

ISSN 0755-3412

OCEANOGRAPHIE

Notes et Documents n° 37

1988

**Formations récifales et effet d'île
par endo-upwelling autour des
îles Marquises.**

**B. WAUTHY
F. ROUGERIE
L. CHARPY
J. RANCHER
M. THOUARD**

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

ORSTOM

Notes et Documents

N° 37

OCEANOGRAPHIE

ORSTOM
TAHITI
- 1988 -

FORMATIONS RECIFALES ET EFFET D'ILE PAR ENDO-UPWELLING
AUTOUR DES ILES MARQUISES

Par

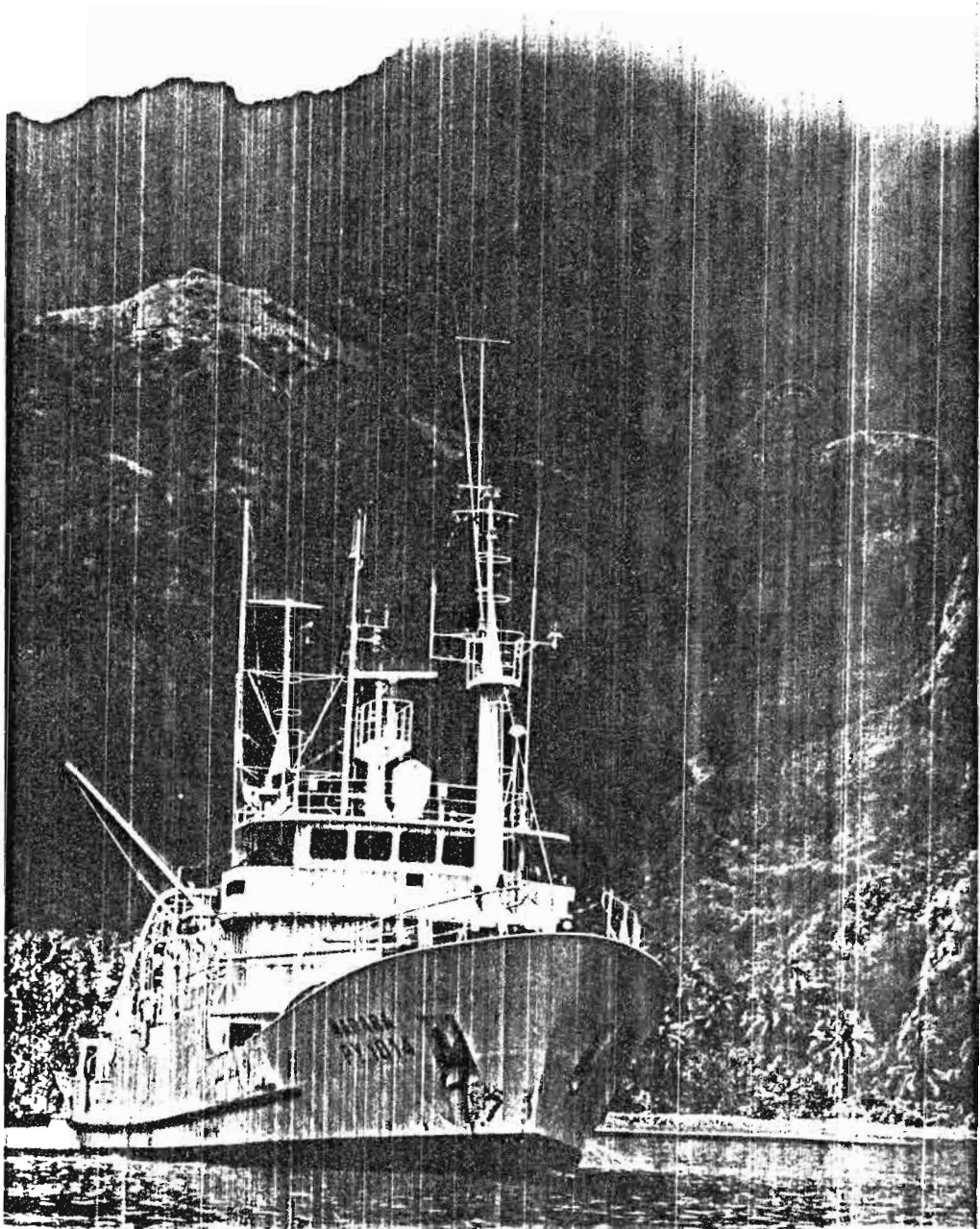
WAUTHY Bruno		ORSTOM
ROUGERIE Francis		ORSTOM
CHARPY Loïc		ORSTOM

et

RANCHER Jacques		SMSR/CEA
THOUARD Michel		SMSR/CEA

ORSTOM : B.P. 529 - TAHITI - Polynésie Française
Direction Générale : 213, rue Lafayette - PARIS

SMSR/CEA : B.P. 16 - MONTLIERY - 91310



Le B.C.B.O. "MARARA" dans la baie des Vierges, Ile de FATU HIVA.

The R.V. "MARARA" at call in "Baie des Vierges, FATU HIVA Island,
South Marquesas.

S O M M A I R E

	Pages
I - MISSIONS DU BCBO "MARARA" EN ZONE POLYNESIENNE	3
1°) Objectifs scientifiques globaux	
2°) Objectifs propres à la zone des Marquises	
II - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DE LA ZONE OCEANIQUE DES MARQUISES	6
1°) Champ thermo-halin	
2°) Distribution des sels nutritifs	
3°) Oxygène dissous et pH	
4°) Turbidité et pigments chlorophylliens	
5°) Analyse des résultats	
III - LES FORMATIONS RECIFALES	14
1°) Nature du problème	
2°) Observations en plongée	
a) les bancs du large	
b) les coraux des îles hautes	
3°) Géomorphologie littorale	
a) la côte	
b) la plate-forme ennoyée	
c) les tombants externes	
4°) Vie et mort d'un récif barrière	
a) énoncé du problème	
b) mort d'un récif barrière	
IV - PERSISTANCE DE L'ENDO-UPWELLING AU SEIN DU RECIF BARRIERE ENNOYE ET EFFET D'ILE	24
1°) Le processus d'endo-upwelling géothermique	
2°) Fonctionnement passé et présent du récif barrière ennoyé	
3°) Endo-upwelling et effet d'île	
4°) Recolonisation et réhabilitation de l'écosystème corallien	
a) le récif barrière ennoyé	
b) les banquettes coralliennes frangeantes	
c) les bancs coralliens du proche large	
V - CONCLUSION	31

FORMATIONS RECIFALES ET EFFET D'ILE PAR ENDO-UPWELLING
AUTOUR DES ILES MARQUISES

RESUME

Pendant les campagnes HYDROPOL effectuées par le BCBO "MARARA" entre 1985 et 1988 dans la Z.E.E. Polynésienne les relevés hydrologiques et physico-chimiques ont été resserrés autour de l'archipel des Marquises. Les résultats obtenus selon deux transects baie-proche large au nord et au sud de l'île de NUKU HIVA indiquent la présence près des côtes "d'eaux vertes" riches en plancton et en nutriments dissous, conditions potentiellement favorables au développement des coraux constructeurs présents au fond de certaines baies abritées (ANAHO) et sur leurs flancs, ainsi que sur les bancs au large. Des données relevées par écho-sondage puis dragage révèlent la présence tout autour de l'île, à 1 mille environ de la ligne de côte et vers 90 mètres de profondeur, d'une plate-forme carbonatée interprétée comme un ancien récif barrière. L'étude des paléotempératures (CLIMAP) permet de proposer que ce récif barrière ait été tué par un brutal refroidissement ($T < 18^{\circ} \text{C}$) intervenant il y a 18.000 ans, en début de déglaciation lorsque les énormes quantités d'eau de fusion des glaciers chiliens ont refroidi les eaux du courant de Humbolt et donc son extension zonale dans le Pacifique Central Sud. Dépourvu actuellement de biocénose constructrice par manque d'énergie lumineuse, cet ancien récif barrière n'en continue pas moins à être le siège d'un processus d'endo-upwelling géothermique, amenant jusqu'au niveau de la plate-forme des nutriments originaires de l'océan profond contigu.

Ce flux continu de nutriments neufs actuellement utilisés par l'écosystème planctonique autour des îles hautes peut rendre compte de la richesse des eaux côtières malgré la faiblesse quantitative des apports par ruissellement. La persistance des eaux vertes jusqu'au proche large, même lorsqu'en période ENSO l'upwelling équatorial disparaît, est ainsi à l'origine de l'effet d'île remarqué de longue date dans cet archipel.

CORAL REEFS AND ISLAND EFFECT BY ENDO-UPWELLING AROUND MARQUESAS

ABSTRACT

HYDROPOL cruises aboard BCBO "MARARA" from 1985 to 1988 intended to describe general hydrology in the ZEE of French Polynesia. Particular interest was given to Marquesas and coastal transects north and south of NUKU HIVA have shown warm, nutrient and plankton rich "green water" to be present in the bays and all around the high island ; these conditions are thought to be potentially favourable to coral growth ; indeed small coral reefs are seen in sheltered inner bays (ANAHO) and coral clusters are scattered nearly everywhere on the walls of cliffs, but prolific coral constructions are found only on offshore banks (Lawson, Clark, Motu One). However depth soundings and dredgings have shown the presence of a carbonated shelf near 90 m all around the high islands of the archipelago ; we interpret this feature as a fossil barrier reef.

Starting from the paleotemperature distribution 18.000 years ago, we propose that the barrier reefs around Marquesas were killed at the beginning of the global warming event by the sudden cooling of surface water ($T < 18^{\circ} \text{C}$) brought from the east where melting water of chilean glaciers was injected in the oceanic circulation. Thereafter abrasion and turbidity by high hydrodynamism from rising ocean against the unprotected land prevented reef-building communities restoring around high islands. At present, geothermal endo-upwelling keeps flowing through this fossil barrier reef, thus providing from nearby deep ocean new nutrients able to sustain the high production level in coastal waters not accounted for by scant terrestrial runoff. So, the extension of this production enhancement to the near open sea could explain the "island mass effect" long recognized around this archipelago.

I - MISSIONS DU BCBO "MARARA" EN ZONE POLYNESIENNE

Depuis 1985, le Bâtiment Océanographique de Contrôle Biologique "MARARA" effectue en Polynésie Française des missions "HYDROPOL" pour le compte du Service Mixte de Sécurité Radiologique (S.M.S.R.), organisme dépendant du CEA et du CEP. Le MARARA est un navire de 50 mètres de long, équipé de treuils, laboratoires et facilités diverses permettant d'appréhender les paramètres classiques de l'océanographie physique et biologique. Son armement est assuré par la C.G.M. (Compagnie Générale Maritime).

Par convention signée en 1986 entre l'ORSTOM et la DIRCEN (Direction des Centres d'Essais Nucléaires), propriétaire du bateau, il est prévu l'embarquement d'océanographes ORSTOM, la saisie et l'exploitation commune des données.

On peut rappeler qu'une coopération de même type existait auparavant entre l'ORSTOM et le SMCB (Service Mixte de Contrôle Biologique) pour la réalisation de missions hauturières. C'est dans ce cadre que 5 missions ont été réalisées dans la ZEE polynésienne entre 1978 et 1981. (Voir en ANNEXE le synopsis des missions hauturières -réalisées depuis 1978). Cette coopération s'était alors essouffée, le manque d'équipements modernes à bord du MARARA diminuant considérablement l'intérêt scientifique de ces campagnes en mer.

Le SMSR ayant procédé en 1985 à un rééquipement du navire, en particulier en bathysonde et technicon, la coopération entre nos deux organismes devenait mutuellement attractive et se matérialise par une participation ORSTOM aux campagnes bi-annuelles HYDROPOL.

1°) Objectifs scientifiques globaux

On peut les grouper selon 4 lignes de force :

a) Dynamique des couches superficielles (0-600 mètres). On cherche à décrire et à préciser les structures à grande et moyenne échelles :

courants, tourbillons, doming Sont utilisées les méthodes indirectes (calcul géostrophique) et directes (profileur de courant, bouée dérivante, GEK). Le GEK installé par l'ORSTOM sur le MARARA en 1979 est malheureusement hors d'usage pour vétusté avancée et il serait fort utile qu'il soit remplacé. Il serait toutefois bien préférable d'envisager l'installation fixe d'un profileur de courant à effet DOPPLER, permettant la connaissance du champ de courant en continu jusqu'à 500 mètres de profondeur.

b) Recherche des zones frontales. Celles-ci peuvent être associées à la convergence subtropicale Sud, qui selon la saison migre entre 40° Sud (été austral) et le tropique (hiver austral) ; il existe également une convergence hydrologique dans la zone d'évaporation maximale, à l'est des Tuamotu (formation de l'Eau Subtropicale Sud caractérisée par un maximum de salinité).

c) Evaluation de la productivité de la couche euphotique par la mesure des paramètres amonts et limitatifs (sels nutritifs, oxygène dissous, pH) et du contenu en pigments chlorophylliens.

d) Echanges océan-atmosphère. Traitement spécifique des paramètres de la couche superficielle afin de définir les situations hydroclimatiques types. Cet aspect du programme s'insère fortement dans les objectifs du programme international TOGA (Tropical Ocean and Global Atmosphere) et constitue en fait l'équivalent, pour le Pacifique Central Sud, (150° W - 140° W) du programme SURTROPAC, mené par l'ORSTOM-NOUMEA sur le 165° Est.

2°) Objectifs propres à la zone des Marquises

Profiter des campagnes Hydropol qui traversent l'archipel du sud au nord, puis du nord au sud pour relever un maximum de données, jusque et y compris au fond des baies les plus encaissées de l'île de NUKU HIWA. Calendrier des missions HYDROFOL.

- Hydropol I	Octobre	1985
- Hydropol II	Avril	1986

- Hydropol III	Octobre	1986
- Hydropol IV	Mars-Avril	1987
- Hydropol V	Octobre	1987
- Hydropol VI	Avril	1988

OBJECTIF : Etudier avec les moyens logistiques et analytiques utilisés pendant les campagnes HYDROPOL du B.O.C.B. MARARA (d'Octobre 1985 à Avril 1988) deux baies d'une île des Marquises et leurs abords océaniques.

a) Motivation scientifique spécifique

Amener des éléments de réponse aux questions posées concernant la distribution des biotopes coralliens aux Marquises et l'absence apparente de récif barrière. Tester en particulier les diverses hypothèses d'un contrôle de la distribution des coraux par des caractéristiques hydrologiques et physico-chimiques spécifiques à cette zone. "... c'est peut-être l'étude de la composition physico-chimique de l'eau de mer qui nous apportera la solution à cet important problème ..." (R. BROUSSE et al., étude géomorphologique des Iles Marquises, Cahiers du Pacifique, 1978).

b) Détail des opérations

- Radiales proche large-fond des baies d'ANAHO et de TALOHAE au nord et au sud de l'île de NUKU HIVA. Profils verticaux multi niveaux et utilisation de :

- . 1 rosette General Oceanic avec 9 bouteilles NISKIN de 30 litres
- . 12 bouteilles NISKIN de 1,7 litres avec thermomètres protégés et non protégés
- . 1 mini bathysonde C.T.D. à mémoire vive SUBER, sortie sur micro EPSON QX 10 pour mesure de la conductivité, de la température et de la pression

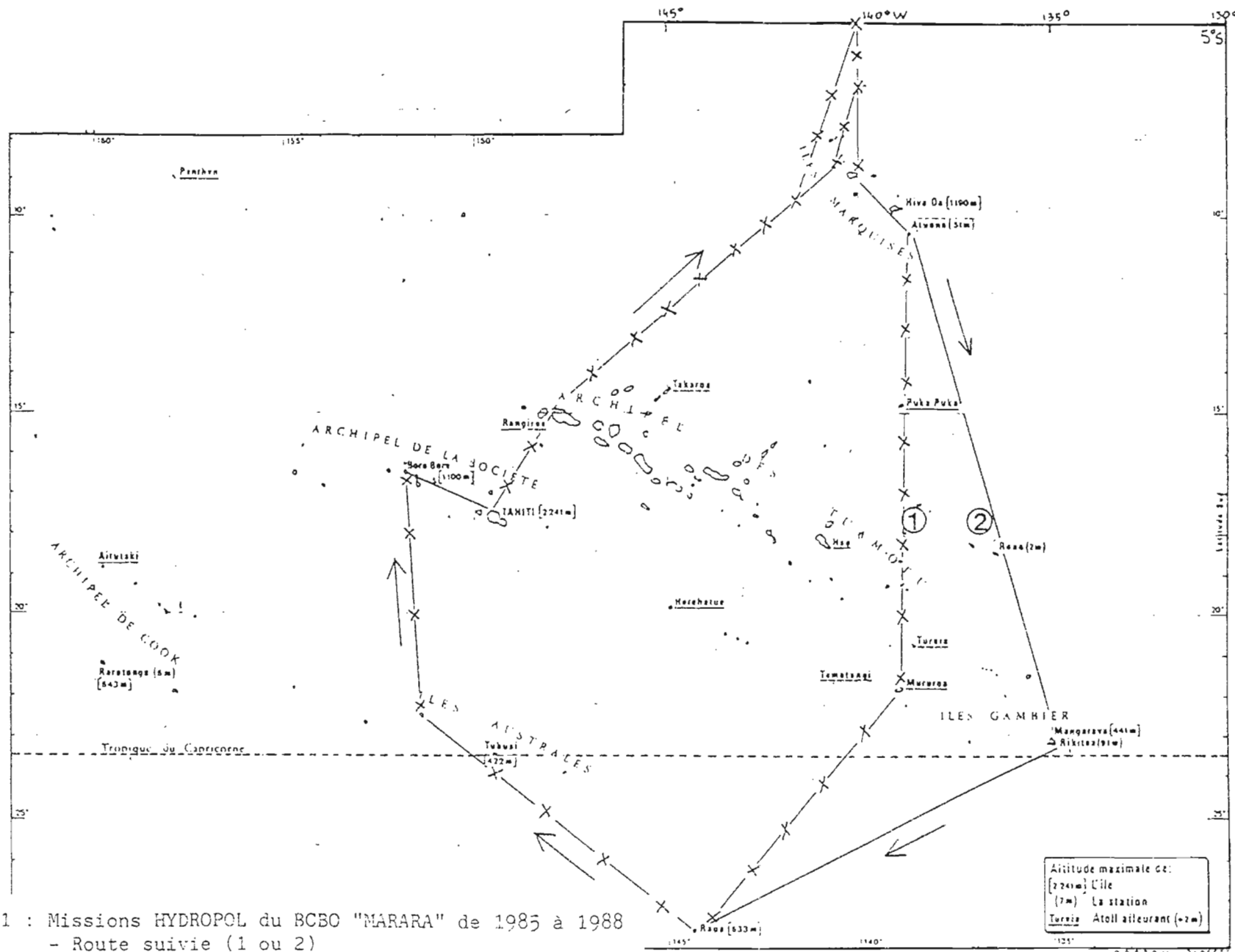


Fig. 1 : Missions HYDROPOL du BCBO "MARARA" de 1985 à 1988
 - Route suivie (1 ou 2)
 - Stations océaniques tous les 30 milles (x--x)
 : HYDROPOL cruises from 1985 to 1988
 - R.V. MARARA track (1 or 2)

- . 1 mini bathysonde C.T.D. 12 + transmissomètre à mémoire vive APPLIED MICROSYSTEMS, sortie sur APPLE II C pour mesure de la conductivité, de la température, de la pression et de l'atténuation lumineuse
- . 1 TECHNICON II, double colorimètre pour mesures des nitrates, nitrites, phosphates et silicates dissous
- . 1 oxymètre automatique METROHM (dosimat 655) avec titroprocesseur, pour mesure chimique de l'oxygène dissous
- . 1 salinomètre AUTOLAB, modèle 601 NK III
- . 1 pH mètre ORION 611, à compensation thermique pour le pH
- . 1 fluorimètre TURNER pour mesure de la chlorophylle

- Plongées dans les baies et sur les abords extérieurs pour prélèvements d'eau interstitielle des sédiments et observations des biotopes en place.

- Même type de plongée et de prélèvements sur les bancs coralliens du large de LAWSON, MOTU ONE et CLARK.

- Enregistrement par écho-sondage de la bathymétrie des pentes et accores des îles et des hauts fonds et dragages avec benne à roche et treuil de pêche.

II - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DE LA ZONE OCEANIQUE DES MARQUISES

1°) Champ thermo-halin

a) Zone océanique TAHITI - équateur

Les transects effectués à partir de TAHITI jusque vers le point 5° Sud - 140° W et de ce point en direction du tropique Sud permettent de connaître avec précision les caractéristiques océaniques autour et à l'intérieur de la zone marquisienne (Fig. 1). L'ensemble de l'archipel est baigné par des eaux dont les valeurs moyennes pour la couche de mélange superficielle (0-75 mètres) sont :

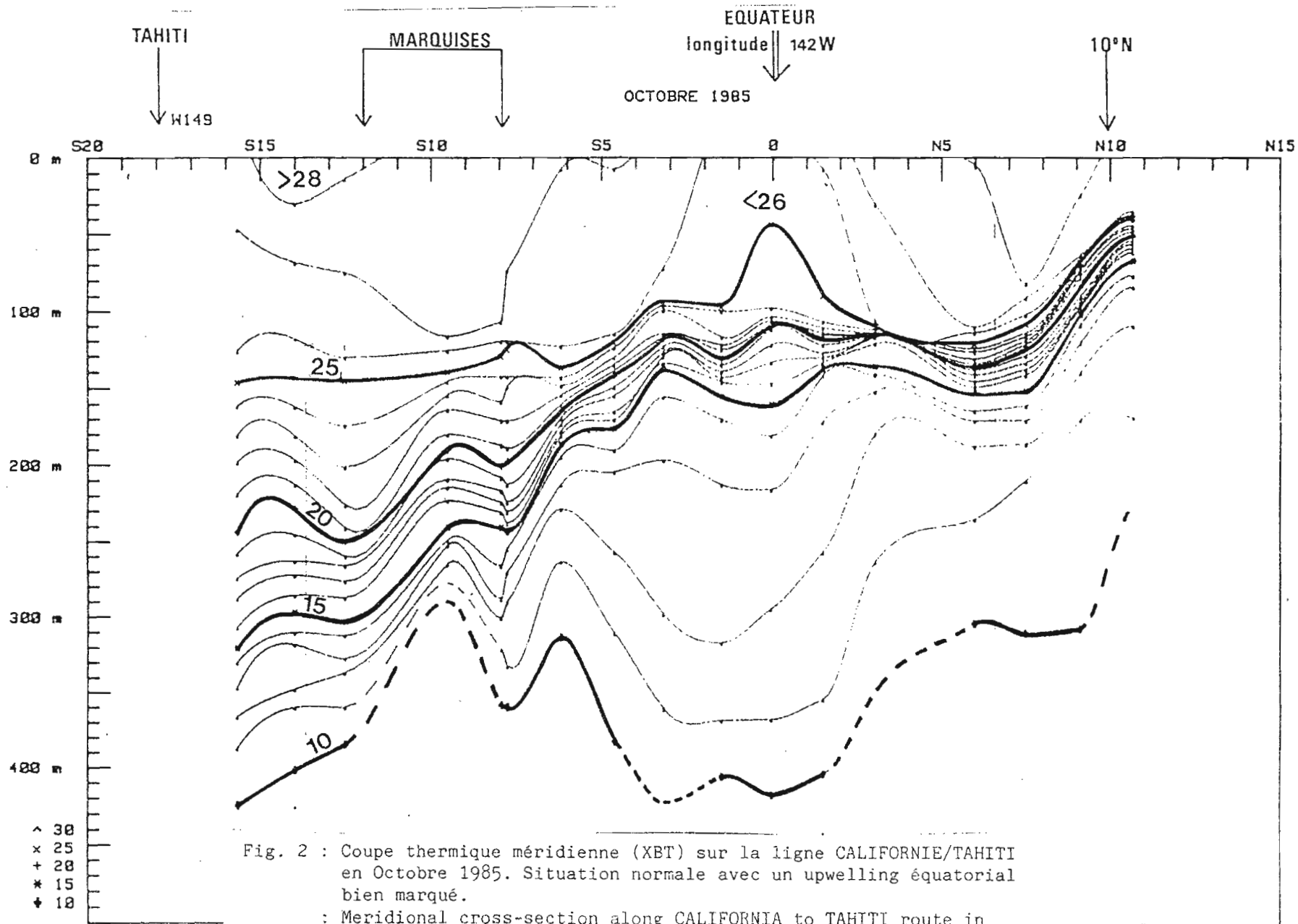


Fig. 2 : Coupe thermique méridienne (XBT) sur la ligne CALIFORNIE/TAHITI en Octobre 1985. Situation normale avec un upwelling équatorial bien marqué.
 : Meridional cross-section along CALIFORNIA to TAHITI route in October 1985. (XBT acquisition). Basic configuration with equatorial upwelling.

ORSTOM
 Papeete

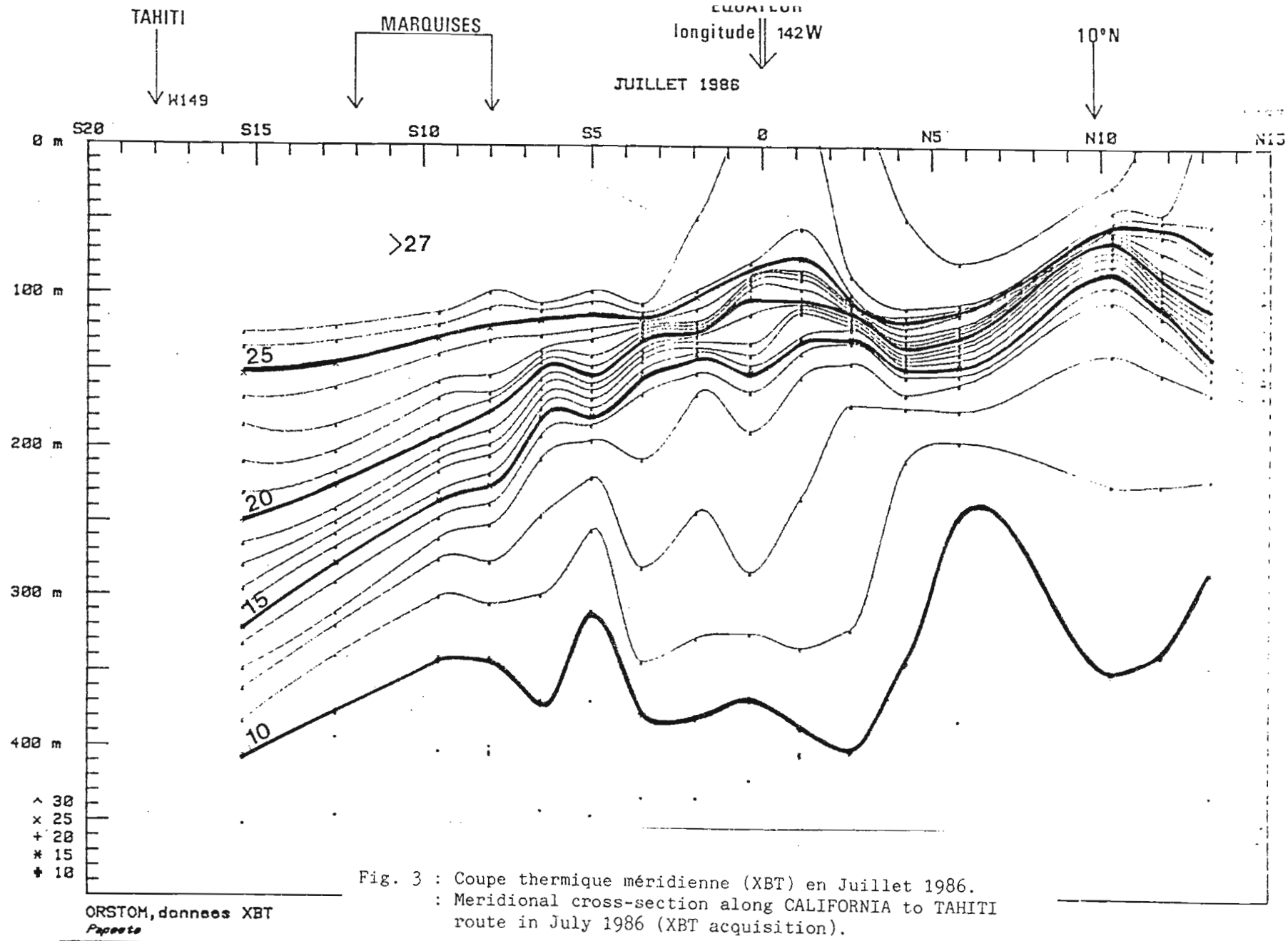
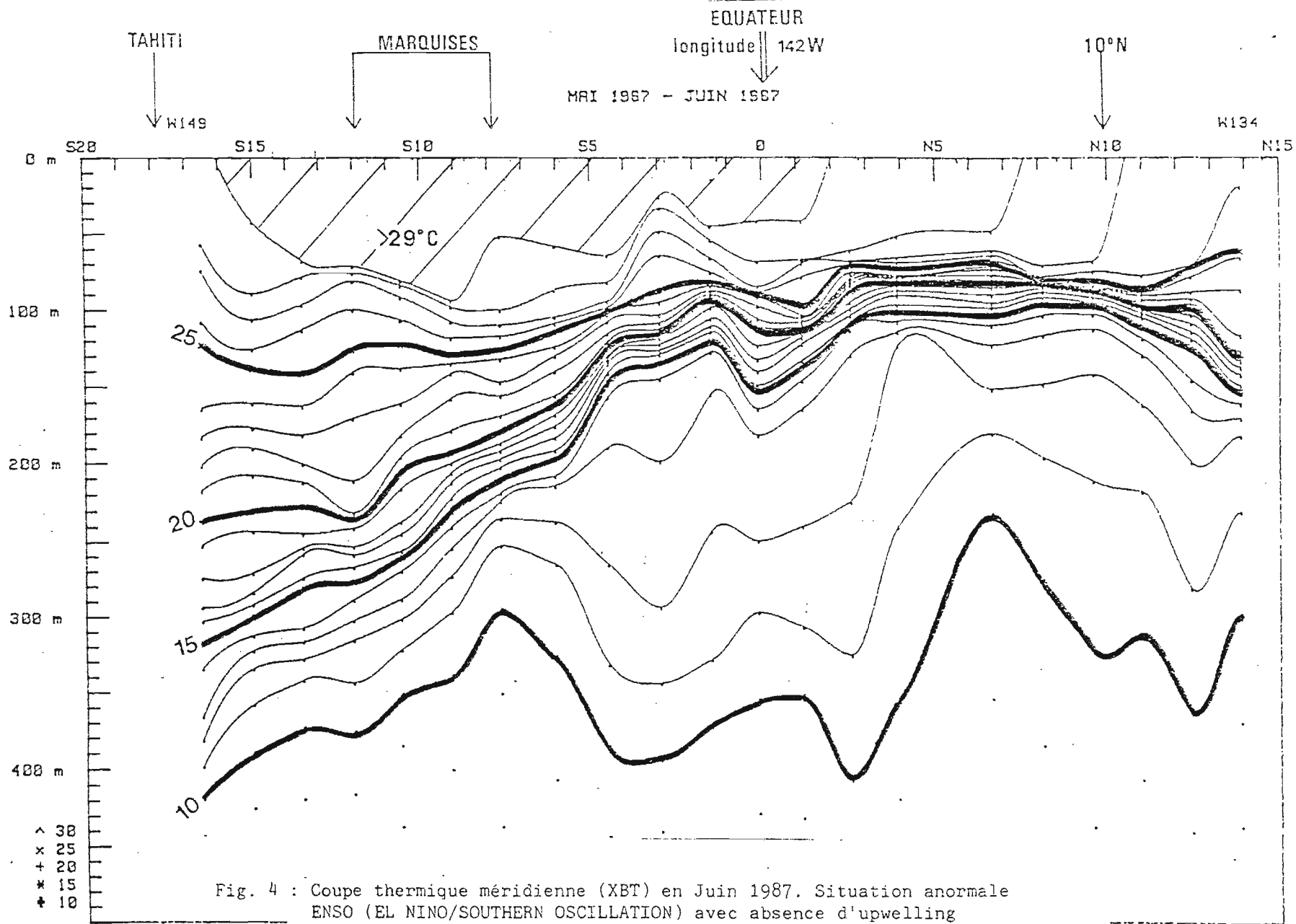


Fig. 3 : Coupe thermique méridienne (XBT) en Juillet 1986.
: Meridional cross-section along CALIFORNIA to TAHITI route in July 1986 (XBT acquisition).



ORSTOM, donnees XBT
Processe

Fig. 4 : Coupe thermique méridienne (XBT) en Juin 1987. Situation anormale ENSO (EL NINO/SOUTHERN OSCILLATION) avec absence d'upwelling équatorial.

: Meridional cross-section along CALIFORNIA to TAHITI route in June 1987 (XBT acquisition). El Nino Southern Oscillation (ENSO) configuration : disappearance of the equatorial upwelling.

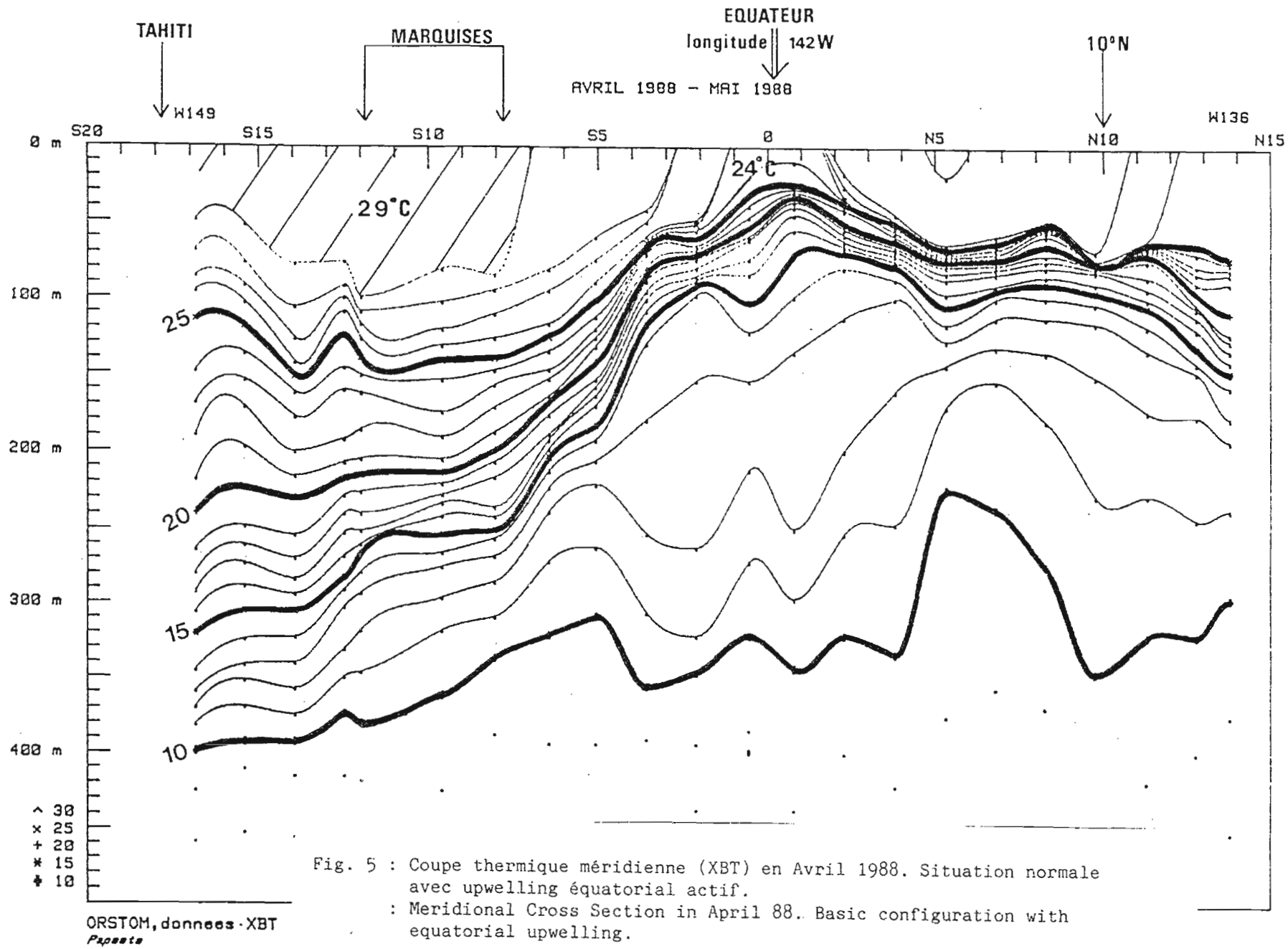


Fig. 5 : Coupe thermique méridienne (XBT) en Avril 1988. Situation normale avec upwelling équatorial actif.
: Meridional Cross Section in April 88. Basic configuration with equatorial upwelling.

Température $28^{\circ} \text{C} \pm 1,5 \text{C}$
Salinité $S = 35,5 \pm 0,3 \%$

Des coupes présentant les profils thermiques verticaux, obtenus par des sondes perdues XBT lâchées par des navires marchands opérant sur la ligne Californie/Tahiti fournissent également une excellente représentation du champ thermique océanique en bordure ouest (142°W) de l'archipel. Ces coupes révèlent l'importance prépondérante du refroidissement équatorial dû à un upwelling, par rapport au signal thermique saisonnier peu marqué à ces latitudes (10°Sud). On rappelle que l'upwelling équatorial se traduit par un refroidissement important de la couche de surface, conséquence de la remontée d'eaux subsuperficielles à partir des niveaux 100 à 300 mètres.

Les coupes d'Octobre 1985 et de Juillet 1986 indiquent une température de 25 à 26°C à l'équateur et de 27 à 28°C à la latitude des Marquises (Fig. 2 et 3). En Mai 1987, plusieurs mois après la disparition de l'upwelling équatorial une couche d'eau chaude à 29°C occupe la zone TUAMOTU - 2°Nord (Fig. 4). En Mai 1988 le refroidissement équatorial est à nouveau très important, la température étant inférieure à 25°C dans l'axe de l'upwelling (Fig. 5) alors que le contenu thermique est resté excédentaire aux Marquises ($T \gg 29^{\circ} \text{C}$). Cet upwelling étant sous la dépendance directe des alizés d'est, il faiblit lorsque les alizés faiblissent et peut disparaître si les vents tombent ou passent à l'ouest : cette inversion du champ de vent, qui peut d'ailleurs entraîner une inversion du champ de courant, est toutefois exceptionnelle dans le Pacifique Central et au cours de la dernière décennie n'a été observée qu'en 1982-1983 (ROUGERIE *et al.*, 1985), et au premier semestre 1987. Cet événement traduit en fait un déséquilibre hydroclimatique important appelé ENSO (El Nino, Southern Oscillation). Les incidences sur les autres paramètres hydrologiques de la situation ENSO de 1987 sont abordés aux paragraphes suivants.

b) Zone marquisienne (Fig. 6)

Les prélèvements ont été resserrés dans les baies de ANAHO et de TAIOHAE situées respectivement au nord et au sud de l'île de NUKU HIVA

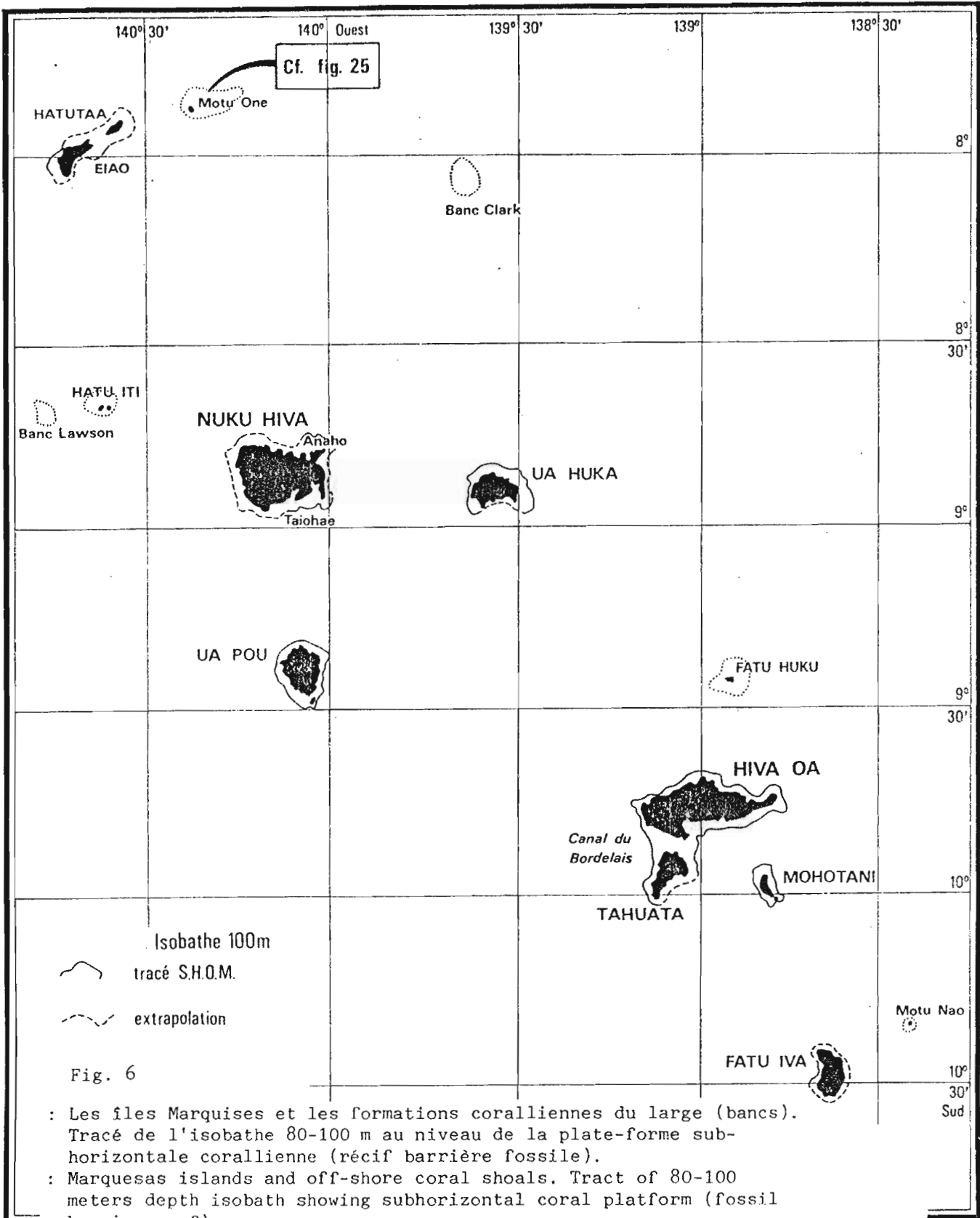


Fig. 6

: Les files Marquises et les formations coralliennes du large (bancs).
 Tracé de l'isobathe 80-100 m au niveau de la plate-forme sub-
 horizontale corallienne (récif barrière fossile).
 : Marquesas islands and off-shore coral shoals. Tract of 80-100
 meters depth isobath showing subhorizontal coral platform (fossil
 barrier reef).

