

## Le récif barrière ennoyé des Iles marquises et l'effet d'île par endo-upwelling

Francis ROUGERIE, Bruno WAUTHY et Jacques RANCHER

**Résumé** – L'existence d'un récif barrière ennoyé par 95 m de profondeur autour des îles de l'archipel des Marquises permet de proposer un modèle rendant compte de la présence d'eaux vertes, riches en plancton, autour de ces îles. Cet « effet d'île » serait la conséquence du maintien, au sein du récif barrière ennoyé, tué par choc thermique au cours de la dernière transgression marine, d'un endo-upwelling : les nutriments libérés par ce processus seraient utilisés par le phytoplancton côtier. L'écosystème algo-coralien benthique aurait été remplacé par un écosystème planctonique.

### The drowned barrier reef and the "island effect" by endo-upwelling in Marquesas Archipelago (French Polynesia)

**Abstract** – The recent discovery of a drowned barrier reef (about 95 m) around the Marquesas Islands allows us to propose a model taking into account the presence of green and plankton-rich waters surrounding these islands. This "island effect" could result from the persistence inside this drowned barrier reef killed by cooling of surface water during the last marine transgression, of an endo-upwelling: nutrient released by this process could be used by coastal phytoplankton. The benthic algo-coral should have been replaced by a plankton ecosystem.

**Abridged English Version** – When compared with other tropical islands of the central and western Pacific which are surrounded by outcropping barrier reefs, the high islands of Marquesas Archipelago lack any thick coral building. The absence of a barrier reef has drawn the attention of several authors ([1], [2], [3]). They assert that regional oceanic properties would be unpropitious to massive coral settlement.

1. NEW DATA FROM HYDROPOL CRUISES (1986-1990). – Results of hydrological surveys made with the *R. V. Marara* in the South Central Pacific Ocean (Polynesian zone) allow us to depict oceanic features around Marquesas Archipelago, from offshore waters to inner bays of Nuku Hiva island. It appears that although the thermo-haline mean patterns are similar to those of the Equatorial Current [4], these coastal waters are significantly richer in dissolved nutrients and in chlorophyll-a (Table). The presence of these plankton-rich green waters can be viewed as resulting from an "island effect" [13], the mechanism of which is unknown. In the other Polynesian and South Pacific archipelagos, oceanic waters surrounding barrier reefs and atolls keep their deep oligotrophy: it has been proposed recently that these thick coral-reefs, equivalent to oases in the tropical oceanic desert, could maintain their huge productivity thanks to an inner geothermal convection we have labelled "geothermal endo-upwelling" ([11], [12]).

2. THE DROWNED BARRIER REEF AROUND MARQUESAS ISLANDS. – Echo soundings and dredgings by the *Marara* (Fig. 1) have confirmed the presence of a subhorizontal platform at  $95 \pm 5$  m depth, all around these islands. This carbonate structure is prolonged offshore by a 50% slope very similar to barrier and atoll reef slopes. This platform can then be considered as a drowned barrier reef ([5], [6]), without any living algo-coral ecosystem, due to the lack of sufficient light at such considerable depth [7].

3. LIFE AND DEATH OF A BARRIER REEF. – In order to explain the present position of this dead drowned reef we have used recent data by Fairbanks [8] and Bard *et al.* [9]; these

Note présentée par Lucien LAUBIER.

0764-4450/92/03150677 \$ 2.00 © Académie des Sciences

18 DEC. 1995

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

N° : 42894

Cote : B

ex 1

ORSTOM Documentation



010000822

authors have reconstituted the last sea-level transgression that began 20,000 years ago (20 ky) by dating coral cores drilled in the Caribbean zone, both with  $^{14}\text{C}$  and U-Th techniques. Results (*Fig. 2*) show that after a slow upward move (0.5 cm/year) from -20 to -14 ky there has been a sudden rise to a rate of 3.7 cm/year of the oceanic level, a trend resulting from huge melting of glaciers and Antarctic ice pack, in response to climate warming. Global paleoclimatic data of the CLIMAP project [10] indicate that ocean surface temperature was about 20-22°C in the Marquesas zone 20 ky ago. So we assume that an outcropping barrier reef was then surrounding these islands and that, during the first phase of moderate rising, coral growth was able to keep pace as in the other tropical archipelagos.

