascar extends from 11°57'S to 25°39'S. The regional climate is controlled by the latitude and the topography (*Donque, 1985*). During summer, the Intertropical Convergence Zone reaches the northwest part of the island and brings heavy rainfall on to the north and the central plateaux. The NW trade winds generate precipitations in all seasons along the eastern escarpment. The southern part is arid with low polar front rainfall during winter. The central plateaux are thus a suitable region for studying the relative influence of equatorial air masses and of polar fronts through time.

Very little information is currently available on past environmental conditions in Madagascar (*Straka, 1993*).

MODERN SETTING

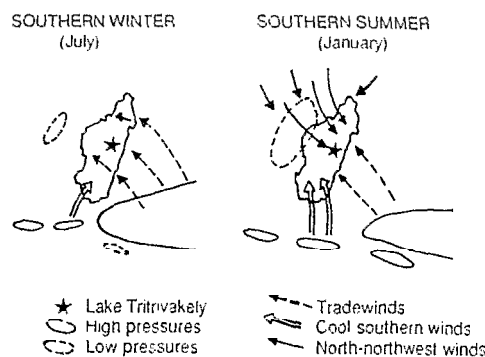
Tritrivakely (19°47'S, 46°55'E, 1778 m) lies on the Ankaratra Plateau, which consists of trachyte and rhyolite domes of Pliocene age and of Quaternary basaltic flows covering an old metamorphic basement (*Besairie, 1946*). Tritrivakely is a maar about 1 km wide, 50 m deep, and presently occupied by a marshy lake with abundant *Cyperus* and *Juncus*. A palynological study has been conducted on a 5 m-core, dated at \approx 10.5 ka BP at its base (*Burney, 1987*). Our coring sites are located close to the center of the crater identified by measurements of electric resistivity.

The regional climate is of the mountain tropical type (mean annual precipitation: \approx 1,500 mm yr⁻¹; mean annual temperature: \approx 16 °C), with a warm-wet summer and a dry-cool winter (*Chaperon et al., 1993*). The lake, without surface outlet, is supplied mainly by rain falling directly in the crater. The waterbody is shallow (1.4 m in July 1985, 70 cm in January 1992; the lake was almost dry in November 1992). Water is fresh

Figure 1 Location of Lake Tritrivakely, Madagascar, and major low altitude wind flows.

Figure 1

Situation du Lac Tritrivakely à Madagascar, par rapport aux circulations atmosphériques de basse altitude.



($20.6 \mu\text{S cm}^{-1}$), slightly acidic (pH: 5.5), and has a ^{14}C activity of 98.14%, corresponding to an apparent age of $\approx 1,000$ yrs (table).

MATERIAL AND METHODS

Piston-cores revealed a continuous accumulation of lacustrine and palustral sediments over 40 m. We summarize here results concerning the upper 13 m. The predominant facies (figure 2a) are: (i) Cyperaceae peats; (ii) organic-clayish mud, coarsely (5-20 mm) or finely (1 mm) laminated; (iii) homogeneous clayish mud; (iv) some fine sand layers, and (v) tephra. At 11.7 m, an *in situ* basaltic tephra, 7 cm thick, documents a nearby explosion.

The chronology is supported by 14 AMS ^{14}C dates (figures 2a-b; table). From 0 to 4.6 m, eight ^{14}C ages were measured on *in situ* fragments of Cyperaceae leaves (0-19 ka BP; BP = ^{14}C age). The validity of these ages is confirmed by the ^{14}C activity of the top sample (113%) which reflect equilibrium with post-nuclear CO_2 . The profile base is dated at 36.2 ka BP on the same type of material. Ages measured on total organic matter between 5.5 and 9.0 m may be slightly biased by contamination by organic detritus.