POINT 4 S -140 W (Radiale I)

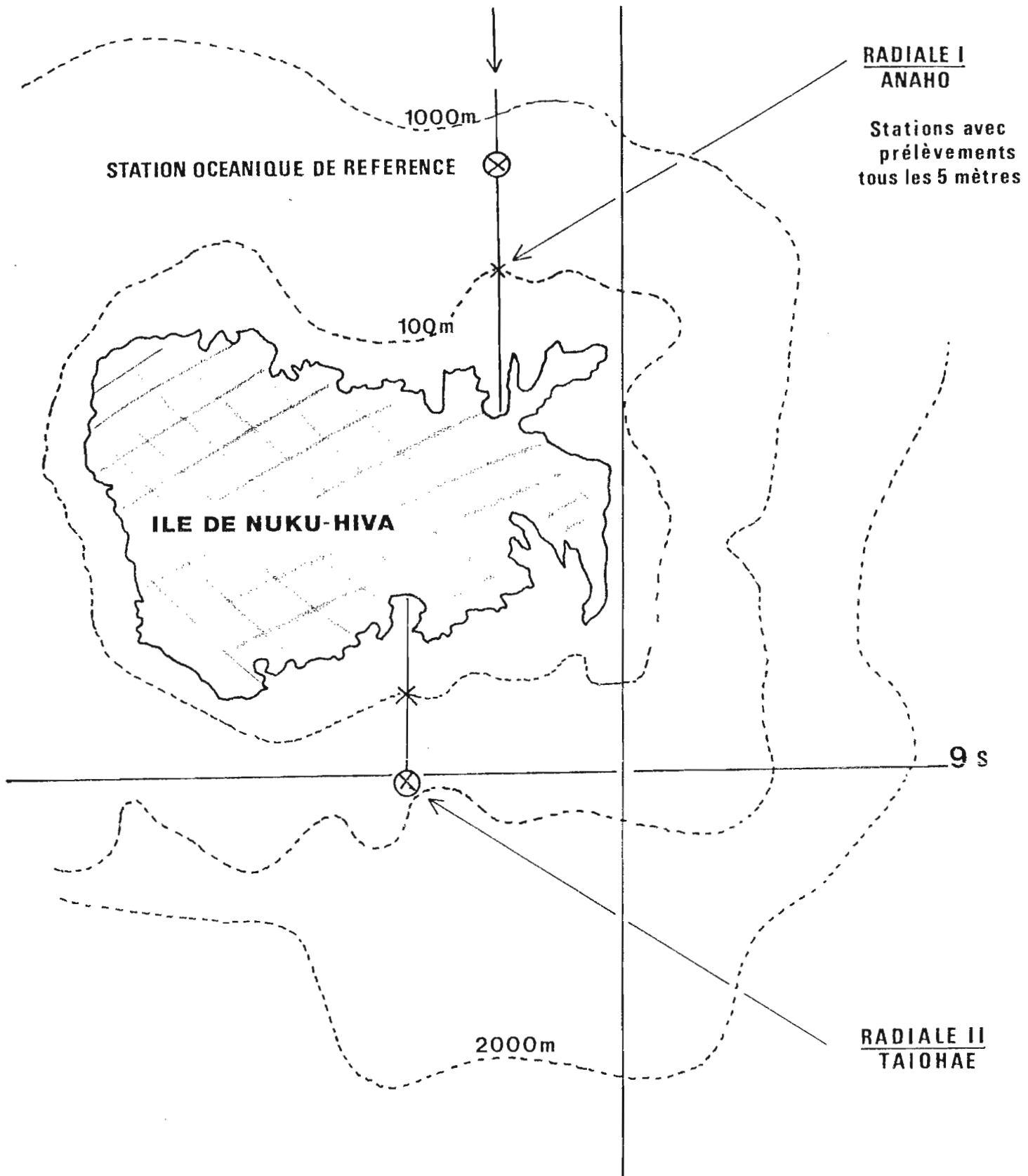


Fig. 7 : Les abords de l'île de NUKU HIVA. Bathymétrie et emplacement des 2 radiales océan-baies.

: NUKU-HIVA island shores : drawing of the 2 cross-sections from open ocean to bay.

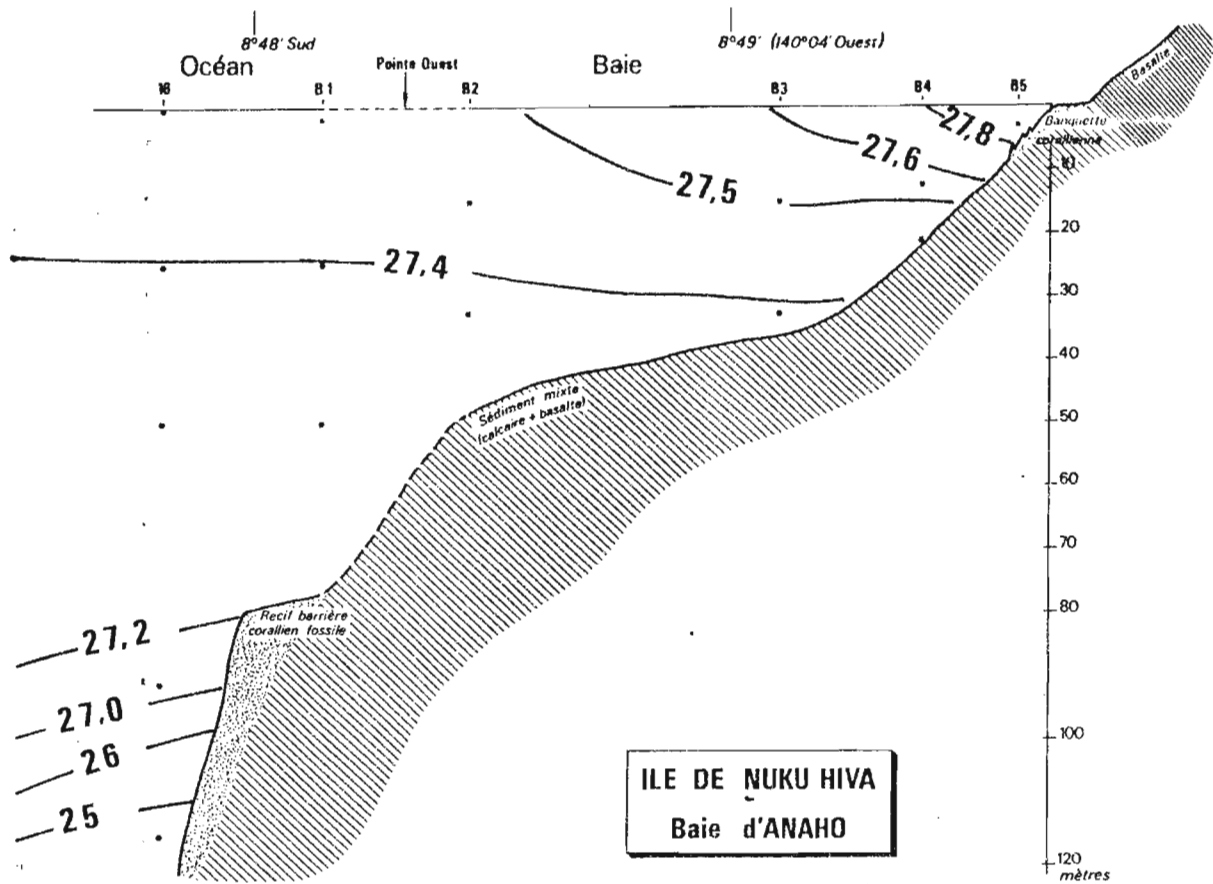


fig. 8 a. Octobre 1986. Température T' C'.

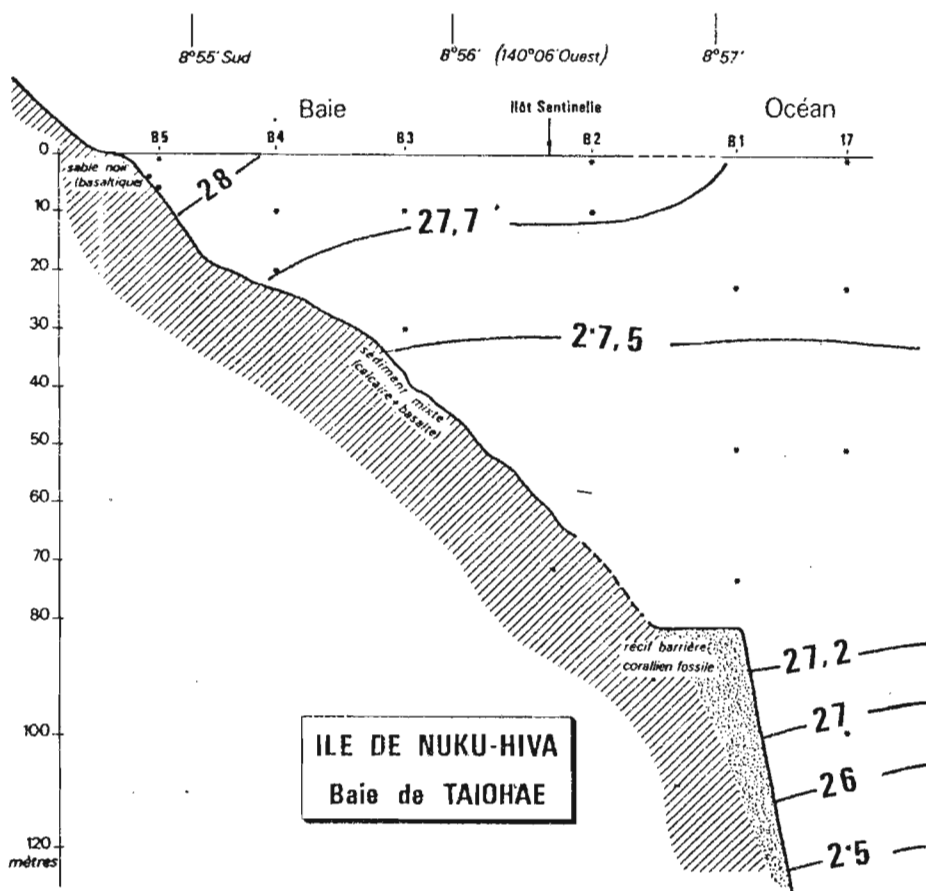


Fig. 8a et 8a' : Octobre 1986. Champs thermique en °C.
: Thermal field in October 1986 (°C).

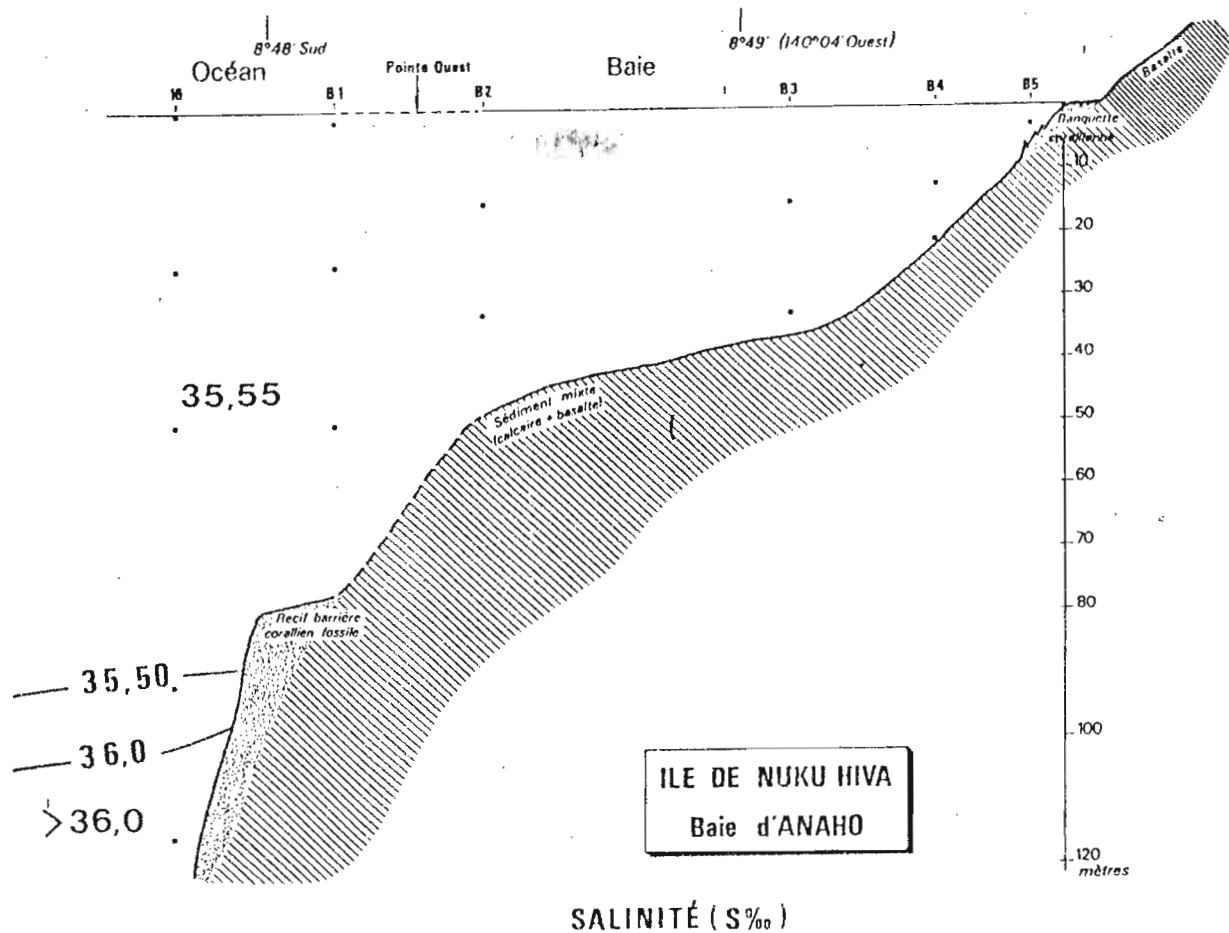


Fig. 8b - Octobre 1986.

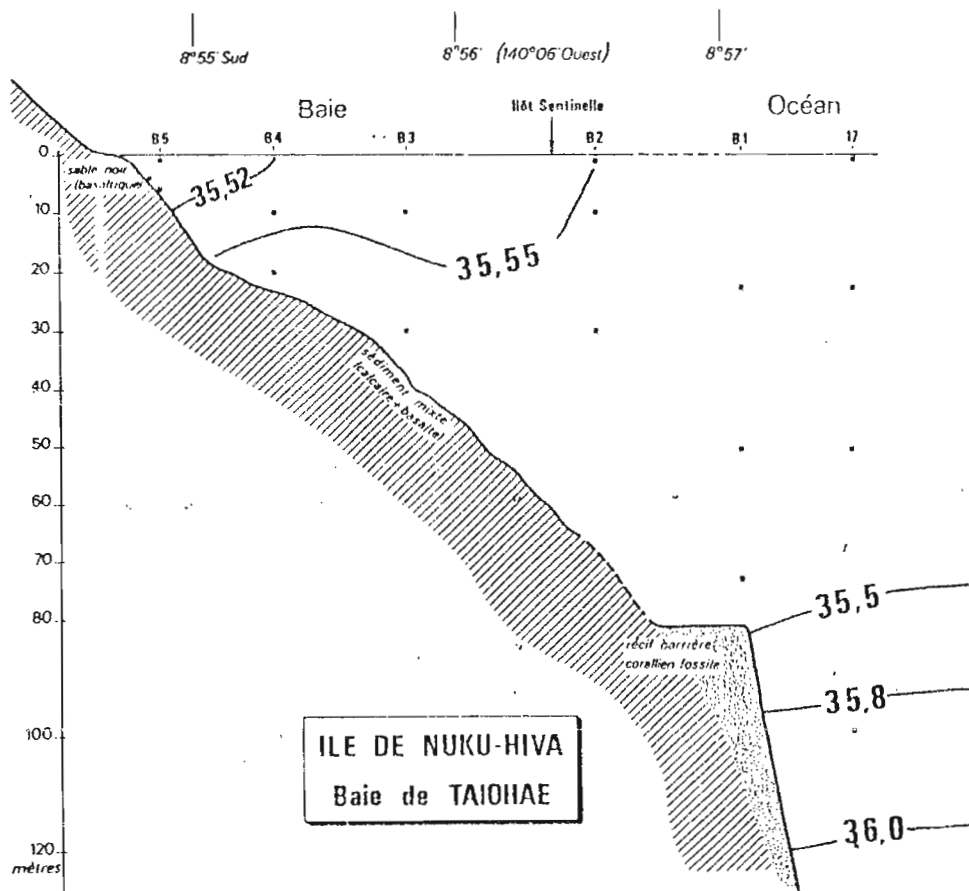


Fig. 8b et 8b'

SALINITÉ (S‰)

: Octobre 1986. Champ halin en S ‰.
 : Salinity field in October 1986 (S ‰).

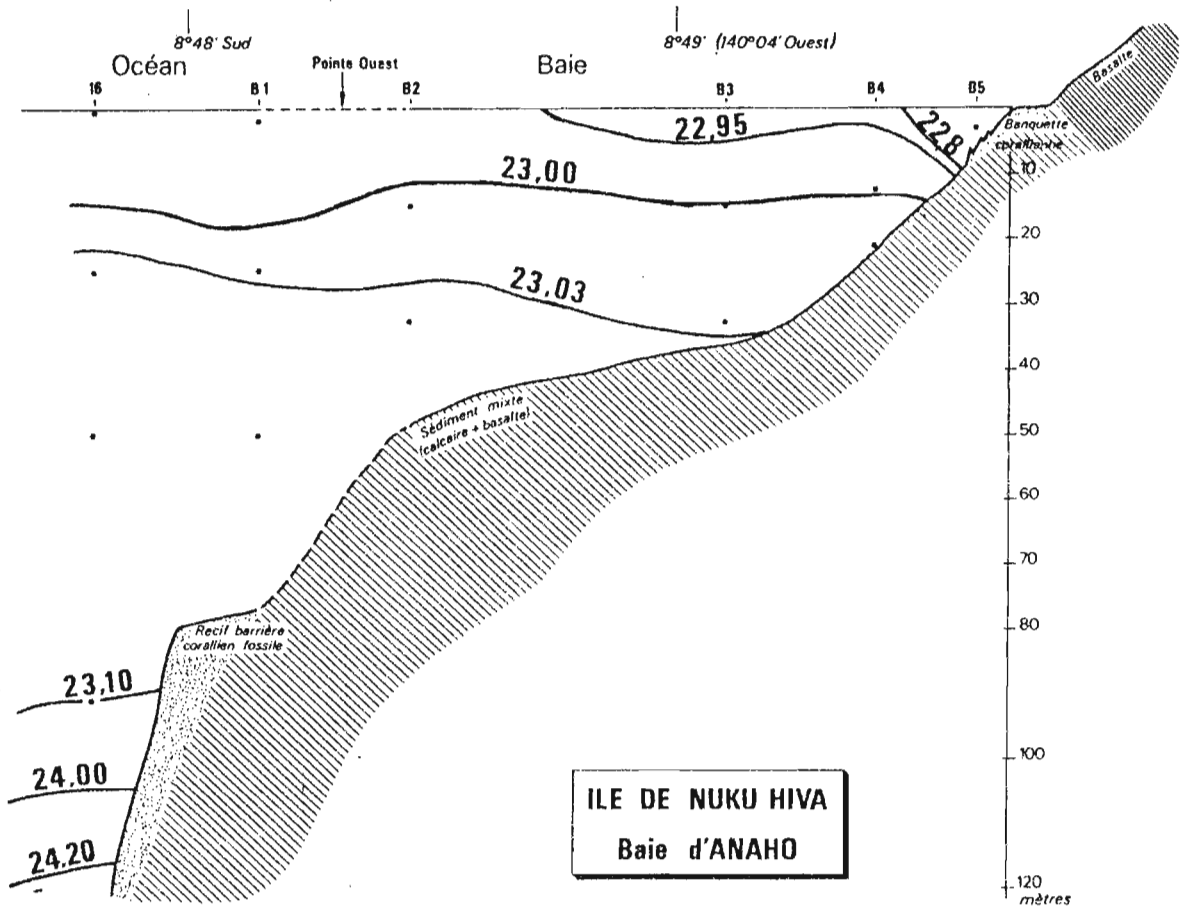


fig. 9 a.