The sudden rise of sea level detected at -14 ky means a strong enhancement of the volume of melted water injected in the Peru-Chili Current, whose north-west extension (Equatorial Current) reaches the Marquesas zone (*Fig. 3*). This enhancement could have lowered sea surface temperature to below 18°C, this figure being taken as the lethal level for tropical corals. At such temperature, the barrier reef would have been killed by thermal cooling and at the end of the sea-level rise (-6 ky) was covered by  $95 \pm 5$  m of water, as is the case today.

4. THE ISLAND EFFECT BY PERSISTENCE OF ENDO-UPWELLING. — Even after the death of its covering algal-coral ecosystem, this barrier reef has continued to be the site of a geothermal endo-upwelling, a process independent of climatic factors [11]. The nutrients of the endo-upwelled water seeping up at the top of the drowned platform could no longer be used by their usual benthic consumers, mainly symbiotic algae living inside coral tissues. These nutrients then became available for oceanic phytoplankton blooming, causing the greening of Marquesas coastal waters: this model (*Fig. 4*) provides an explanation for the spectacular "island effect" [13]; from an ecological point of view, it is the result from a change from a benthic algal-coral to a pelagic ecosystem.

---

I. LES CAMPAGNES « HYDROPOL » DU *MARARA* (Bâtiment de contrôle biologique et océanographique). — Pendant les campagnes HYDROPOL effectuées par le *Marara* entre 1986 et 1990 dans la zone économique exclusive de Polynésie Française, les relevés hydrologiques et physico-chimiques ont été resserrés autour de l'archipel des Marquises. Un des objectifs de cette étude du proche large de ces îles était de rechercher une éventuelle relation entre les caractéristiques océaniques et l'absence de récif barrière affleurant, problème qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs ([1], [2], [3]). Les résultats obtenus selon des transects baie — proche large au nord et au sud de l'île de Nuku Hiva indiquent la présence, près des côtes, d'une eau dont le contenu thermo-halin s'écarte peu de celui du courant équatorial qui baigne l'archipel [4]. Ces eaux côtières, significativement plus riches en nutriments dissous et en phytoplancton que les eaux du large, peuvent être qualifiées « d'eaux vertes » à cause de leur couleur, qui contraste avec le bleu profond des mers du sud de la zone océanique tropicale centrale. Cet « effet d'île » très spécifique des Marquises ne peut être interprété ni en terme de processus dynamique (absence autour de ces îles d'upwelling ou de dôme hydrologique), ni en terme d'apport terrestre (faiblesse, voire absence, de ruissellement et de rivières). Il a persisté pendant l'année 1987 alors que l'upwelling équatorial avait cessé, privant la zone nord des Marquises de tout apport de nutriments à partir de la zone équatoriale. Au sud de l'archipel et jusque vers 30° sud, les eaux superficielles océaniques sont très

fortement oligotrophes : sels nutritifs à la limite de la détection analytique, faible teneur en chlorophylle, très basse charge particulaire (tableau).

2. LE RÉCIF BARRIÈRE ENNOYÉ A 95 M DE PROFONDEUR. — Dès 1928 W. Davis [1] avait signalé l'existence autour de l'île de Nuku-Hiva de banquettes sous-marines par 80-90 m de profondeur, observation confirmée au nord de cette île par l'expédition CAPRICORN organisée par la SCRIPPS et dirigée par Roger Revelle ([5], cf. Raitt).

Les données relevées avec le *Marara* [6], écho-sondages et dragages, ont permis de préciser que ces banquettes constituent une structure carbonatée continue autour de chaque île : on observe ainsi une terrasse sous-marine subhorizontale dont le rebord se trouve sous  $95 \pm 5$  m d'eau, à 1 ou 2 milles du trait de côte moyen ; cette terrasse se raccorde à la côte par des pentes faibles ; vers le large elle se termine par un escarpement très raide comme en témoignent les profils d'écho-sondeurs (*fig. 1*). Ces profils sont en fait semblables à ceux que l'on obtient en arrivant sur les atolls des Tuamotu ou sur les îles hautes entourées de récifs barrières affleurants, avec une pente régulière de l'ordre de 50 %.