The average diameter of the mineral grains was measured using a laser granulometer (figure 2c). Measurements of the magnetic properties of the sediments were performed every 1 cm (low field susceptibility; figure 2d) or every 5 cm (saturated induced magnetisation; figure 2e). They

show the drastic changes in the concentration of detritic influx of the magnetic fraction. Sedimentological and palaeobiological analyses were conducted at 10 cm interval. X-Ray diffractometry and scanning electron microscopy show that the fine mineral fraction ($< 40 \mu\text{m}$) mainly consists of allophanes sometimes accompanied by vivianite. The fraction $> 40 \mu\text{m}$ is dominated either by detrital material, commonly windblown minerals, or by crystals of siderite, an authigenic mineral abundant below 6 m and reflecting reducing bottom conditions (Berner, 1971). Rock-Eval pyrolysis provides the Total Organic Carbon content (TOC) and the Hydrogen Index (HI; mg HC/gTOC). These parameters depend on the lacustrine biological activity, input of organic detritus, and syn- or post-sedimentary processes of degradation of organic matter.

Samples for diatom and pollen analyses were performed following standard procedures. The fluctuating diatom content reflects changes in diatom productivity and in preservation/dissolution of the silica valves. Two major assemblages are observed, dominated respectively by: (i) acidophilous, acorphilous species (e.g. *Pinnularia* spp., *Eunotia* spp.) abundant in the modern swamp; (ii) epiphytic forms (e.g. *Cymbella silesiaca*, *Gomphonema gracile*...) and/or species usually living in open water (e.g. *Fragilaria* spp., *Aulacosira* spp.) and reflecting circumneutral water relatively rich in nutrients. Pollen content is high throughout the profile. From 13 to 4 m, terrestrial taxa are mainly represented by Ericaceae, which live today at altitude $> 2,000$ m. Gramineae predominate above 4 m, reflecting the development of a savanna.

RESULTS

Interval 13.0-12.5 m (≈ 36 ka BP)

The TOC ($> 25\%$) and HI (> 400) values may indicate high biological activity in a swamp with reducing bottom conditions. The low values of the magnetic parameters suggest that the fine detrital particles from the catchment do not reach the core, and are

Table Radiocarbon chronology of Lake Tritrivakely core (January 1992).
Chronologie radiocarbone de la carotte du lac Tritrivakely (janvier 1992).

Sample	Depth (cm)	Analyse Nr LHGI, Orsay	Material	^{14}C activity (%)	^{14}C Age (yr BP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)
LT1.....	15	H616	Macrophytes	113.47 (\pm 1.97%)	Modern	—
LT2/5.....	140	H667	Macrophytes	70.24 (\pm 0.69%)	2,840 \pm 60	-26.0
LT4.....	305	H618	Macrophytes	58.25 (\pm 1.06%)	4,340 \pm 90	-24.8
LT4/5.....	340	H669	Macrophytes	45.69 (\pm 1.57%)	6,290 \pm 110	-22.8
LT4 (40)..	350	H711	Macrophytes	34.87 (\pm 1.58%)	8,460 \pm 130	-21.11
LT4 (69)..	379	H712	Macrophytes	20.46 (\pm 2.08%)	12,750 \pm 170	-18.83
LT5 (19)..	412	H710	Macrophytes	15.32 (\pm 2.13%)	15,070 \pm 170	-18.06
LT5/8.....	463	H670	Macrophytes	9.15 (\pm 2.28%)	19,210 \pm 180	-16.7
LT6.....	550	H624	TOM	5.04 (\pm 4.07%)	24,010 \pm 330	-19.9
LT8.....	732	H650	TOM	2.95 (\pm 6.46%)	28,290 \pm 500	-21.9
LT10.....	904	H626	TOM	1.34 (\pm 12.32%)	34,630 \pm 990	-10.4
LT12.....	1,034	H628	TOM	0.47 (\pm 34.20%)	[43,100 \pm 2,700]	-21.0
LT14.....	1,165	H619	TOM	1.33 (\pm 12.22%)	34,720 \pm 980	-24.5
LT16.....	1,300	H617	Macrophytes	1.10 (\pm 14.97%)	36,200 \pm 120	-25.7

Note: LHGI: Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique; TOM = Total Organic Matter.

probably filtered by belt of subaerial vegetation. The rare coarse detrital grains are probably windblown from the nearby granitic sands. Diatoms reflect a subaerial environment. The waterbody resembles the present one. Ericaceae represent 80% of the pollen taxa, and indicate climatic conditions cooler than today.