DENSITE $\sigma_t = (d-1)1000$

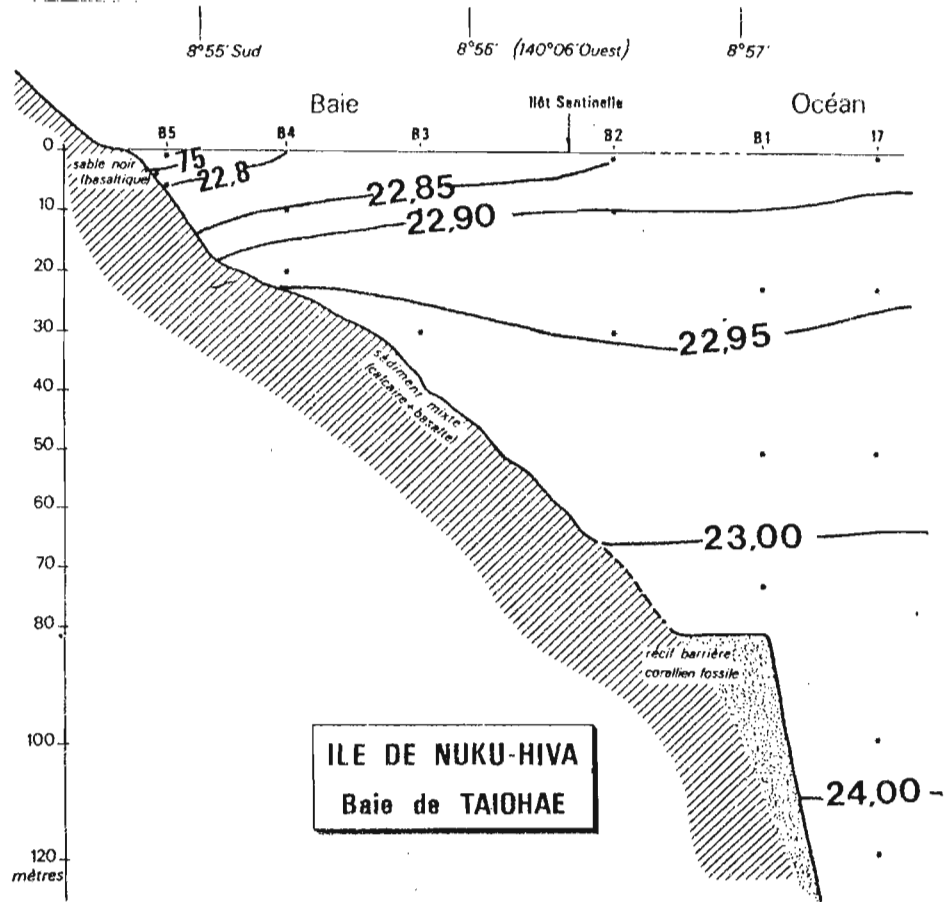


Fig. 9a et 9b : Octobre 1986. Champ de densité en

$\sigma_t = (d-1)1000$

: Density field in October 1986 : $\sigma_t = (d-1)1000$

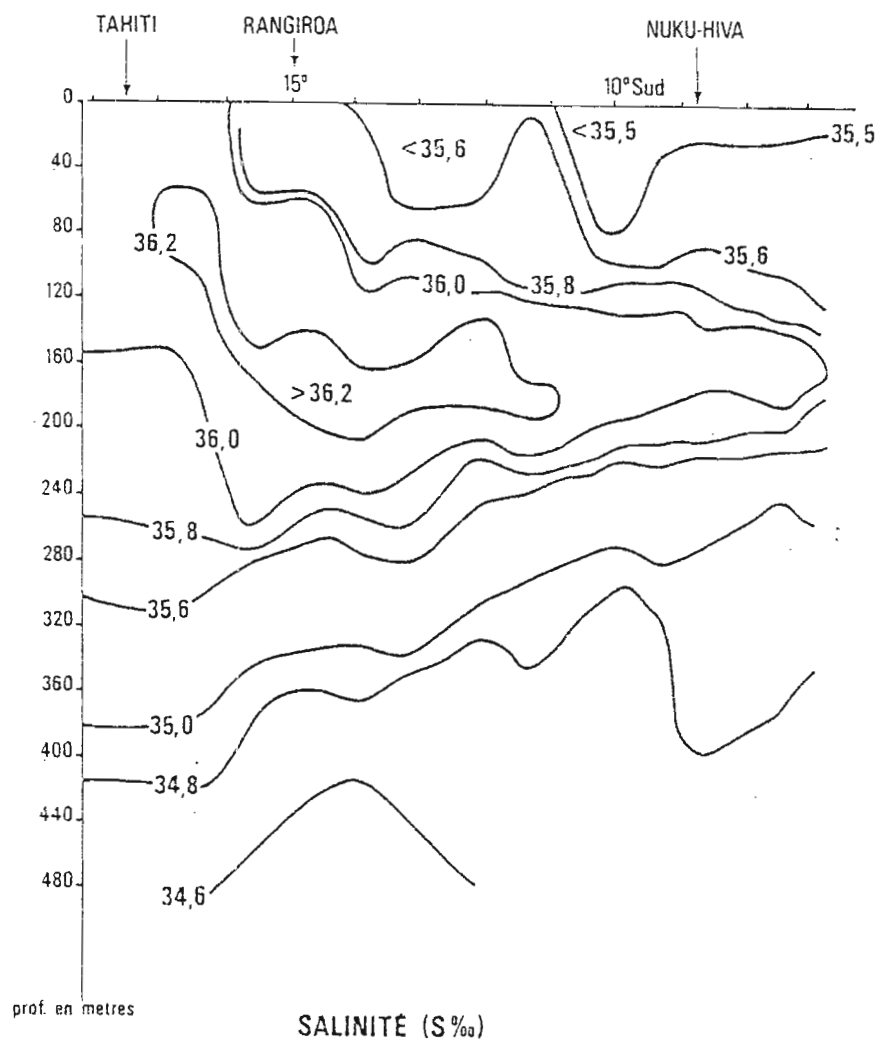


Fig. 10a

: Structure haline océanique en Octobre 1986 (HYDROPOL III).
 : Open sea salinity pattern in October 1986 (HYDROPOL III).

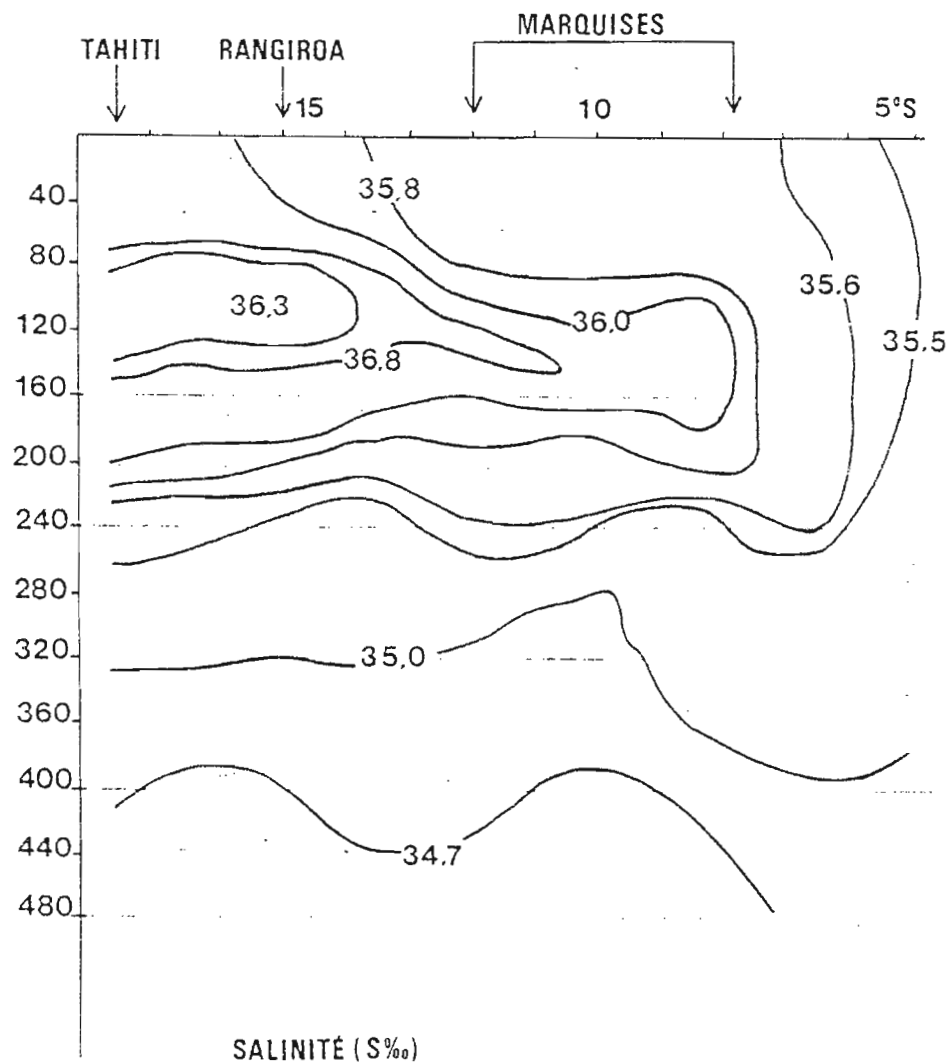


Fig. 10b : Structure haline océanique en Mars 1987 (HYDROPOL IV).
 : Open sea salinity pattern in October 1987 (HYDROPOL IV)

(Fig. 7), en complément aux stations océaniques faites sur des fonds supérieurs à 500 mètres.

En Octobre 1986, les caractéristiques océaniques se conservent à l'intérieur de la baie d'ANAHO où seul un réchauffement de $0,4^{\circ}$ C est notable par petit fond (Fig. 8a). Au fond de la baie de TAIIOHAE au débouché des 3 petites rivières, la salinité ne diminue que faiblement, (Fig. 8b) l'important déficit pluviométrique enregistré en Septembre 1986 se traduisant par un étiage important. Aux stations du proche large la température diminue de façon régulière à partir de 100 mètres de profondeur, créant ainsi une thermocline monotone entre ce niveau et celui de l'Eau Antarctique Intermédiaire (500 mètres). Constante sur 80 mètres d'épaisseur, la salinité croît brutalement et passe par un maximum vers 160 mètres de profondeur, au coeur de l'Eau Subtropicale Sud, formée en surface dans l'est des TUAMOTU à cause d'une évaporation très importante (Evaporation - Précipitation = 1 m/an).

Les abords des baies et l'intérieur de celles-ci sont donc occupés exclusivement par des eaux issues de la couche superficielle de mélange océanique. La densité exprimée en σ_t est minimale dans la partie interne des baies ($\sigma_t = 22,8$) et augmente lentement avec la profondeur avec un gradient de l'ordre de $0,1\sigma_t / 50$ mètres (Fig. 9). Le fait qu'aucune anomalie n'apparaisse dans les profils thermo-halins verticaux ou le long des transects baies - proche large indique une tendance à l'homogénéisation du système et exclue la présence de tourbillons, vortex ou effets d'îles dynamiques.

En Mars 1987, en situation anormale ENSO (champ de vents alizés faibles à nuls) les températures atteignent 30° C dans les baies Marquisiennes et les salinités sont légèrement plus faibles ($\Delta S = - 0,2 \%$) dans le nord de l'archipel (Fig. 10b).

2°) Distribution des sels nutritifs

Les teneurs moyennes en nutriments de la couche océanique de surface (0-50 mètres) de la zone marquisienne sont les plus élevées de

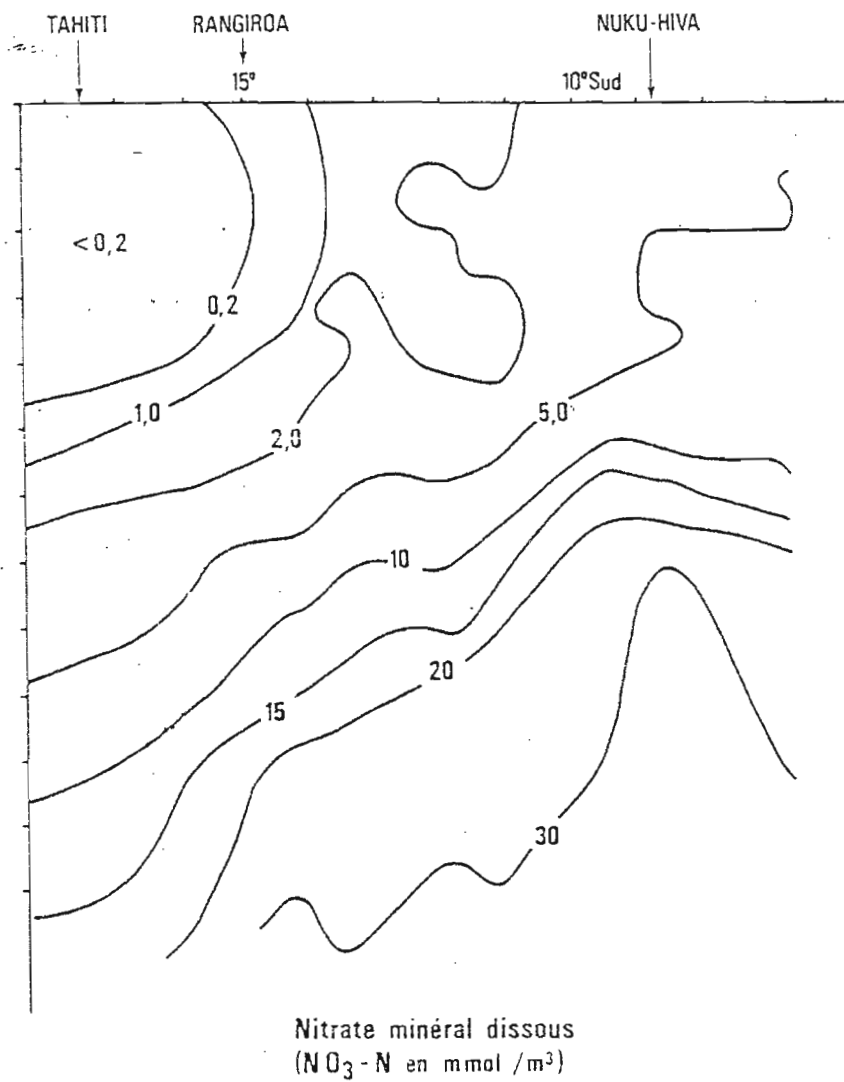


Fig. 11a : HYDROPOL III. Octobre 1986.
: HYDROPOL III cruise in October 1986.

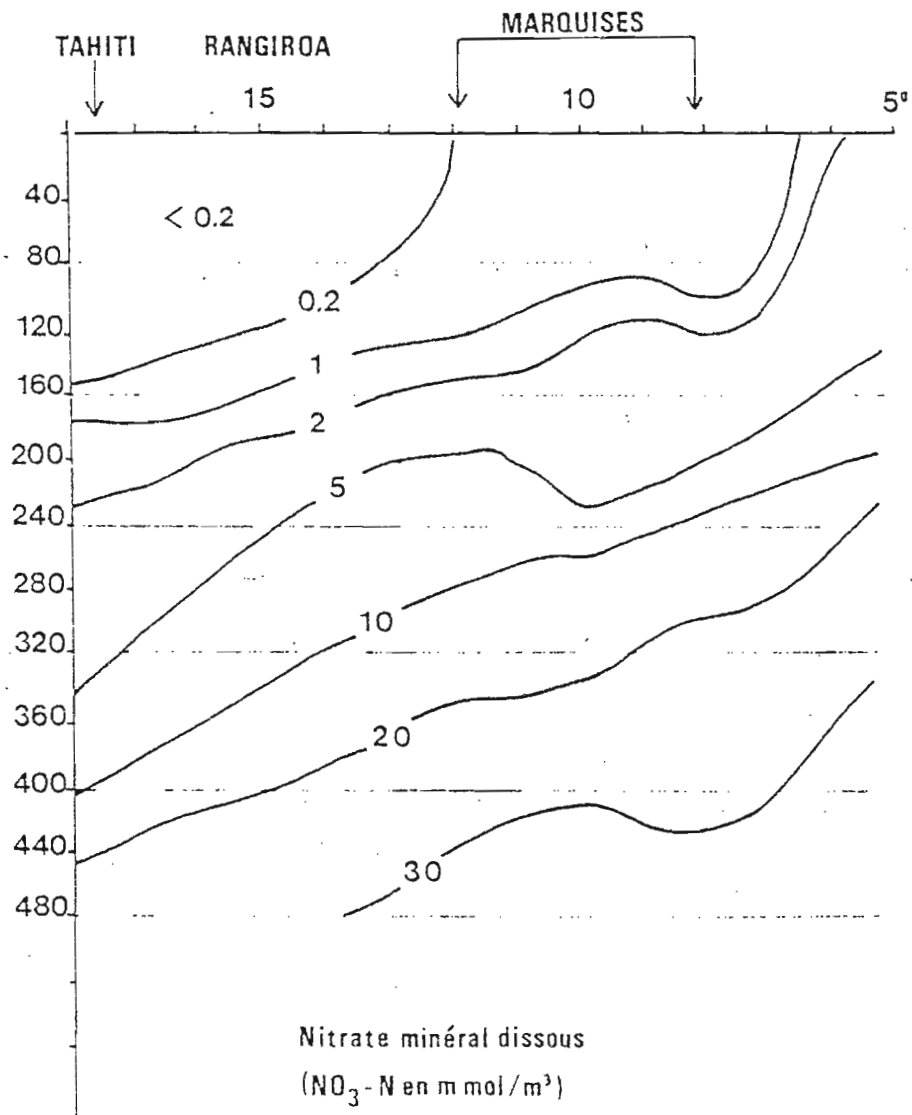


Fig. 11b : HYDROPOL IV. Mars 1987.
: HYDROPOL IV cruise in March 1987.

l'ensemble de la zone polynésienne, entre 5° Sud et 28° Sud. Ces concentrations croissent fortement du sud de l'archipel (13° Sud) vers le nord, les teneurs maximales en nitrate minéral dissous se trouvant à l'équateur dans l'axe de la divergence (Fig. 11a) : cette divergence superficielle affecte les eaux de la grande dérive équatoriale (Courant Equatorial) et se traduit par un transport d'eau méridien de part et d'autre de l'équateur (dérive d'ECKMAN). Ce processus est compensé dans le plan vertical par une remontée d'eau subsuperficielle et profonde qui est donc plus froide et plus riche en nutriments : l'axe de cet upwelling équatorial peut toutefois s'écarter de quelques degrés vers le nord ou le sud en fonction du secteur d'où souffle l'alizé dominant, et qui peut osciller entre le nord-est et le sud-est. Dans son advection vers l'ouest, l'eau upwellée est le siège d'une intense production primaire, ce qui se traduit par une diminution progressive de sa charge en nutriments et une augmentation corrélative de la charge phyto puis zooplanctonique.

En Octobre 1986, les teneurs en phosphates et nitrates dissous évoluent de façon semblable le long d'un transect proche large baie : à ANAHO (baie nord) à partir des valeurs caractéristiques de la couche superficielle océanique ($PO_4 - P = 0,4$ et $NO_3 - N = 4,0$ en $mmol / m^3$) un fort minima se creuse en surface à l'intérieur de la baie, les teneurs réaugmentant ensuite aux abords de la plage corallienne (Fig. 12). A TAIHAE (baie sud) la distribution est peu différente avec un minima prononcé dans la partie interne ; de plus l'apport en nutriments par les rivières est faible en phosphates et indécélable pour les nitrates.

Les teneurs en nitrite dans les 2 baies sont inférieures à $0,2 mmol / m^3$ ce qui exclut tout processus d'accumulation. Au proche large et sur les tombants extérieurs une brutale augmentation du nitrite entre 100 et 180 mètres reflète la présence d'une couche océanique d'accumulation ; cette "poche à nitrite" est le résultat de l'intense oxydation de composants azotés détritiques créés dans la zone d'upwelling équatorial et s'accumulant à la partie supérieure de l'halocline où le gradient de densité tend à freiner l'enfoncement du seston.