3. VIE ET MORT D'UN RÉCIF BARRIÈRE. — A la fin de la dernière glaciation, il y a 20 000 ans, le niveau de l'océan mondial se trouvait à  $120 \pm 5$  m au-dessous du niveau actuel [7]. Lorsque la déglaciation s'est produite, des quantités considérables d'eau froide de fusion ont été déversées dans l'océan dont le niveau s'est élevé très vite. Dans le Pacifique Sud, les glaciers chiliens atteignaient la latitude de  $40^\circ$  Sud et leur fusion s'est traduite par l'injection d'énormes quantités d'eau glacée dans le courant du Chili-Pérou.

Des résultats récents de Fairbanks [8] et Bard et coll. [9], obtenus par datations  $^{14}\text{C}$  et U-Th de carottes de récifs des Caraïbes montrent que la montée des eaux océaniques s'est opérée en plusieurs étapes (*fig. 2*) : de l'ordre de 0,5 cm/an entre -18 000 et -14 000 ans, elle s'est ensuite brutalement accélérée jusqu'à atteindre 3,7 cm/an. Après une phase de montée moins rapide entre -13 000 et -11 000 ans, une deuxième accélération à 2,5 cm/an s'est produite vers -11 000 ans. Pour ces auteurs ces 2 phases de montée très rapide seraient la conséquence d'un accroissement brutal de la fusion des glaciers, à un rythme de l'ordre de  $10^4 \text{ km}^3/\text{an}$ .

La carte publiée en 1976 par les membres du « CLIMAP Project », [10] donne la répartition des températures de surface de l'océan, en août, il y a 20 000 ans par rapport au champ thermique océanique actuel (*fig. 3*) ; la partie orientale du grand gyre du Pacifique Sud (courant du Chili-Pérou) était plus froide de 4 à  $6^\circ\text{C}$  ; l'isotherme  $20^\circ\text{C}$

TABLEAU

Caractéristiques de la couche superficielle de mélange (0-100 m).  
Données des missions HYDROPOL du N.O. *Marara* (1986-1990).  
*Properties of the oceanic mixed layer (0-100 m).*  
*Data from HYDROPOL cruises by the R. V. Marara (1986-1990).*

Longitudes : $140-150^\circ\text{W}$ (Polynésie Française)	Océan ( $20^\circ\text{S}-13^\circ\text{S}$ )	Nuku-Hiva ( $9^\circ\text{S}$ )	Océan ( $8^\circ\text{S}$ ) année 1987
Température ( $^\circ\text{C}$ ) . . . . .	25,0-29,0	27,0-29,5	28,5-29,0
Salinité ( $\text{S}^\circ/\text{oo}$ ) . . . . .	35,5-36,3	35,0-35,8	$35,7 \pm 0,1$
Nitrate ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) . . . . .	0,1	$3 \pm 1$	$1,0 \pm 0,2$
Phosphate ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) . . . . .	0,15	$0,4 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$
Silicate ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) . . . . .	$\leq 0,5$	$1,5 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$
Chlorophylle-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) . . . . .	0,08	$1,0 \pm 0,2$	$0,2 \pm 0,1$
Charge particulaire ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) . . . . .	50	$> 300$	100

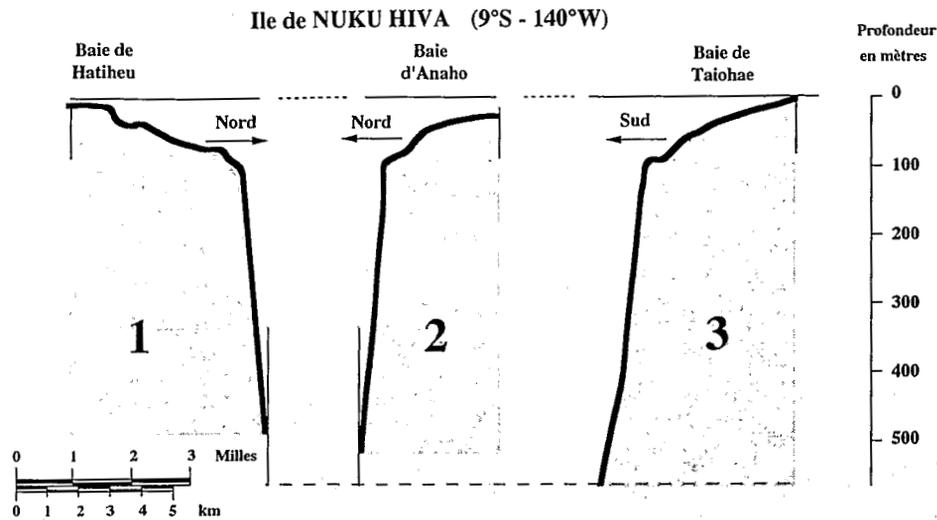


Fig. 1. — Profils bathymétriques aux abords d'une île haute des Marquises (9°S, 140°W).  
 Fig. 1. — Bathymetric profiles around a high island of Marquesas Archipelago (9°S, 140°W).