Interval 12.5-4.7 m (\approx 36 \approx 20 ka BP)

A long, complex lacustrine episode is recorded by brown mud with relatively high mean sedimentation rate (figure 2b). Between 12.5 and 12.0 m, the establishment of a shallow lake is documented by the development of aquatic pollen and then of open water diatoms associated with epiphytic forms. Laminations appear in the sediments. The TOC content sharply decreases and stabilizes around 10%. From 12 to 6 m, the values of the magnetic parameters are generally high, although fluctuating. This reflects large influx of fine-grained detrital material through intense weathering of the catchment area (an exception is the large peak at 11.7 m which corresponds to a tephra layer). The general decrease in HI values indicates increasing participation of altered allochthonous material and/or oxidation of *in situ* organic matter. This evolution is not linear. The positive oscillations in HI centered on 11.5-10.5 m

and on 9.5-8.0 m appear to be roughly in phase with maximum content in diatoms, and may reflect episodes of intense algal productivity in a lacustrine environment. The progressive establishment of palustral conditions is then recorded by increased frequencies of aerophilous diatoms. The pollen spectrum is still dominated by Ericaceae.

Interval 4.7-3.0 m (\approx 19-4 ka BP)

Mean apparent sedimentation rate drops drastically, and several thin beds of fine oxidized sand occurring between 4.3 and 3.8 m would record short-term droughts. During the Last Glacial Maximum, biological productivity would be extremely reduced, as suggested by the minimal values of TOC and HI observed for the whole profile, the almost total disappearance of diatoms and of aquatic pollen taxa. Conditions favorable to aquatic life re-establish as soon as 14.5 ka BP (= 17.1 cal ka BP). A Cyperaceae swamp develops, in phase with an increase in HI and with the development of a neutrophilous diatom flora. A large change in the regional vegetation occurs during the last deglaciation period: the relative frequencies of Ericaceae fall drastically in two steps and reflect the end of the Last Glacial thermic conditions. A Gramineae vegetation develops under a

Figure 2 Some sedimentary and magnetic properties of the upper 13 m of the Tritrivakely profile: a) simplified stratigraphic log; b) ¹⁴C ages vs depth and mean sedimentation rate (msr); c) mean diameter of mineral particles; d) low field susceptibility; e) saturated induced magnetisation.

Quelques propriétés sédimentologiques et magnétiques des sédiments de Tritrivakely: a) log stratigraphique simplifié; b) âges ¹⁴C vs profondeur (msr): vitesse moyenne de sédimentation; c) susceptibilité magnétique; d) aimantation induite à saturation.