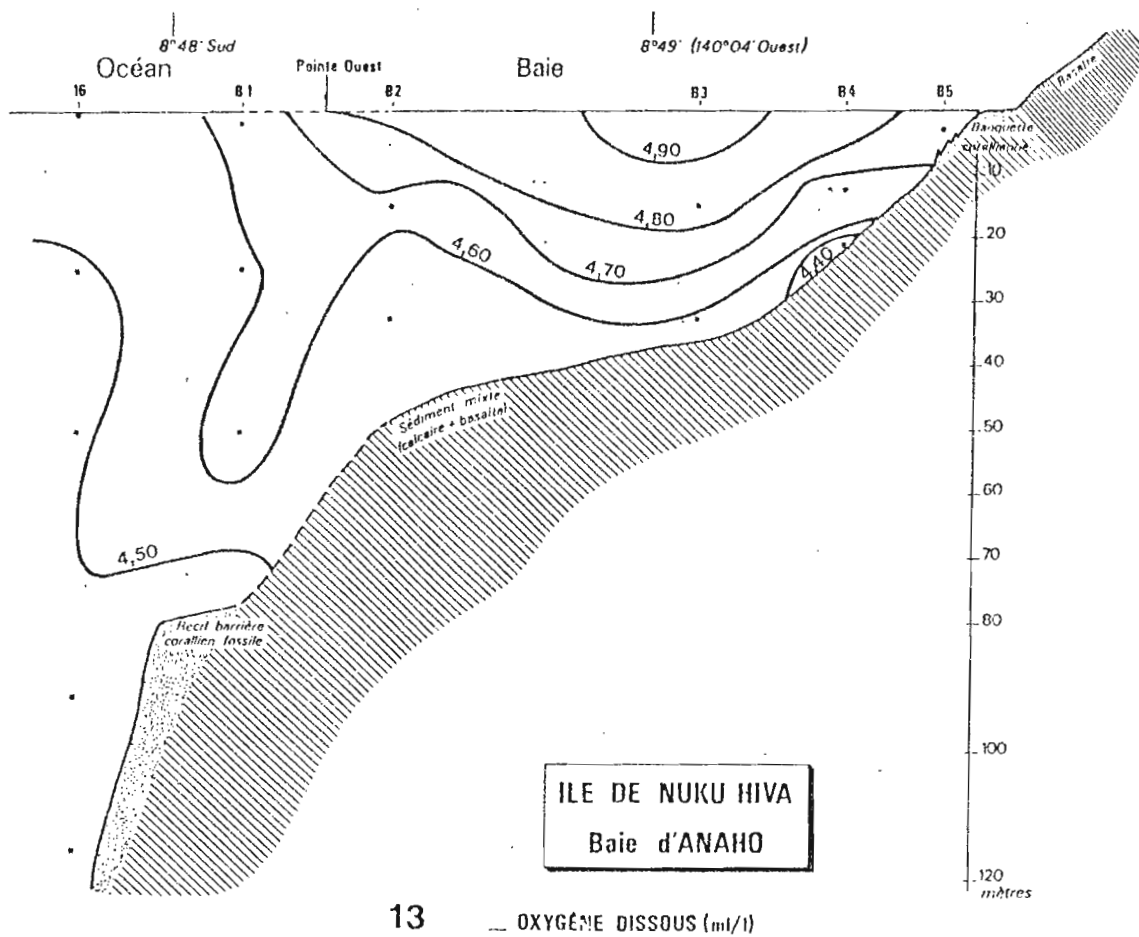
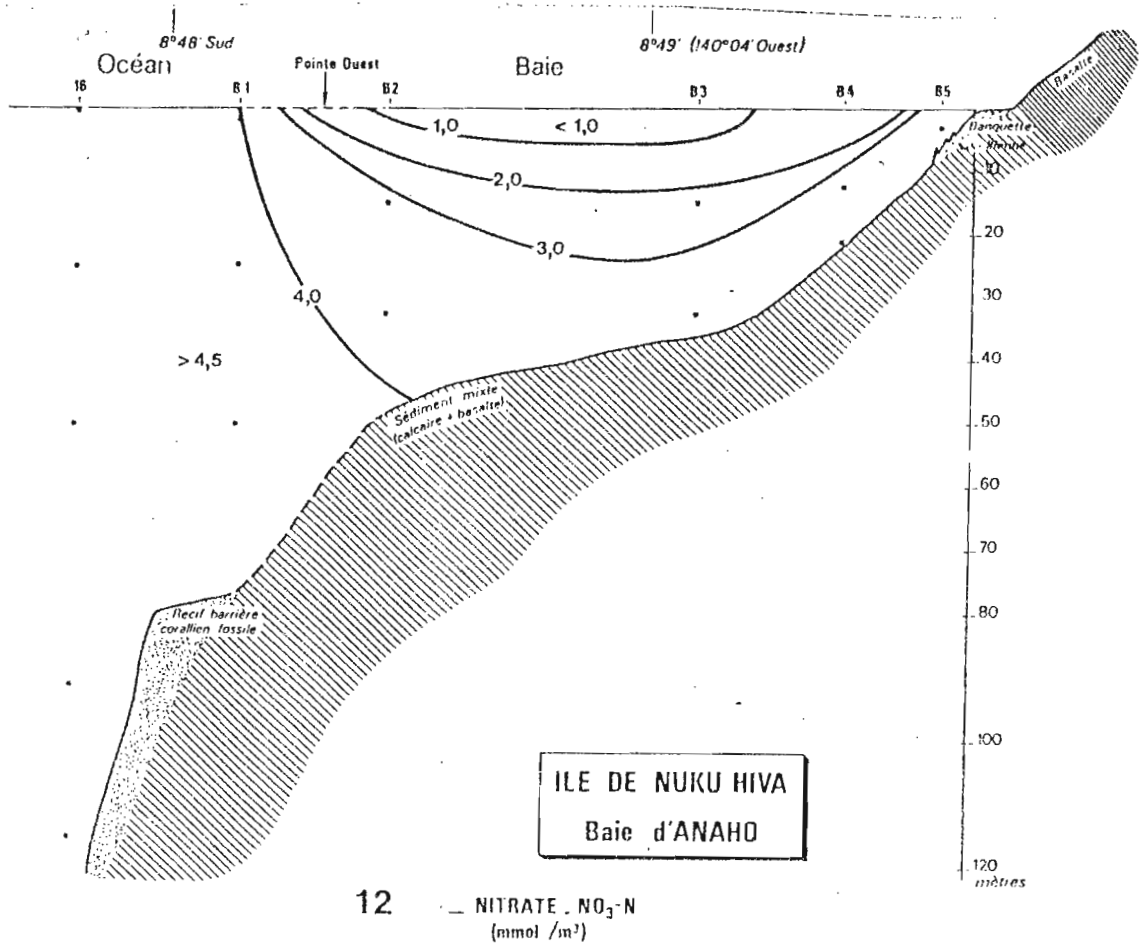


Fig. 12 et 13 : HYDROPOL III. Octobre 1986.
: HYDROPOL III cruise in October 1986.

La distribution spatiale de la silice est plus simple : les teneurs sont faibles dans la zone euphotique puis augmentent rapidement à partir de 200 mètres de profondeur. Le petit enrichissement noté dans le fond des baies est une conséquence de la lixiviation du massif basaltique de l'île, constitué de 40 % de silice.

En Mars 1987 les teneurs en nitrate dissous sont nettement plus faibles qu'au cours des missions précédentes ; l'isoplèthe 1 mmol /m³, habituellement trouvée en surface au niveau du front hydrologique sud marquisien (vers 14-13° Sud) a migré vers le nord et englobe la totalité de l'archipel jusque vers 7° Sud (Fig. 11b). La disparition de l'upwelling équatorial intervenue en Décembre 86 est évidemment à l'origine de cet affaiblissement d'ensemble des teneurs en sels nutritifs dissous.

3°) Oxygène dissous et pH

Les teneurs océaniques en oxygène dissous sont élevées et atteignent une moyenne de $4,6 \pm 0,1$ ml/l dans la couche 0-75 mètres (Fig. 13). Cela correspond à une sursaturation de 110 à 125 %, phénomène qui peut refléter l'importance de la production primaire autotrophe. L'oxygénation est encore plus élevée dans la partie centrale des baies, et aucun minimum relatif n'est noté à proximité du fond, ce qui confirme la vigueur des échanges hydrologiques baies/océan.

Les eaux du large présentent le caractère basique des systèmes tropicaux superficiels avec un pH de l'ordre de $8,25 \pm 0,02$. Ces valeurs se maintiennent aux abords des reliefs émergés et dans la partie interne des baies où le faible débit des rivières n'abaisse que très ponctuellement la valeur du pH (Fig. 14).

Ces données montrent qu'au plan des gaz dissous et de l'équilibre du système du gaz carbonique aucune anomalie n'est décelable dans les baies marquisiennes. Ce point est particulièrement important puisque la saturation en carbonate est un élément très favorable à la précipitation d'aragonite. Ainsi, bien qu'inférieur de 0,1 unité par

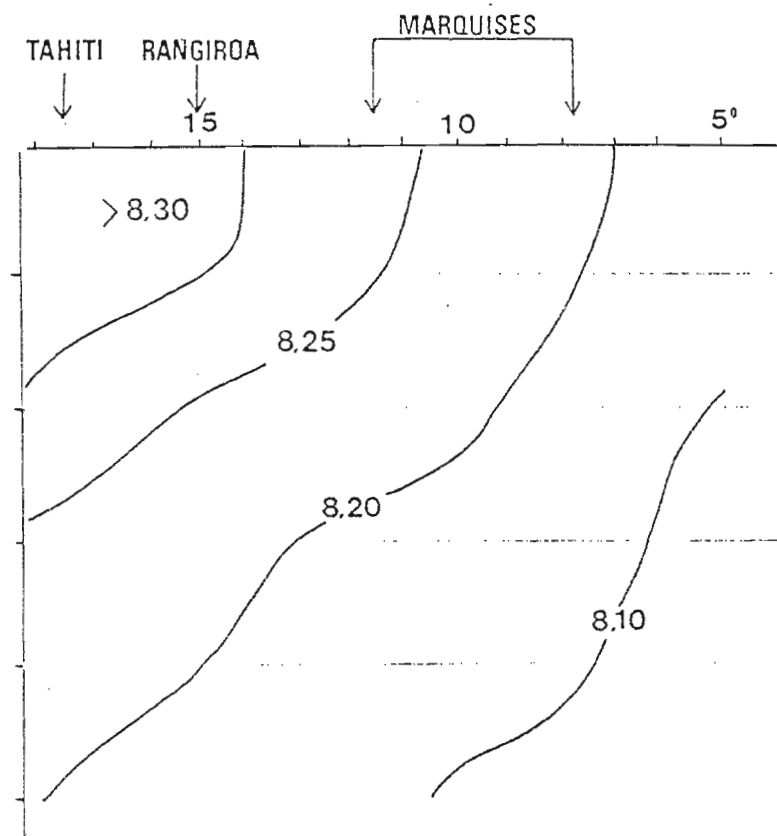


Fig. 14

Distribution du pH océanique jusqu'à 250 mètres. Moyennes des campagnes HYDROPOL I à III.

pH distribution from surface to 250 meters. Average figures from HYDROPOL I, II, III.

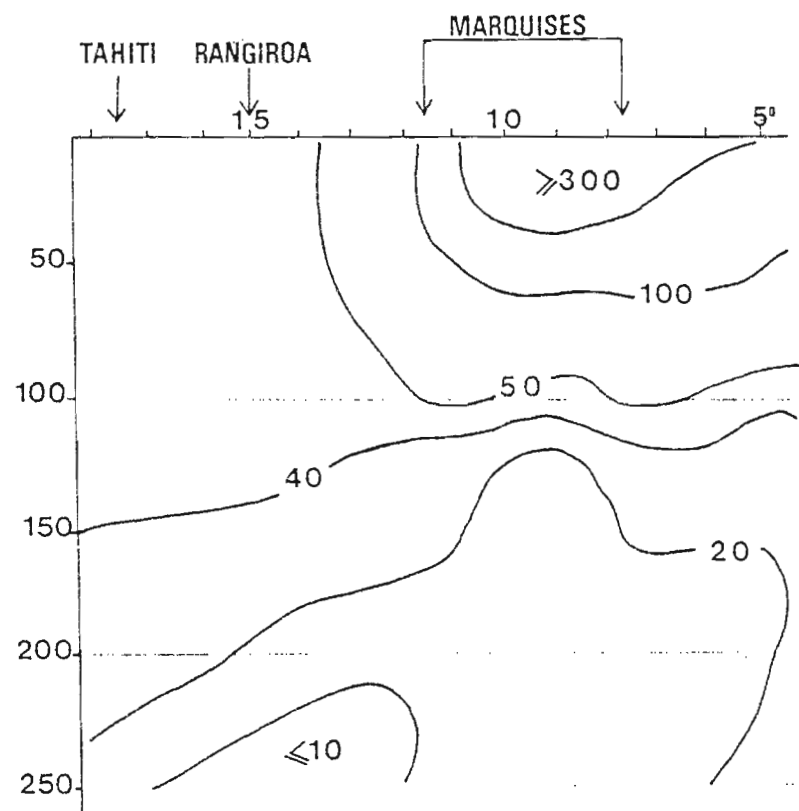
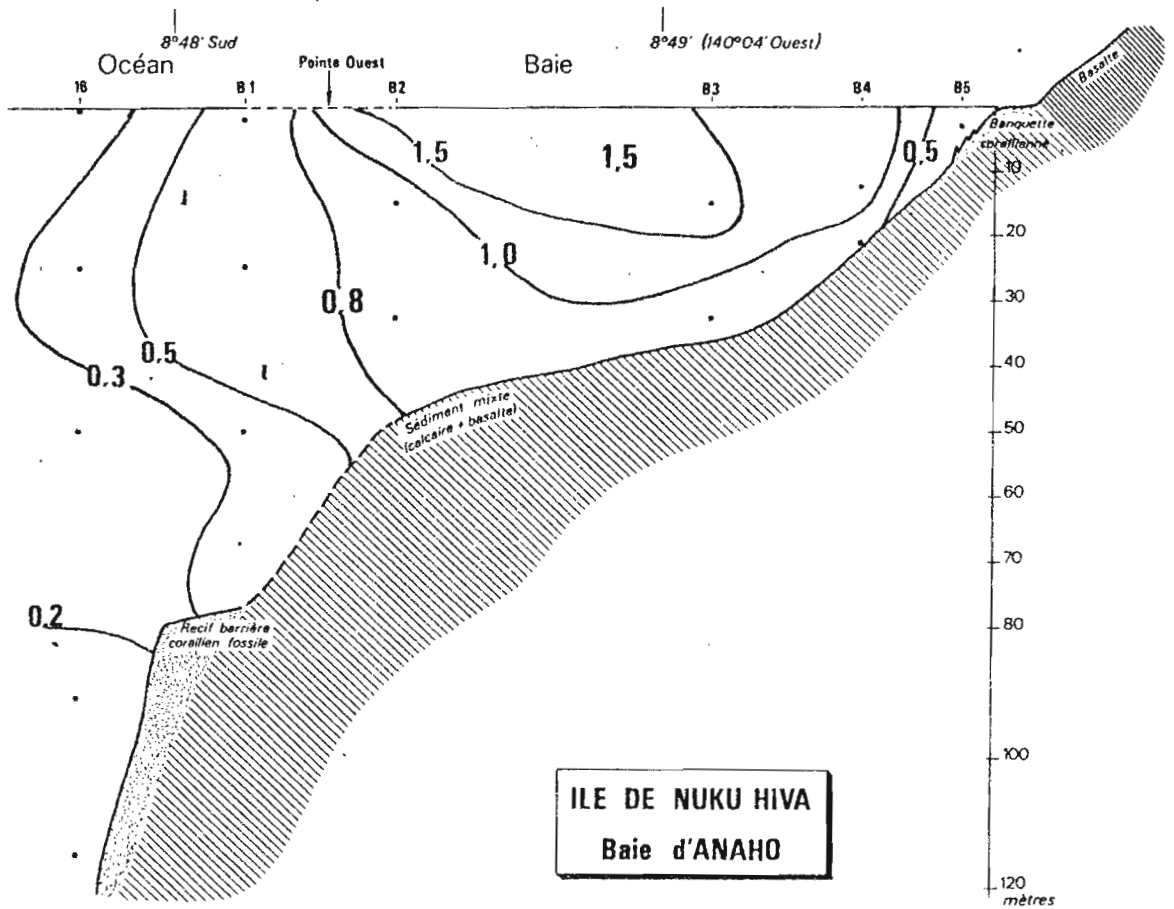


Fig. 15

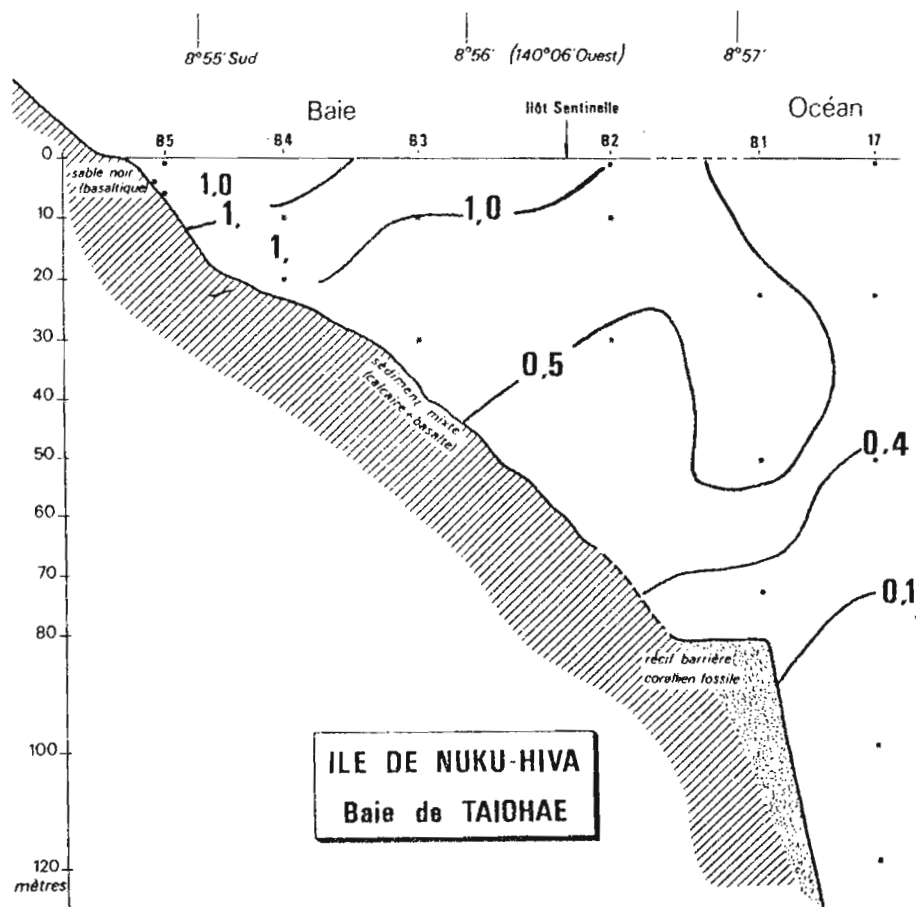
: Charge en particules ou seston total mesuré par transmissomètre optique (mg/m^3). HYDROPOL I.

: Particulate matter (total seston) as given by optical transmissometer in mg/m^3 . HYDROPOL I.



CHLOROPHYLLE a (mg/m³)

fig. 16 a.



CHLOROPHYLLE a (mg / m³)

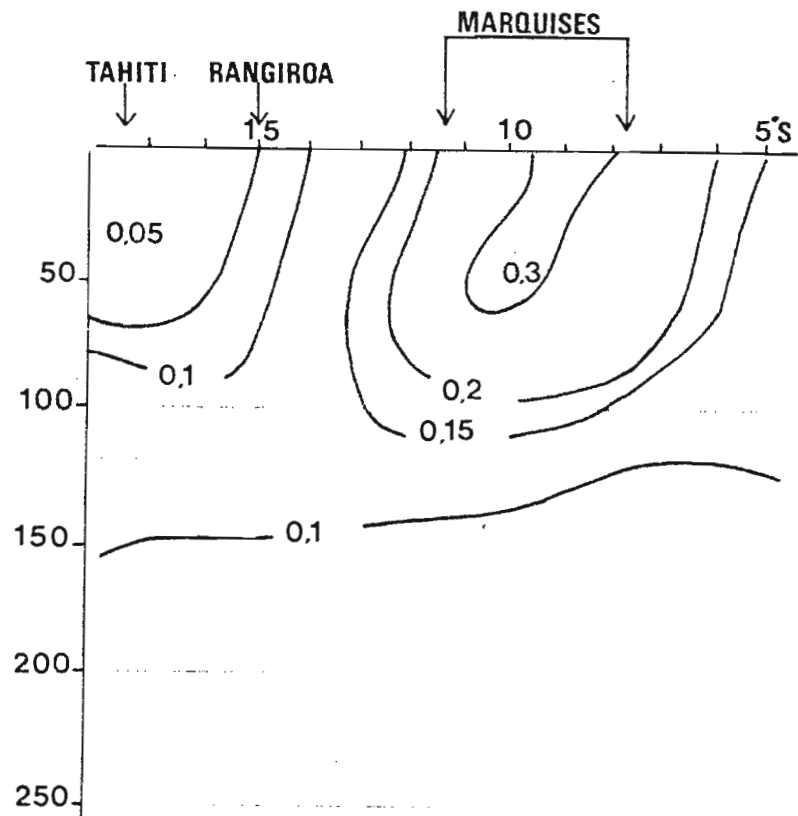
fig. 16 b.

rapport aux eaux situées au sud de 13° Sud, le pH est suffisamment élevé pour que l'alcalinité des eaux reste dans la gamme très propice à la calcification et à la croissance des coraux.