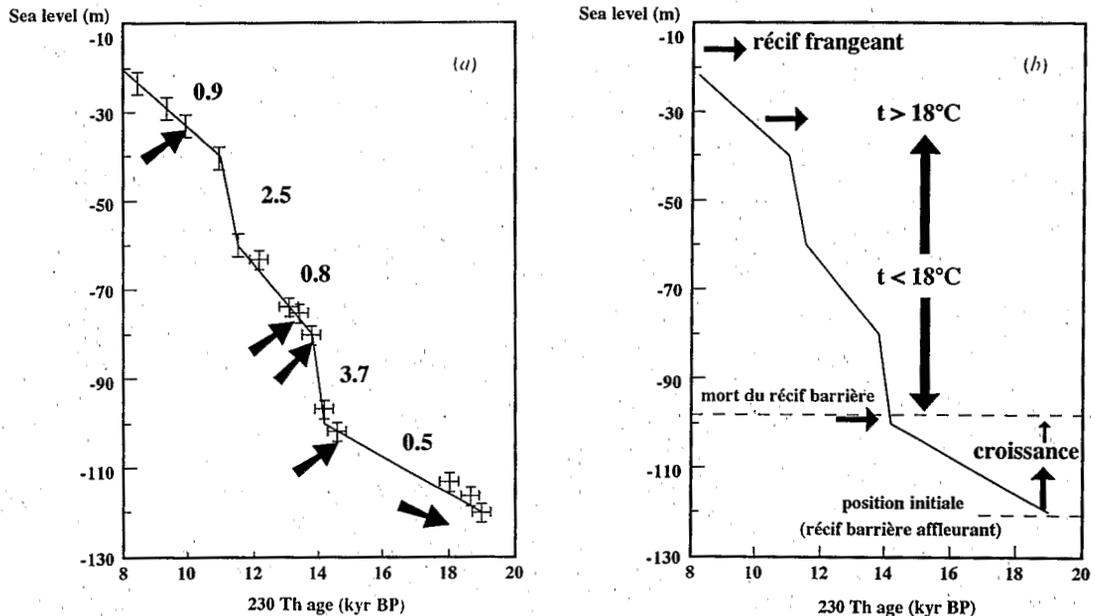


Fig. 2. — (a) Montée du niveau de la mer pendant la dernière déglaciation. Les chiffres donnent la vitesse de montée océanique en centimètre par an. D'après Bard et coll. [9]; (b) Application au récif barrière des îles Marquises : après une croissance de 25 m, le récif barrière est tué par choc thermique résultant d'une déglaciation plus rapide.  
 Fig. 2. — (a) Sea-level rise during the last deglaciation. The figures are the rising rates (cm/year) calculated from slopes of the linear regression. From Bard et al. [9]; (b) Application to Marquesas Islands barrier reef: following a slow 25 m rise the barrier reef is killed by thermal cooling in a phase of rapid marine transgression.

atteignait les îles Marquises, ce qui les plaçait près de la limite inférieure de la plage thermique de développement possible des coraux hermatypiques (18 à 30°C).

Les conditions thermiques présentes il y a 20 000 ans aux Marquises étaient donc compatibles avec l'existence d'un récif barrière corallien autour de ces îles hautes, situation analogue à celle que l'on rencontre aux îles Gambier (135° W-23° S) de nos jours. Mais, de façon paradoxale, le réchauffement global du climat provoquant la déglaciation a