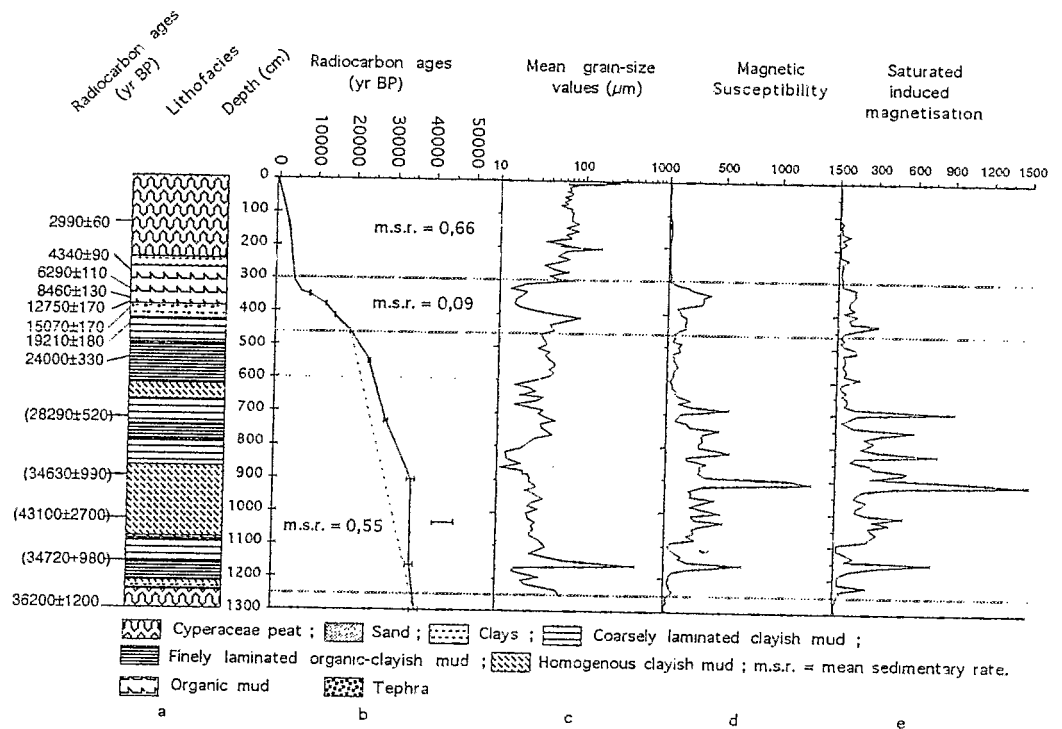
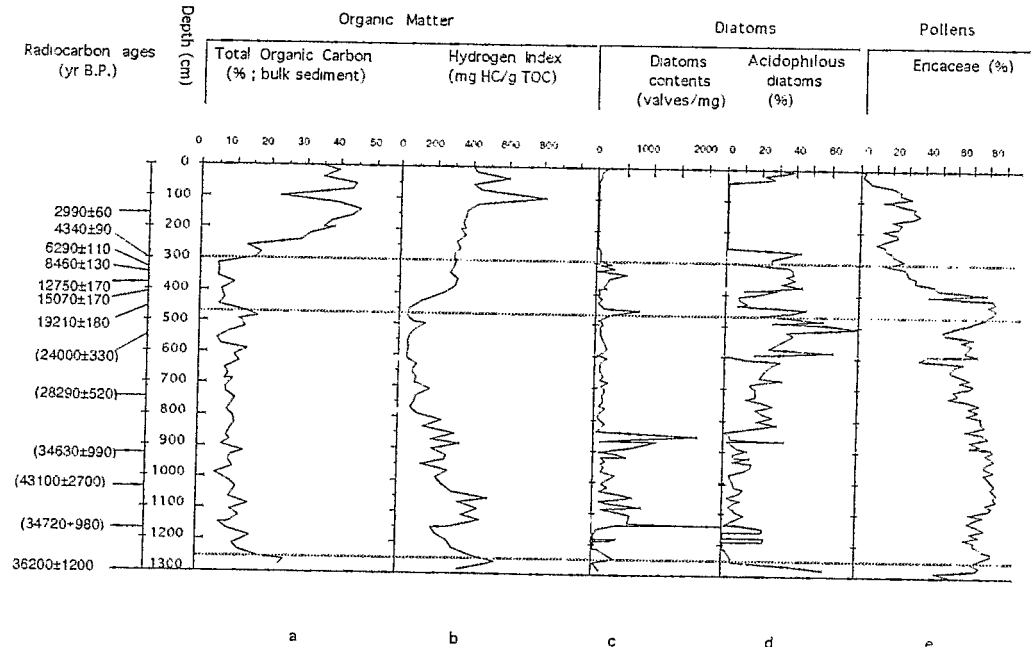


Figure 3 Some palaeobiological characteristics of the upper 13 m of the Tritrivakely sequence: a) Total Organic Content (TOC); b) Hydrogen Index (HI); c) diatom content; d) relative frequencies of acidophilous, aerophilous diatom species; e) terrestrial pollen taxa: percentage of Ericaceae pollen grains.