4°) Turbidité et pigments chlorophylliens

Les mesures optiques de la charge en particules ou seston total permettent de quantifier l'importante turbidité des eaux de l'archipel : de moins de 50 mg/m³ au niveau des TUAMOTU (15° Sud) cette charge atteint 300 mg/m³ au large des îles (Fig. 15) et dépasse 1 000 mg/m³ à proximité des baies, là où les eaux sont vertes. La mesure des pigments chlorophylliens est également un bon paramètre de quantification de la flore phytoplanctonique et permet d'apprécier la dynamique de la production primaire. Dans les 2 baies étudiées en 1986, un fort gradient se développe entre le proche large et la partie centrale, où les teneurs en pigments atteignent 1,5 mg/m³, soit 5 fois la valeur océanique autour de l'archipel (Fig. 16). Dans la partie la plus interne et proche des plages, les pigments ont une abondance équivalente à celle du proche large, soit 0,3 mg/m³, ce qui ne veut évidemment pas dire que les espèces présentes soient les mêmes. Les très fortes valeurs en pigments chlorophylliens sont localisées là où les teneurs en nutriments sont les plus basses, (eau superficielle de la station B₃) ce qui confirme l'existence d'une forte cellule de production autotrophe tendant à épuiser localement les éléments azotés, phosphatés, et silicatés. Cette production primaire s'accompagne également d'une émission d'oxygène dissous : la distribution de cet élément montre effectivement une bonne concordance entre les plages riches définies par les isolignes 4,8 ml/l en oxygène et 1,0 mg/m³ en chlorophylle.

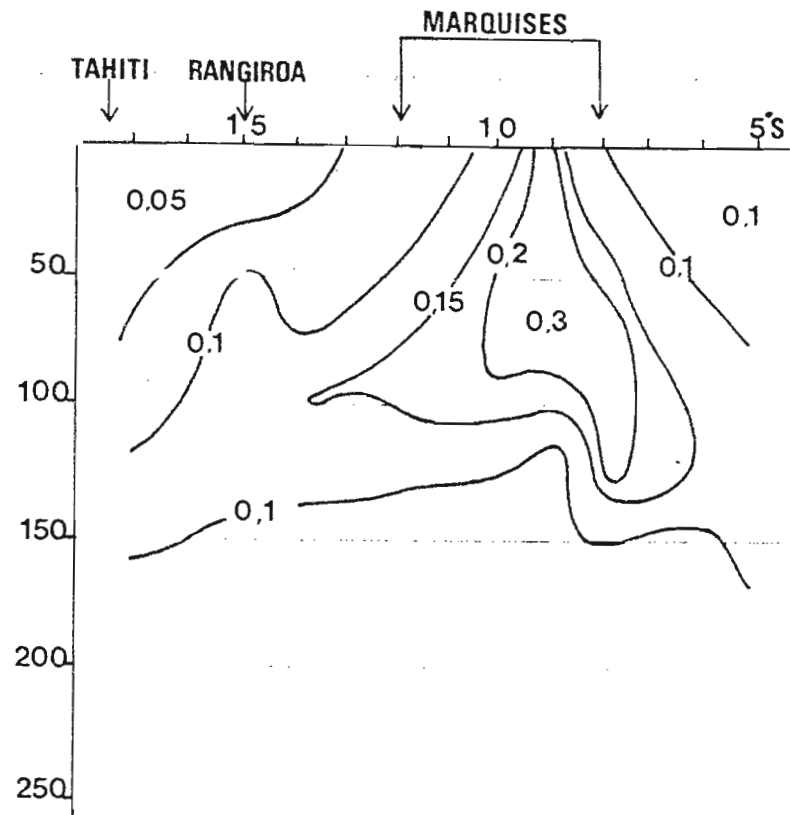
Les figures 17a et 17b rendent compte de la distribution de la chlorophylle-a entre TAHITI et le nord des Marquises : Une plage aux teneurs égales ou supérieures à 0,2 mg/m³ est présente dans l'archipel aussi bien en situation normale qu'en situation ENSO (Mars 1987), ce qui paraît assez paradoxal ; dans ce dernier cas la zone riche est néanmoins plus resserrée et centrée autour des îles hautes. Cette distribution particulière caractéristique d'un effet d'île (DOTY and OGURI, 1956) sera commentée au chapitre IV, 3.



Chlorophyll a (mg/m³)

Fig. 17a

: Distribution moyenne des campagnes HYDROPOL I à III (1985-1986).
 : Average figures from HYDROPOL I, II, III.



Chlorophyll a (mg/m³)

Fig. 17b

: Distribution de la campagne HYDROPOL IV de Mars 1987.
 : HYDROPOL IV distribution (March 1987).

5°) Analyse des résultats Cf. (Tableau I)

Les eaux autour des Marquises sont plus riches en nutriments, en phytoplancton et en particules que celles situées au sud de 13-14° Sud, bande latitudinale qui paraît constituer la limite méridienne atteinte par les eaux upwellées et riches en nutriments de la bordure nord du grand gyre du Pacifique oriental. Toutefois l'augmentation de turbidité autour de ces îles, que traduit la présence d'eaux vertes, même en période ENSO, est un facteur qui pourrait gêner ponctuellement le développement des madrépores constructeurs ; cet handicap est cependant largement contrebalancé par l'importance des réserves nutritives sous les trois formes qui intéressent les colonies coralliennes : nutriments pour la production autotrophe des zooxanthelles symbiontes, matière organique dissoute pour l'assimilation directe osmotique à travers les tissus des polypes, cellules phyto et zooplanctoniques pour l'alimentation hétérotrophe des colonies. Au plan de la charge phytoplanctonique, le fort maximum observé dans les baies est bien corrélé à des minima relatifs en nitrates et phosphates dissous et à une sursaturation en oxygène. Cet ensemble de faits est caractéristique d'une eau ayant une productivité élevée, qui pourrait résulter d'un temps de résidence suffisant à l'intérieur des baies. C'est donc un cas d'eutrophisation classique, en précisant toutefois que la dynamique du système baie-océan reste suffisamment élevée pour éviter toute surcharge organique et/ou nitrée près du fond ou dans les diverticules annexes. L'amplitude du marnage, 1,8 mètre en marée de vive eau, est effectivement un facteur favorisant un transport d'eau périodique entre le plateau externe et les baies. L'action des houles, qui viennent battre directement les flancs volcaniques très pentus, facilite également les mélanges turbulents, la remise en suspension des sédiments et donc l'augmentation de la turbidité et de la charge solide. Au plan du ruissellement, particulièrement faible en saison sèche, il ne peut gêner que de façon très ponctuelle la fixation des coraux. En revanche il contribue à augmenter la richesse en silice dissoute au fond des baies, élément indispensable à certains taxons phytoplanctoniques comme les diatomées. Les eaux océaniques marquisiennes sont ainsi potentiellement favorables à la croissance des madrépores coralliens, ainsi que nous l'avons d'ailleurs constaté de "visu" sur les banquettes coralliennes du fond de la baie d'Aneho ou sur les bancs coralliens du large

(banc CLARK, LAWSON et atoll ennoyé MOTU ONE). Que cette colonisation actuelle plaquée sur le soubassement basaltique, et donc de faible épaisseur, n'aille pas de pair avec l'existence d'un récif barrière affleurant, est donc une énigme qui n'est pas liée aux conditions hydrologiques et physico-chimiques actuelles (Cf. Tableau I).

Cette réponse partielle à la question posée par BROUSSE et al., (1978) et citée en prologue nous emmène toutefois à envisager ce problème sous un autre angle et à partir d'autres faits d'observations concernant la géomorphologie des récifs coralliens en place, vivants ou fossiles.

Tableau I

	BANC THIERS 26°S-146°W	TAHITI 17°30S-150°W	RANGIROA 15°S-148°W	NUKU HIVA 8°S-140°W
Température (°C)	21-25	26-29	26-29	26-30
Salinité (S‰)	35,0-35,8	35,2-36,3	35,5-36,3	35,0-35,8
Nitrate } Phosphate } mmol /m ³ Silicate }	0,1 0,05 0,2	0,1 0,1 0,2	0,1 0,05 0,2	3 ± 1 0,35 ± 0,1 0,6 ± 0,2
Oxygène (ml/l)	5,0	4,7	4,7	4,7 ± 0,2
pH	8,30	8,35	8,30	8,25 ± 0,02
Chlorophylle-a (mg/m ³)	0,05	0,08	0,05	0,25 ± 0,05
Charge particulaire (mg/m ³)	50	50	40	> 300

Couche superficielle 0-75 mètres : caractéristiques des eaux océaniques à proximité de 4 îles possédant des biotopes coralliens (Moyenne des 6 campagnes HYDROPOL et valeurs limites saisonnières pour T et S).

Interprétation

De RANGIROA (15° Sud, TUAMOTU Ouest) au banc THIERS (26° Sud, AUSTRALES) les eaux superficielles sont très fortement oligotrophes : sels nutritifs à la limite de la détection analytique, faible teneur en chlorophylle, très basse charge particulaire. Dans ce grand désert océanique les atolls constituent autant d'oasis dont le fonctionnement est assuré par un endo-upwelling géothermique (ROUGERIE, WAUTHY, 1986). La zone nord marquisienne est au contraire baignée par des eaux plus riches en nutriments amenés par la composante sud du courant équatorial, à partir de la zone d'upwelling équatorial. Il existe toutefois à proximité des îles hautes des Marquises et dans les baies de fortes teneurs en phytoplancton donnant des "eaux vertes" qui ne paraissent pas pouvoir être entretenues par le seul flux des nutriments advectés. Cet effet d'île très spécifique des Marquises est comme l'a montré JONES (1962) centré sur les îles hautes et ne peut être interprété ni en terme de processus dynamique (absence autour de ces îles d'upwelling ou de doming) ni en terme d'apport terrestre (faiblesse, voire absence, de ruissellement et de rivières).

III - LES FORMATIONS RECIFALES

1°) Nature du problème

Par contraste avec les archipels voisins de Polynésie, célèbres pour leurs lagons entourés de récifs barrières affleurants, le faible développement des formations récifales autour des Marquises a attiré l'attention des premiers navigateurs. Par la suite les observateurs scientifiques ont insisté sur la pauvreté de la faune corallienne de ces îles et la faible extension des rares constructions récifales à l'intérieur de quelques baies profondes | Agassiz (1903) - Crossland (1927) - Ranson (1952) |.

En 1972 et en 1973 deux missions du Bâtiment de Contrôle Biologique MARARA ont permis, notamment grâce à des observations en plongée, d'apporter des précisions sur la distribution des coraux de cet archipel (Chevalier (1978)). Si cet auteur confirmait dans leur ensemble les écrits de ses prédécesseurs concernant la faible diversité des coraux et la médiocrité des constructions récifales cantonnées dans quelques baies abritées, il insistait aussi sur le fait que les organismes constructeurs sont présents pratiquement partout, mais en peuplement dispersé, autour des files hautes ; de plus, il décrivait une construction récifale importante, au large, 10 milles dans le N.O. d'EIAO, s'étendant sur plus de dix milles et sous moins de 20 mètres d'eau, attenant à l'îlot de sable MOTU ONE, où l'on peut observer du beach-rock mais pas de roche volcanique affleurante (BROUSSE et al., (1978)).

Dans leur revue des causes possibles du faible développement des formations récifales aux Marquises, ces auteurs ont, à juste titre, récusé la **"subsidence trop rapide, l'absence de plate-forme peu profonde, la turbidité excessive due aux apports terrigènes"** comme facteurs limitants plausibles ; par contre ils ont mis en relief le rôle des facteurs hydrodynamiques provoquant sur les falaises vives des phénomènes **"d'érosion et d'abrasion susceptibles de détruire périodiquement les organismes fixés"** ; cependant, malgré le constat de l'ubiquité des coraux et le contre-exemple éloquent du succès de la construction récifale de MOTU ONE ils ont persisté à accorder considération à la thèse, déjà ancienne (Crossland (1927)) et très en faveur auprès des non-océanographes, selon laquelle **"d'éventuelles remontées d'eaux froides pourraient à certaines époques de l'année, gêner ou empêcher complètement la croissance des organismes récifaux"**.

Aucune observation ne permet en fait d'étayer cette thèse concernant des remontées d'eaux froides ponctuelles ; bien au contraire l'ensemble des mesures effectuées jusqu'en 1975 a établi que la température de la couche océanique de surface autour des îles Marquises est, en moyenne mensuelles, comprise entre 26,7° C et 28,3° C avec des extrema de 25,2° C et 29,4° C. (BROUSSE et al., 1978). Depuis, toutes les mesures, près de la côte, à partir des bateaux marchands, à bord des navires océanographiques

ou par satellites, ont confirmé ces valeurs et l'absence de tout "évènement froid local". (ROUGERIE et al., 1982).

2°) Observations en plongée à partir du "MARARA"

(Octobre 86, Avril et Octobre 87, Avril 88)

a) Les bancs du large

Sous 10 à 20 m d'eau les bancs Lawson, Motu One et Clark se présentent comme des biotopes coralliens caractéristiques ; substrat calcaire irrégulier plus ou moins encroûté, constructions coralliennes à base de Pocillopora et de Porites, algues abondantes (Caulerpa, Halimeda) clairières de toutes tailles où débris et sable blanc sont visibles ; aucune roche basaltique n'est apparente. Une formation corallienne circulaire et très bien calcifiée a été également observée autour du rocher volcanique Thomasset (Motu Nao) qui émerge de quelques mètres. La partie sud-est du banc Motu One est constituée par une caye de sable blanc réduite à marée haute à quelques dizaines de mètres carrés.

b) Les coraux des îles hautes

Lors de chacune de nos plongées autour des îles nous avons trouvé des coraux fixés sur toutes les surfaces dures, en peuplement dispersé :

- à l'extérieur des baies, au pied des falaises, des promontoires et des "sentinelles - témoins" battus par la houle, les coraux sont généralement espacés, de faibles dimensions : Millepora platyphylla domine, mais les formes encroûtantes de Porites lobata abondent ainsi que des petites touffes de Pocillopora elegans ; ils colonisent les parois, puis les éboulis jusqu'au fond vers 20-25 m au pied des falaises où l'on observe le plus souvent un sable détritique calcaire plus ou moins grossier avec de nombreux débris de coquilles.

- à l'intérieur des baies, les formes sont plus épanouies ; dans ces endroits les mieux abrités les colonies sont plus grandes et parfois

massives ; au fond de la baie d'Anaho, dans sa partie ouest abritée par la Pointe de la Mésange, nous avons admiré le beau récif frangeant à base de Pocillopora, de Porites et de Pavona qui a fait sa renommée dans l'île de NUKU HIVA.

Nos conclusions sont les suivantes :

- le milieu océanique-marquisien donne une impression de richesse exceptionnelle pour l'ensemble de la Polynésie : l'abondance des particules en suspension, du phytoplancton (confirmation par les valeurs élevées de chlorophylle-a), du zooplancton et du necton donne à l'eau océanique une couleur vert bouteille qui se maintient jusqu'à plusieurs milles au large.

- on trouve des coraux partout ; ils paraissent en excellente santé, que ce soit autour des îles ou sur les bancs du large.

- on n'observe pas de récifs frangeants autour des îles hautes, à l'exception de quelques banquettes au fond des baies les mieux abritées comme ANAHO.

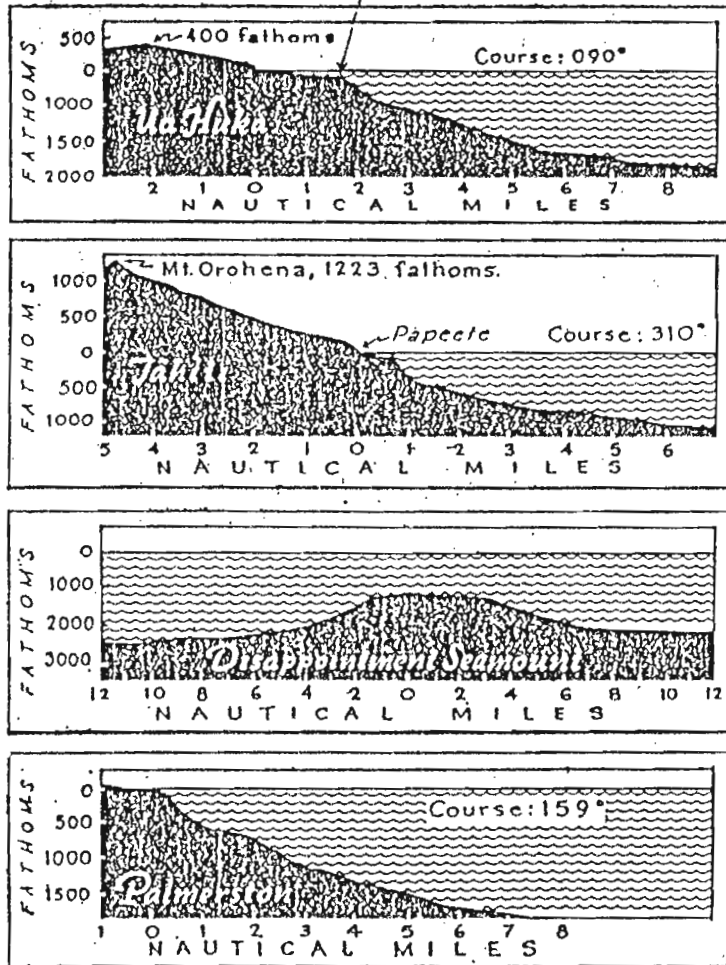
- les bancs du large témoignent d'une capacité de construction récifale bien réelle.

3°) Morphologie littorale

a) La côte

Elle est en général très découpée avec des baies plus ou moins profondes en rapport avec les événements volcaniques constitutifs des différentes îles ; presque partout de hautes falaises entaillées de failles et grignotées par l'érosion marine, plongent dans la mer ; dans la masse des coulées à pente douce, l'érosion marine a façonné cavernes et encombres ; les éboulis et les grottes observés en plongée témoignent également de la puissance d'un hydrodynamisme récent se surimposant à des événements plus anciens : une grotte-boyau à double entrée trouant une des

Plateforme calcaire à 90 m de profondeur



Comparative profiles of two volcanic islands, a seamount, and a coral atoll. A fathom is 6 feet and a nautical mile 6,080 feet.

fig. 18. d'après RAITT (1955).

pointes nord-est de la baie d'ANAHO, par 30 mètres de profondeur, présente en fait toutes les caractéristiques d'un "lava-tube".

b) La plate-forme ennoyée à 90 mètres

Dès 1928 W. DAVIES avait signalé l'existence autour de certaines îles de banquettes sous-marines par 70-90 mètres de profondeur. Dans son livre "Exploring the deep pacific" consacré à l'expédition CAPRICORNE (Septembre 1952 à Février 1953) dirigée par H. REVELLE, Helen RAITT commente ainsi la mise en évidence de cette plate-forme d'après des profils de sonde (Fig. 18) et un dragage : "Mud, Mud, Mud, calcareous sediments, God bless them. So I scrawled in my notebook, in which I've been taking dictation on the Study of Coral Reefs ... It seems that this absence of large coral reefs in the Marquesas has puzzled geologists and biologists for more than one hundred years ... The island shelf around these islands is everywhere more than a mile wide, in places more than two miles. The seismic velocities show a thin layer of sediment but it is a semi-consolidated sediment, which could mean that there might have been a coral reef about this island when the ocean was lower. Then why isn't the coral growing on the Marquesas now ? More facts are needed to solve this puzzle, which two days in this area cannot give ...".

Les données relevées avec le MARARA, écho-sondage et dragages, nous ont permis de redécouvrir en 1986 cette plate-forme immergée par 80-90 mètres de profondeur et de vérifier sa position sur les cartes, malheureusement incomplètes du SHOM. La nature du fond est d'ailleurs précisée pour quelques unes de ces sondes : on trouve 2 fois "fond de corail" autour de l'île TAHATA à 0,75 mille de la côte et 90 m de profondeur (carte 3997).

On observe ainsi autour de chaque île une terrasse sous-marine subhorizontale dont le rebord se trouve sous 80 à 90 m d'eau à 1 ou 2 milles du trait de côte moyen ; cette terrasse se raccorde à la côte par des pentes faibles plus ou moins régulières jusqu'au pied des falaises alors que vers le large elle se termine par un escarpement très raide comme en témoignent les valeurs très différentes encadrant l'isobathe 100 m

dans les lignes de sondes de l'hydrographie : 88 m et 500 m pour 900 m de distance horizontale dans le NE de UA POU (carte 5989) ; 89 m - 475 m / 1.500 m dans le N de UA HUKA (carte 5989) ; 73 m - 329 m / 1.200 m dans l'E du cap Martin et 77 m - 325 m / 1.000 m dans le N du cap Atupa à NUKU HIVA (carte 3931) ; 94 m - 563 m / 1.000 m dans l'O de TAHUATA (carte 3997) ; 86 m - 640 m / 1.200 m dans le N et 81 m - 731 / 1.200 m dans l'O de FATU HIVA (carte 5991) ; ces valeurs de sonde donnent des dénivelées atteignant 500 m pour 1.000 m en distance horizontale soit une pente de 50 % ou encore de 30 degrés.

c) Les tombants externes

Le sondeur du MARARA nous a permis de préciser la morphologie du rebord de la terrasse et de la pente qui lui fait suite vers le large ; nous présentons les profils du fond à la sortie des baies de Hatiheu, d'Anaho et de Taichae dans l'île de NUKU HIVA (Fig. 19) où les distances verticales sont exagérées 23 fois ; la pente faible et plus ou moins régulière mène du fond des baies au rebord quasi-horizontale de la terrasse située vers 80-90 m de profondeur. La pente vers le large augmente alors brutalement et atteint 50 % (soit 30°) ; ces profils sont à rapprocher de celui de la pointe Teoho ote Papa à UA HUKA (BROUSSE et al., 1978) ; ce type de profil a été observé à l'approche de toutes les îles de l'archipel visitées par le MARARA ; ces profils sont en fait semblables à ceux que l'on obtient en arrivant sur les atolls des TUAMOTU.