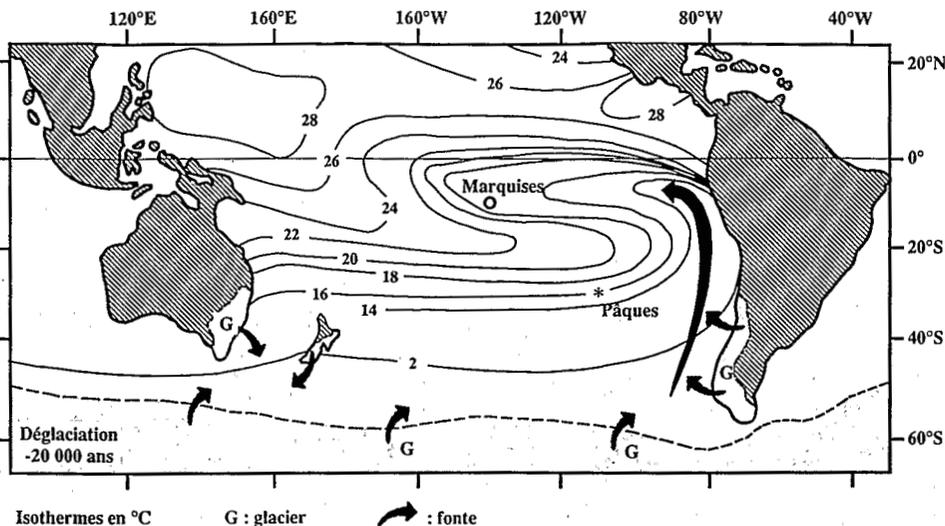


Fig. 3. — Reconstitution CLIMAP [11] des températures océaniques de surface au début de la dernière déglaciation (-20 000 ans). Les flèches indiquent les zones de fusion des glaciers.

Fig. 3. — CLIMAP simulation [11] of sea surface temperature in the beginning of the last deglaciation (-20 ky); arrows indicate main ice melting zones.

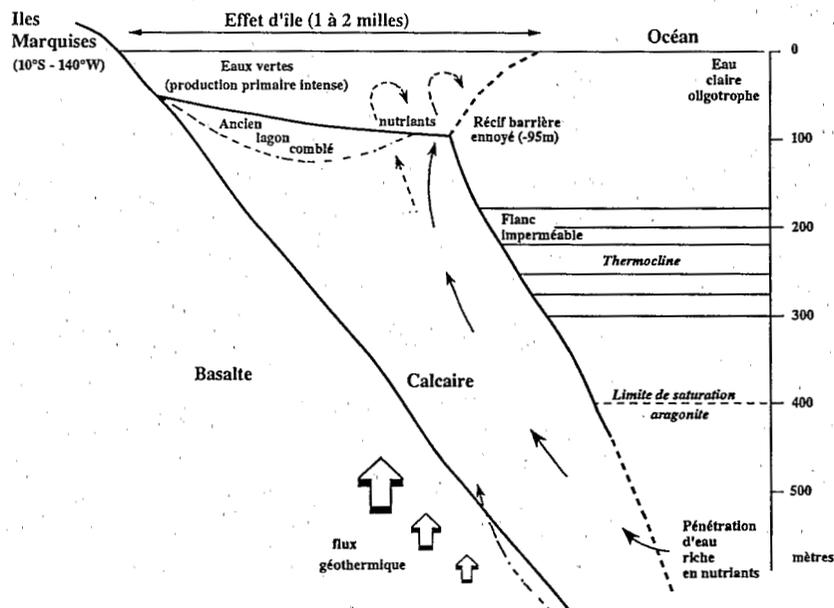


Fig. 4. — Modèle d'effet d'île autour des îles Marquises; arrivée de nutriments dans la couche euphotique océanique par persistance de l'endo-upwelling géothermique au sein du récif barrière ennoyé.

Fig. 4. — Island effect around Marquesas Islands; the seepage of endo-upwelled nutrients at the top of the drowned barrier reef sustains blooming of oceanic plankton.

entraîné un refroidissement notable de la partie orientale du gyre océanique centré sur l'île de Pâques. En effet, l'injection dans le courant du Chili-Pérou des eaux glacées de fusion des glaciers chiliens, puis de la calotte antarctique, a entraîné un abaissement de la température et de la salinité de la couche de surface, cette « langue froide » s'étirant ensuite vers l'ouest en bordure sud du courant équatorial jusqu'aux îles Marquises. Pendant la première phase modérée de déglaciation, la température océanique autour des Marquises a pu se maintenir entre 18 et 22°C, tandis que la croissance des coraux