Quelques caractéristiques paléobiologiques de la séquence de Tritrivakely: a) Carbone Organique Total (COT); b) Indice d'Hydrogène (IH); c) teneurs en diatomées; d) fréquences relatives des diatomées acidophiles et aérophiles; e) pollens d'origine terrestre. pourcentage des Ericacées.



warmer climate. It limits the erosion rate on the crater slopes, and the local Cyperaceae vegetation filters detrital particles. Mean sedimentation rate remains very low.

Interval 3.0-0.0 m (≈ 5-0 ka BP)

The Late Holocene period is represented by an accumulation of Cyperaceae peat very similar to that of the core base with regard

to the sedimentological and magnetic parameters. A slight increase in Ericaceae is observed around 3.5-3.0 ka BP, before the establishment of the present-day conditions.

CONCLUSION

The Tritrivakely profile reflects large changes in hydroclimatic conditions acting on the erosion rate in the watershed, primary productivity in the lake, and regional vegetation cover. It also documents a nearby volcanic event at \approx 35 ka BP. The Last Glacial

Maximum and the last deglaciation are clearly recorded, despite a very low sedimentation rate during these periods. Considering increased sediment compaction with depth, the 40 m cores collected at Tritrivakely most likely represent the last climatic cycle. Comparison will be attempted between our data and the Antarctica (*see* for instance Jouzel *et al.*, 1989) and tropical Indian Ocean records (Rostek *et al.*, 1993) once transfer functions will be established to quantitatively infer palaeoclimatic variables from our proxy data.

CHAPERON, P., DANLOUX, J. and FERRY, L., 1993.

Fleuves et rivières de Madagascar.

ORSTOM/DMH/CNRE, ORSTOM, 874 p.

BURNEY, D. A., 1987. Pre-settlement vegetation changes at Lake Tritrivakely, Madagascar, in

GOETZE, J. A. éd., Rotterdam, Balkema, *Palaeoecology of Africa*, 18, pp. 357-381.

BESAIRIE, H., 1946. La géologie de Madagascar.

Travaux du Bureau Géologique n° 54, Tananarive.

DONQUE, G., 1975. Contribution géographique à l'étude du climat malgache, *Mémoire de thèse*, Université de Madagascar, Tananarive.

BERNER, R. A., 1971. Diagenesis of iron minerals, in

Principles of chemical sedimentology, Mc Graw-Hill, New York, NY, pp. 193-209.

JOUZEL, J., RAISBECK, G., BENOIST, J. P.,

YIOU, F., LORius, C., RAYNAUD, D.,

PETIT, J. R., BARKOV, N. I.,

KOROTKEVITCH, Y. S. and KOTLYAKOV, V. M., 1989. A comparison of deep Antarctic ice cores and their implications for climate between 65,000 and 15,000 years ago, *Quaternary Research*, 31, pp. 135-150.

ROSTEK, F., RUHLAND, G., BASSINOT, F. C.,

MÜLLER, P. J., LABEYRIE, L. D., LANCELOT, Y. and BARD, E., 1993.

Reconstruction sea surface temperature and salinity using ^{18}O and alkenone records, *Letters to Nature*, 364, pp. 319-321.

STRAKA, H., 1993. Beiträge zur Kenntnis der

Vegetationsgeschichte von Madagascar (Vorläufige Mitteilung. *Festschrift Zoller. Dissertationes Botanicae*,

196, pp. 439-449, J. Cramer, Berlin.

REFERENCES