D'autres investigations faites en 1987 et 1988 avec le MARARA permettent maintenant d'affirmer que la présence de la plate-forme immergée par 90 mètres est une caractéristique commune à l'ensemble des douze îles hautes de l'archipel des Marquises.

Des dragages ont été réalisés dans le nord et le sud de NUKU HIVA en utilisant une benne à roche à treillis métallique et le treuil pélagique (câble de 12 mm). Ces dragages ont concerné le haut de la pente externe (200 m de profondeur) avec récupération, après passage sur la plate-forme, dans l'ancien "lagon" par 80 mètres de profondeur. Tout le matériel récupéré est carbonaté mais très encrassé de particules et débris

coralliens détritiques. Quelques petits blocs présentant des cloisonnements et criblage caractéristiques des coraux ont également été ramenés et envoyés au laboratoire de GYF Sur Yvette pour datation. Les résultats de ces datations donnent 3.000 ans au plus mais sont biaisés par l'abondance des particules qui au fil des ans ont encrassé les squelettes calcaires détritiques. Le récif ennoyé est donc progressivement recouvert par un linceul blanc dû à l'intense sédimentation terrigène et organogène et seul des carottages pénétrant sur plusieurs mètres la structure calcaire pourraient permettre d'effectuer des datations avec des résultats significatifs.

Ainsi : - cette plate-forme est carbonatée, à la fois dans sa partie horizontale et sur la partie haute du tombant externe, entre 90 mètres et 200 mètres de profondeur au moins ;

- ce tombant présente des caractéristiques topologiques analogues à celles d'un tombant de récif barrière ou d'atoll (pente constante autour de 30 % d'angle).

4°) Vie et mort d'un récif barrière

Les résultats de nos mesures hydrologiques ont montré que l'eau océanique autour des Marquises semblait parfaitement favorable à l'activité des coraux ; nos observations ont confirmé que des coraux hermatypiques étaient présents partout et tout à fait capables de construction récifale, modeste au fond de quelques baies abritées mais importante sur les bancs du large.

a) Enoncé du problème

- Pourquoi l'activité des coraux hermatypiques, omniprésents aux Marquises, n'a-t-elle pas pour résultat la construction d'un récif barrière à proximité des côtes actuelles des îles hautes de cet archipel ?

- Cette situation a-t-elle toujours existé alors que l'âge des îles Marquises s'étale de 7 millions à 1,5 millions d'années (1 à 2 millions d'années pour TAHITI et MOOREA).

- Quelle est la signification écologique et géomorphologique de la plate-forme carbonatée située par 90 mètres de fond ?

Rappelons tout d'abord qu'à la fin de la dernière glaciation, il y a 18.000 ans, le niveau océanique mondial était à une centaine de mètres au-dessous du niveau actuel.

Il en résulte que la plate-forme carbonatée était alors affleurante en surface et constituait à l'évidence un récif barrière corallien, similaire à ceux qui existent aujourd'hui autour des îles hautes des autres archipels de Polynésie.

En effet, contrairement à BROUSSE et al., (1978) qui estimait que ces terrasses ne supportent aucune construction zoogène, nous identifions leurs rebords externes comme une pente récifale fossile en nous appuyant sur la morphologie de cette pente et sur la nature du sédiment du rebord : une telle pente ne peut être obtenue ni par des coulées de lave lors de la formation des îles volcaniques ni par des profils d'équilibre de dépôts des matériels d'érosion ; de plus la constance de ses critères d'identification indique qu'elle ne peut résulter que d'une bioconstruction homogène dans sa dynamique (FAGERSTROM (1987)). Les débris carbonatés détritiques dragués avec le MARARA confirment par ailleurs le caractère organogène de cette structure.

On peut donc raisonnablement avancer que lorsque la déglaciation s'est produite et que des quantités considérables d'eau froide de fusion ont été cumulativement déversées dans l'océan, son niveau s'est élevé très vite (1 cm/an entre - 18.000 et - 10.000 ans) et la biocénose constructrice du récif des Marquises n'a apparemment pas suivi ; vite submergé le récif n'a plus rempli son rôle d'absorbeur et de dissipateur de l'énergie des houles, et la mer a alors attaqué les côtes privées de cette défense naturelle ; l'érosion marine a été brutale et très efficace : les produits d'érosion ont comblé le lagon situé derrière l'ancien récif barrière et se sont accumulés ensuite entre ce dernier et la côte ; les baies ont été envahies et en partie comblées.

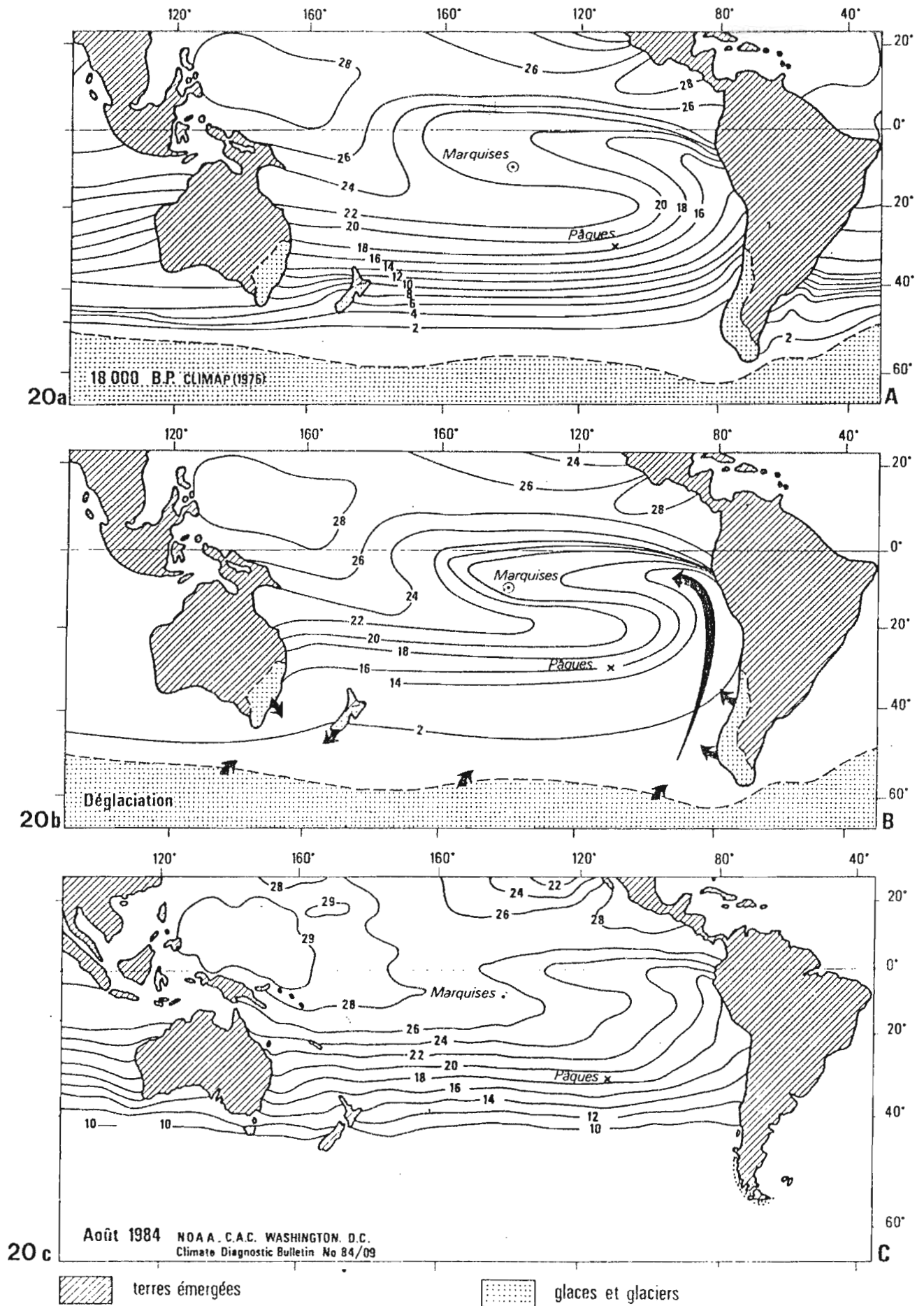


Fig. 20 : Isothermes de surface dans le Pacifique : Surface isotherm in Pacific Ocean.
 20a : pendant la quaternaire 20a : during quaternary period
 20b : en début de déglaciation 20b : in beginning of deglaciation
 20c : de nos jours 20c : to day

Résultant directement de l'action de la houle, érosion et abrasion sont encore assez importantes de nos jours pour freiner la croissance des organismes fixés et les détruire périodiquement (BROUSSE et al., 1978) bien que le réchauffement des eaux ait depuis longtemps (8.000 ans au moins) permis le rétablissement des espèces constructrices. Nous pensons donc que c'est l'action des forces hydrodynamiques de l'océan sur le stade actuel de la ligne de côte qui interdit encore les constructions récifales côtières durables autour des îles hautes des Marquises et que des stades ultérieurs de recul des falaises et de remaniement des produits d'érosion pourront, à terme, autoriser le rétablissement d'un récif frangeant, pouvant ensuite évoluer en récif barrière du fait de la subsidence continue de ces îles.

Il reste à expliquer pourquoi la biocénose constructrice n'a pas réussi, autour de cet archipel, à suivre la montée du niveau océanique il y a quelques 18.000 ans, au début de la déglaciation provoquée par un réchauffement global du climat de la planète.

b) Mort d'un récif barrière

Nous présentons un extrait simplifié (Fig. 20) d'une carte publiée en 1976 par les membres du "**CLIMAP Project**", donnant la répartition des températures de surface de l'océan, en Août, il y a 18.000 ans, alors que le niveau était à 90 mètres plus bas que sa côte actuelle ; on peut voir sur cette carte :

1/ Que la calotte glaciaire antarctique était très développée et que les glaces occupaient l'océan au sud de 50° S ; que les glaciers recouvraient le sud du continent sud-américain et atteignaient l'océan jusqu'à 40° S sur sa façade occidentale (CHILI) (Fig. 20a).

2/ Que par rapport au champ thermique océanique actuel (Fig. 20c), la partie orientale du grand gyre du Pacifique Sud (courant de Humboldt) était en conséquence plus froide de 4 à 6° C ; l'isotherme 20° C atteignait les

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

3/ Que les températures du Pacifique intertropical dans ses parties occidentales et centrales étaient assez peu différentes de celles observées aujourd'hui, ce qui rend compte du fait que, globalement, l'écart n'ait été que de $- 2,3^{\circ}$ C en moyenne.

Les conditions thermiques il y a 18.000 ans aux Marquises étaient donc compatibles avec l'existence d'un récif barrière d'origine corallienne autour des îles, situation analogue à celle que l'on rencontre aux Gambier (135° W - 23° S) de nos jours. **Mais, de façon paradoxale, la phase initiale de déglaciation provoquée par le réchauffement global du climat a entraîné un refroidissement notable de la partie orientale du gyre océanique centré sur l'île de Pâques (Fig. 20b).**

En effet, l'injection dans le courant de Humbolt des eaux glacées de fusion de la calotte antarctique et des glaciers chiliens a produit un brutal abaissement de la température de la couche de surface ; cet "langue froide" s'étirant ensuite vers l'ouest en bordure sud du Courant Equatorial a atteint rapidement les Marquises où étant donné les conditions thermiques préexistantes, un refroidissement de quelques degrés a été suffisant pour tuer les coraux constructeurs. Ainsi les récifs barrières entourant les îles Marquises ont dû être vicitimes il y a 18.000 ans d'un choc thermique létal, dû à un brutal abaissement au-dessous de 18° C de la température océanique superficielle de l'archipel.

Etant situés au sud de 14° Sud, les atolls des TUAMOTU n'ont pas été touchés par cette advection froide et leurs madrépores ont pu compenser sans problème la rapide montée du niveau océanique qui a atteint 1 cm/an dans la période - 18.000 a - 12.000 ans.

Notre thèse d'un refroidissement localisé dans la partie orientale du gyre du Pacifique Sud et dans son extension vers les Marquises est étayée par certains résultats de paléoclimatologie ; ainsi pour la

période 18.000 \pm 2.000 ans B.P. les observations des microfossiles planctoniques du sédiment du fond de l'océan ont montré que dans le Pacifique équatorial oriental les températures de surface déterminées à partir des coccolithes étaient significativement plus basses que celles déterminées à partir des radiolaires et des foraminifères (CLIMAP - 1976) ; ceci cadre bien avec le fait qu'une advection d'eau froide dessalée se maintenant en surface puisse avoir plus d'effet sur le phytoplancton (coccolithophorides) que sur le zooplancton plus profond (radiolaires et foraminifères) ; ainsi une étude récente de palynologie sur l'île de Pâques (FLENLEY and KING, 1984) a établi que vers la période 12.000 ans B.P. le climat dans cette région océanique avait pu être encore plus froid que ne l'indique la carte CLIMAP.

IV - PERSISTANCE DE L'ENDO-UPWELLING AU SEIN DU RECIF-BARRIERE ENNOYE ET EFFET D'ILE

1°) Le processus d'endo-upwelling géothermique

Ce concept "d'endo-upwelling géothermique" dans le fonctionnement des atolls-oasis et des récifs barrières tropicaux a été présenté pour la première fois en 1985 lors du 5ème Congrès sur les récifs coralliens de TAHITI. Ce concept a été ensuite exposé en détail en 1986 par ROUGERIE et WAUTHY et ses implications essentielles décrites dans un document synthétique fourni pour publication en 1988, à l'occasion du 6ème Congrès sur les Récifs Coralliens (TOWNSVILLE). On se bornera ici à rappeler qu'un "endo-upwelling géothermique" est un processus de remontée d'eau océanique profonde à travers un socle poreux sous l'action du flux géothermique local du soubassement qui joue ainsi le rôle de "plaque chaude". Les eaux endo-upwellées ressortent lentement (ou sourdent) dans les parties hautes les moins colmatées des structures récifales et donc essentiellement au niveau de la couronne externe battue par les houles, et leur importante charge en sels nutritifs dissous permet la très forte production - calcification de l'écosystème corallien en assurant aux algues zooxanthelles symbiotes un apport constant en nutriments dissous.

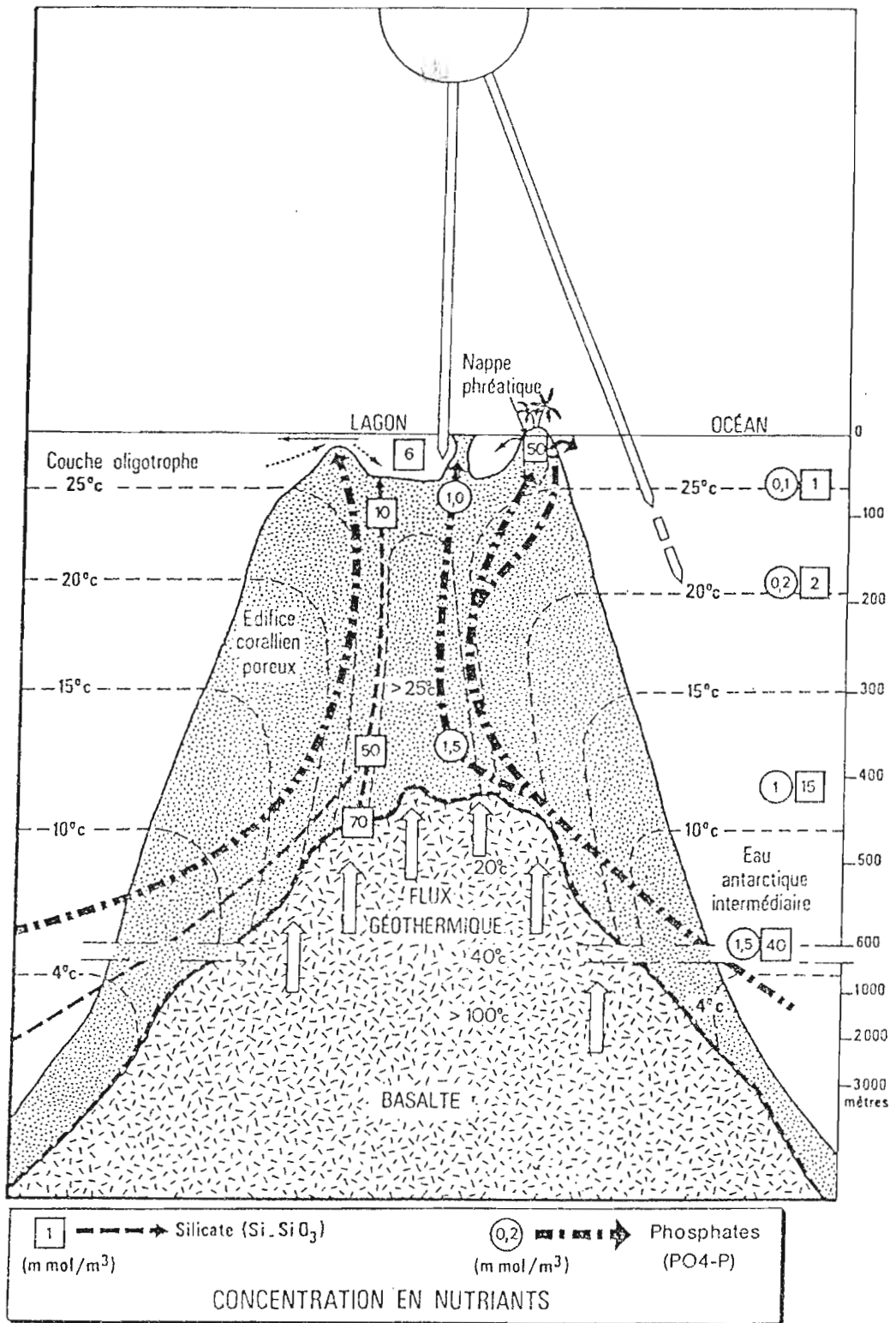


Fig. 21 : Fonctionnement d'un écosystème récifal par endo-upwelling géothermique (schéma de principe).

: Barrier-reef functioning following geothermal endo-upwelling process. (ROUGERIE - WAUTHY, 1986)

Trois conditions sont donc nécessaires pour entretenir ce processus d'endo-upwelling (Fig. 21) :

- un milieu perméable
- un flux géothermique
- un océan profond contigu pouvant fournir les nutriments

De plus l'imperméabilité des flancs de la pente externe, due à leur couverture sédimentaire relativement bien cimentée permet à la cellule de convection interne de ne déboucher que dans la zone haute balayée par les houles où le biotope reçoit un flux lumineux optimal.

2°) Fonctionnement passé et présent du récif barrière ennoyé

L'existence autour des Marquises jusqu'à - 18.000 ans d'un récif barrière annulaire affleurant implique pour nous que son fonctionnement ait été assuré par ce processus d'endo-upwelling permettant aux zooxanthelles symbiotes d'être irriguées par les nutriments neufs amenés par les eaux endo-upwellées. 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 puisque les trois conditions nécessaires continuaient à être réunies. Toutefois les nutriments débouchant au niveau du récif barrière mort (et donc réduit à l'état de "squelette carbonaté") et ne pouvant plus être consommés par des zooxanthelles, étaient alors susceptibles d'être utilisés pour la croissance du phytoplancton ; cet apport lent mais continu en nutriments neufs pouvait donc accroître de façon significative la productivité des eaux sus-jacentes ; c'est ce processus que nous invoquons pour rendre compte de la présence "d'eaux vertes" autour de ces îles. Il y a donc eu, au point de vue écologique, un transfert trophique brutal d'une biocénose benthique corallienne au bénéfice d'une biocénose pélagique, mais sans modification du facteur essentiel de contrôle de la production primaire, constitué par le flux d'eau endo-upwellée. Il n'y a pas au point de vue énergétique, d'incompatibilité quantitative à la réussite de ce transfert : rappelons que des eaux endo-upwellées, originaires des niveaux 500 m ou plus (Eau Antarctique Intermédiaire), peuvent déboucher au niveau réci-

faI avec des teneurs en phosphate et nitrate minéral dissous de respectivement 1 et 10 mmole/m³. Ces concentrations sont égales voire supérieures à celles mesurées dans les upwellings océaniques les plus vigoureux.