compensait la lente montée du niveau océanique : le récif barrière a pu ainsi s'élever de 25 m, de son niveau initial (-120 m) jusque vers 95 m, scénario en accord avec les courbes de Fairbanks et de Bard. A -14000 ans, intervient une brutale augmentation de la montée du niveau marin liée à l'augmentation concomitante du volume d'eau glacée (de fusion) atteignant l'océan. La température océanique autour des Marquises serait alors devenue inférieure à 18°C, limite létale des coraux tropicaux : l'écosystème algo-coralien aurait donc été tué par la baisse de température, au moment même d'une élévation très rapide du niveau marin. Lorsqu'à l'issue de la 2<sup>e</sup> phase de déglaciation rapide (-8000 ans), la vitesse de montée des eaux s'est ralentie et que la température des eaux océaniques autour des Marquises est redevenue supérieure à 18-20°C, le récif barrière se trouvait sous une épaisseur de 70 à 80 m d'eau : cette profondeur était trop importante pour qu'un écosystème corallien puisse recoloniser ce qui était alors devenu un récif barrière ennoyé et mort.

4. L'EFFET D'ÎLE PAR PERSISTANCE DU PROCESSUS D'ENDO-UPWELLING GÉOTHERMIQUE. — Dans l'hypothèse où les récifs barrières des zones oligotrophes sont sous la dépendance d'un apport de sels nutritifs par endo-upwelling géothermique ([11], [12]), on peut postuler que les récifs barrières des îles Marquises fonctionnaient selon ce processus. Le fait qu'un refroidissement océanique brutal ait alors tué l'écosystème corallien n'a rien changé quant à l'existence et à la pérennité de la cellule de convection à l'intérieur du socle calcaire poreux. Toutefois les nutriments débouchant dans le haut du récif barrière mort réduit à l'état de « squelette carbonaté », n'étant plus consommés par des algues symbiotiques coralliennes, sont alors susceptibles d'être utilisés par le phytoplancton océanique ; cet apport lent mais continu en nutriments neufs peut donc accroître de façon significative la productivité des eaux sus-jacentes ; ce processus, dans cette hypothèse, peut rendre compte de la présence « d'eaux vertes » autour de ces îles (fig. 4). Il y a donc eu, d'un point de vue écologique, remplacement d'une biocénose benthique corallienne par une biocénose planctonique côtière, mais sans modification de ce qui est pour nous le facteur essentiel de contrôle de la production primaire, à savoir le flux d'eau endo-upwellée. La relation proposée entre l'existence du récif barrière ennoyé et le spectaculaire effet d'île autour des Marquises [13] implique une pérennité du processus d'endo-upwelling, hypothèse qui ne pourra être confirmée que par des forages appropriés.

Note remise le 21 avril 1992, acceptée après révision le 15 juin 1992.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W. DAVIS, *Am. Geogr. Soc.*, 9, 1928, 596 p.
- [2] G. RANSON, *C. R. Somm. Soc. Biogéogr.*, 248, 1952, p. 3-11.
- [3] J. P. CHEVALIER, *Cahiers du Pacifique*, 21, 1978, p. 243-283.
- [4] B. WAUTHY, *PNUÉ: Mer régionales*, 83, 1986, 91 p.
- [5] H. RAITT, *Capricorn Expedition*, Staples Press, London, 1955, 350 p.
- [6] B. WAUTHY et coll., *Notes et Doc. Océanogr.*, Tahiti, 37, 1988, 36 p.
- [7] A. GUILCHER, *Coral Reef Geomorphology*, J. WILEY éd., 1988, 228 p.
- [8] R. FAIRBANKS, *Nature*, 342, 1989, p. 637-642.
- [9] E. BARD, B. HAMELIN et R. FAIRBANKS, *Nature*, 346, 1990, p. 456-458.
- [10] CLIMAP Project Members, *Science*, 191, 1976, p. 1131-1137.
- [11] F. ROUGERIE et B. WAUTHY, *Oceanolog. Acta*, 9, 1986, p. 133-148.
- [12] F. ROUGERIE, Ch. ANDRIÉ et Ph. JEAN-BAPTISTE, *Geophysical Research Letters*, 18, 1991, p. 109-112.
- [13] E. JONES, *Journ. Cons.*, 27, 1962, p. 223-232.

F. R. et B. W. : Centre ORSTOM-Tahiti, B.P. n° 529, Papeete, Polynésie française ;  
J. R. : C.E.A./S.M.S.R., B.P. n° 208, 91311 Monthéry Cedex.