Bien que les flux endo-upwellés puissent être localement modulés par les paramètres physiques du socle poreux et les caractéristiques du réseau de méga-porosité intra-récifal, on admet que dans un récif en bon état, la calcification peut atteindre 2 à 10 kg de calcium fixé par m²/an et la production primaire 1,4 à 4,4 kg de carbone fixé par m²/an. Transposés en équivalents de nitrates et de phosphates synthétisés en glucides par le phytoplancton océanique, ces chiffres peuvent parfaitement rendre compte des valeurs exceptionnellement fortes de chlorophylle mesurées autour de ces îles depuis le fond des baies jusqu'au proche large (paragraphe I, 4). Ces eaux vertes recevant un apport constant de nutriments neufs à la base de la couche euphotique (90 mètres) peuvent à leur tour entretenir de fortes populations zooplanctoniques comme l'avait noté Jones (1962). Cet auteur avait insisté sur le fait que le degré d'abondance des copépodes diminuait toujours depuis le pourtour des îles en direction du large et ce quelle que soit la direction nord ou sud de la radiale étudiée.

3°) Endo-upwelling et effet d'île

Cette dernière remarque permet de rappeler que l'archipel des Marquises peut bénéficier d'un reliquat de l'upwelling présent en zone équatoriale, 1.000 kilomètres plus au nord. Toutefois ce processus d'enrichissement devrait essentiellement intéresser la zone nord des Marquises (8° Sud) plus proche de la source que la zone sud (12° Sud). De plus cet upwelling équatorial n'est pas permanent : dépendant de la force des vents alizés il faiblit avec ceux-ci et peut disparaître si les vents tournent à l'ouest : c'est ce qui s'est passé en 1982 lorsque l'apparition d'une anomalie hydroclimatique ENSO de très forte amplitude s'est traduite par la disparition totale de l'upwelling équatorial de Juillet 1982 à Mai 1983. Les eaux équatoriales sont alors devenues aussi chaudes et dépourvues de nutriments puis de plancton que les eaux oligotrophes situées au sud de la latitude 14° Sud.

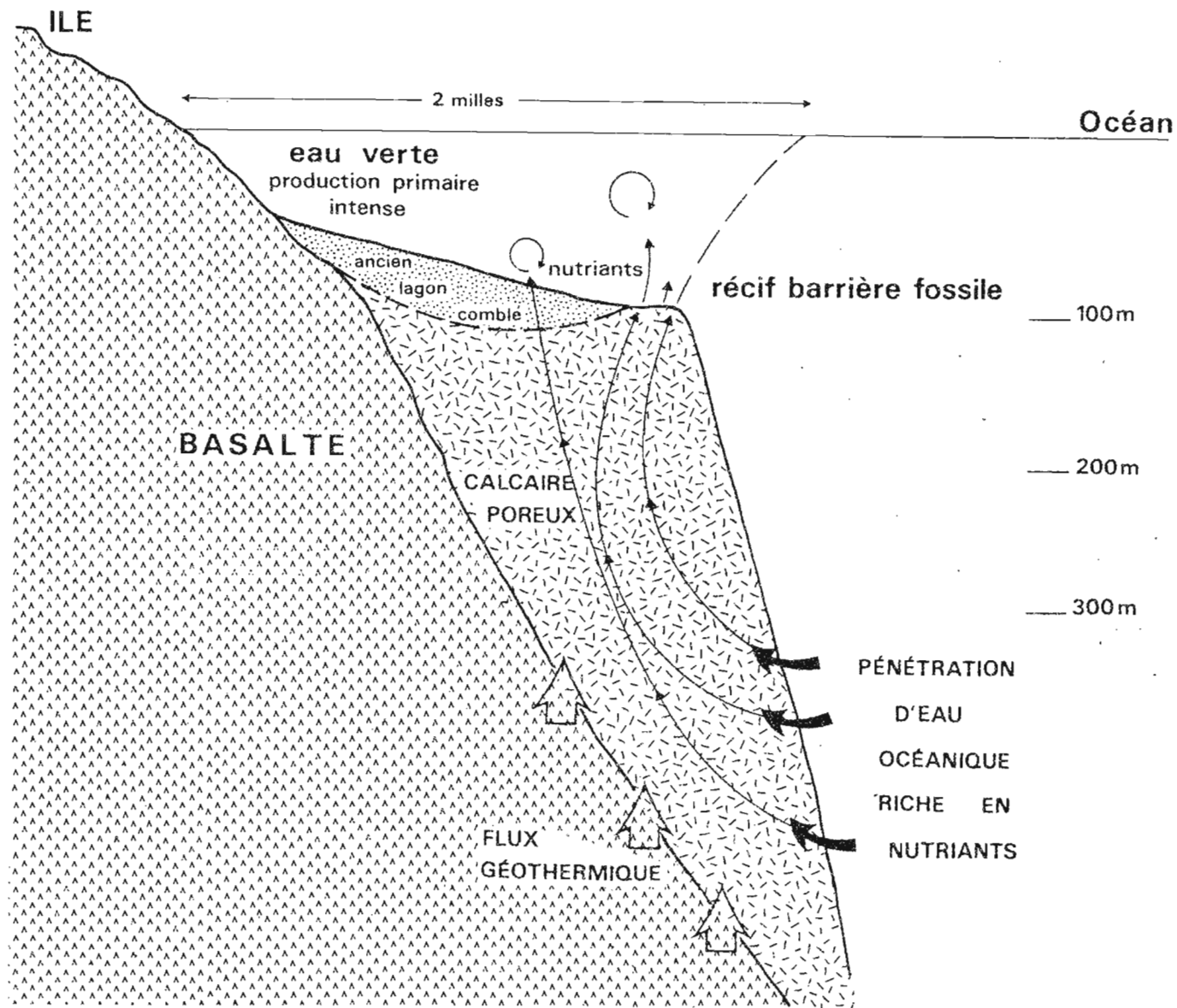
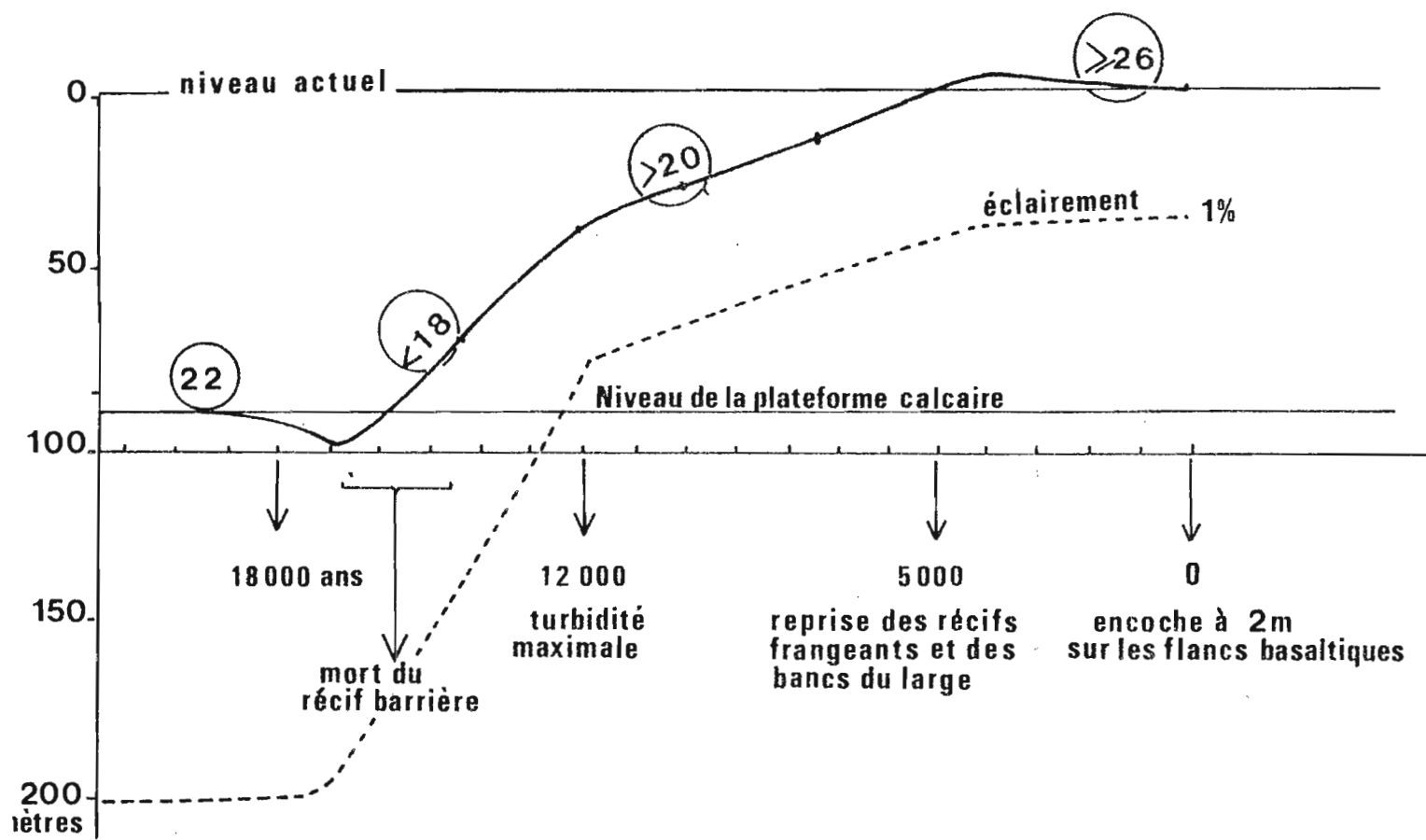
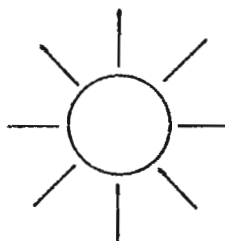


Fig. 22 : Effet d'île autour des îles Marquises. Arrivée de nutriments exogènes dans la couche euphotique océanique par processus d'endo-upwelling géothermique au sein de l'ancien récif barrière ennoyé.

: Island mass effect around Marquesas : Seepage of endo-upwelled nutrients at top of the drowned barrier-reef sustain permanent blooming of oceanic plankton.

On a vu qu'au premier semestre 1987 un évènement ENSO de moyenne amplitude avec disparition de l'upwelling équatorial pendant plusieurs mois s'était traduit par l'abaissement notable des teneurs en nutriments dissous (Fig. 11b). Toutefois, il est très significatif que les teneurs en chlorophylle mesurées à proximité des îles hautes, n'aient pas faibli corrélativement (Fig. 17b). La seule interprétation logique de ce paradoxe apparent est que l'influence des eaux upwellées équatoriales soit seulement un facteur secondaire de contrôle des eaux vertes autour de ces îles, le facteur essentiel étant l'apport par les eaux endo-upwellées locales : cet "effet d'île (GILMARTIN et al., 1974)" serait donc, pour l'essentiel, une conséquence du maintien d'un endo-upwelling au sein du socle calcaire, plaqué sur les anciens pitons basaltiques volcaniques (Fig. 22).

Bien qu'il soit possible qu'une certaine accumulation de sédiments et de particules planctoniques tende à encrasser le haut de la plate-forme calcaire et à obturer partiellement le réseau poreux de sortie des eaux endo-upwellées, ce processus doit néanmoins pouvoir se maintenir grâce aux propriétés intrinsèques des eaux concernées : du fait de leur origine profonde les eaux endo-upwellées ont un pH plus faible que les eaux de surface et possèdent ainsi un certain pouvoir de dissolution des carbonates, leur permettant de maintenir ouvert leur réseau interne de circulation. Ainsi à la latitude 10° Sud des eaux océaniques pénétrant la structure calcaire à 1.000 m de profondeur ont un pH = 7,7 et un CO₂ total = 2,4 mmol /l alors que les valeurs pour la couche de surface sont : pH = 8,3 et CO₂ total = 2,0 mmol /l. Ces chiffres expriment le fait que les eaux profondes deviennent, à partir de 1.000 m, sous-saturées en calcite |(mais pas en magnésite, ce qui peut conduire à une évolution diagénétique de la structure calcaire interne vers une dolomite (AHARON et al., 1987))|. Ce pouvoir chimique de dissolution des eaux endo-upwellées peut d'ailleurs être renforcé par un déplacement des équilibres ioniques au cours de la remontée de ces eaux subissant réchauffement et baisse de pression : ces dissolutions spécifiques peuvent constituer un facteur d'entretien du réseau mini cavitaire et poreux par où transitent et sourdent les eaux endo-upwellées.



Températures océaniques de surface dans l'archipel des Marquises (estimation d'après les données CLIMAP - 1976).

----- Limite des 1% d'énergie lumineuse autour des îles hautes (couche euphotique)

Fig. 23 : Evolution du niveau océanique dans le Pacifique Central (d'après GUILCHER, 1988) et impact présumé sur les récifs barrières des îles hautes.

: Sea level variations in Central Pacific (from GUILCHER, 1988) and alleged impact on barrier-reef surrounding high islands.

4°) Recolonisations et réhabilitations de l'écosystème corallien

L'archipel des Marquises constitue ainsi un cas très spécifique où l'histoire des peuplements coralliens a été directement tributaire des variations climatiques à grande échelle. Essayons maintenant de confronter la situation actuelle des biotopes coralliens en place et notre scénario d'évolution depuis 18.000 ans.

Trois cas sont discernables :

a) Les récifs barrières ennoyés

Alors qu'ils étaient restés prospères pendant la dernière glaciation ils ont été progressivement recouverts par une couche d'eau atteignant, (Fig. 23) en fin de déglaciation (vers - 6.000 ans) une épaisseur d'une centaine de mètres. L'épaisseur de cette couche est déjà suffisante pour s'opposer à une reprise des colonies coralliennes par manque d'énergie lumineuse. Ce facteur a été d'autant plus limitant que le maintien des endo-upwellings, et la mise en suspension des particules terrigènes ont contribué à l'apparition d'eaux vertes très turbides réduisant fortement la pénétration lumineuse. Nos plongées nous ont permis d'évaluer "de visu" l'impact de cette turbidité sur la distribution verticale des coraux en place : on ne trouve plus de coraux sur les flancs des baies ou des éperons rocheux au-delà d'une trentaine de mètres de profondeur, niveau où l'éclairement devient inférieur à 10 % de ce qu'il est en surface d'après la cellule de notre camera video. Aux TUAMOTU les eaux très limpides permettent aux colonies coralliennes de subsister jusque vers 80 m de profondeur.

L'ancien récif barrière recouvert de 90 mètres d'eaux vertes et turbides est donc condamné à rester en l'état à moins qu'une régression marine d'au moins cinquante mètres ne puisse le replacer dans la couche éclairée et le rende apte à servir à nouveau de support pour le développement de larves coralliennes.

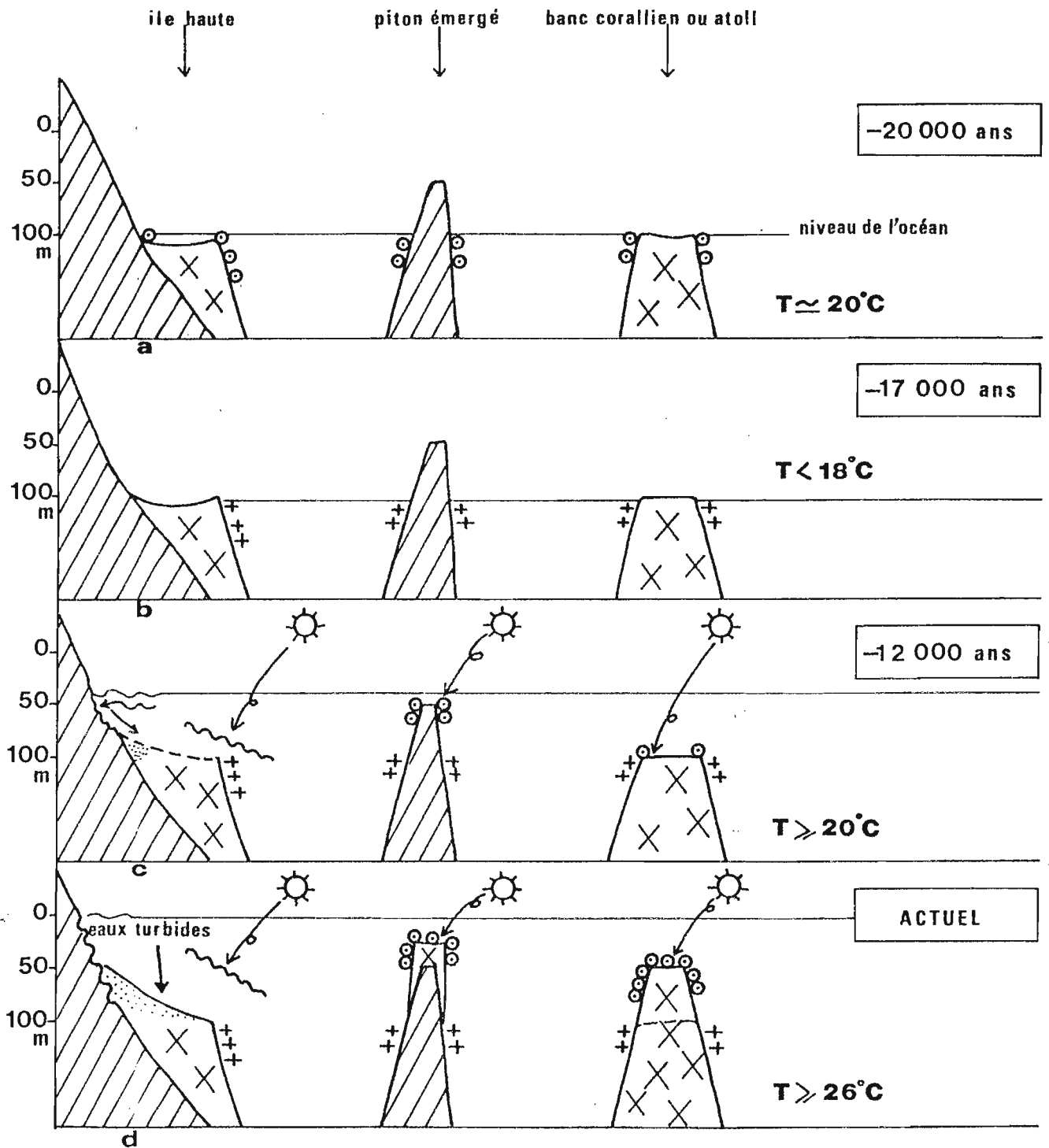


Fig. 24

- X socle calcaire
- ⊙⊙ récif vivant
- / / basalte
- . . . sédiments
- + + récif mort

: Séquence d'évolution des biotopes coralliens aux Marquises depuis 20.000 ans.

a) pendant la dernière glaciation

b) en début de déglaciation

c) en fin de déglaciation

d) de nos jours

: Coral biotope evolution since 20.000 years B.P.

a) during last glaciation

b) in beginning of deglaciation

c) at the end of deglaciation

d) to day

b) Les banquettes coralliennes de fond de baies et des flancs

Les colonies coralliennes se sont progressivement réinstallées aux Marquises dès qu'en cours de déglaciation (à partir - 12.000 ans) la température océanique de surface est remontée au-dessus de 19-20° C. Toutefois trois facteurs limitants ont considérablement gêné ce processus : l'action destructrice des houles, l'excès de turbidité dû à une érosion accélérée et les arrivées d'eau douce (rivières et sources). Par contre un facteur potentiellement favorable a été constitué par la présence des eaux vertes, résultat de la maturation des eaux semi confinées dans les baies et aux abords. Comme les coraux constructeurs de récifs (hexacoralliaires) sont susceptibles de fonctionner aussi bien par autotrophie (consommation des nutriments par les zooxanthelles), que par hétérotrophie (capture de proies planctoniques par les cnidoblastes des polypes) on imagine sans mal l'effet bénéfique, pour leur croissance, de la présence des eaux riches, celles-ci pouvant localement atteindre le stade "eaux rouges" (TAXIT, 1978). Il est toutefois largement reconnu aujourd'hui que les processus d'autotrophie sont tout à fait prépondérants dans le fonctionnement des colonies coralliennes ce qui fait qu'une fraction des fortes teneurs en nutriments dissous mesurées dans les baies est utilisable par cet écosystème corallien, discret mais bien présent. L'endo-upwelling du récif barrière fossile est donc à nouveau, bien que de façon très partielle, impliqué dans la reprise du biotope corallien frangeant.

Fig. 24

c) Les bancs coralliens du proche large

Leur présence actuelle à profondeur comprise entre la surface et une vingtaine de mètres, constitue un témoignage de recolonisation réussie dans un environnement physique n'ayant pas généré les facteurs limitants précités. Il fallait en particulier, pour que ces bancs et récifs puissent bénéficier d'énergie lumineuse suffisante, que les supports de départ (récifs tabulaires, îlots ou pointes basaltiques) se soient trouvés, au moment du réchauffement des eaux (à partir de - 12.000 ans) à une profondeur non supérieure à une cinquantaine de mètres. Dans ces conditions les larves coralliennes planula amenées des archipels sud et ouest par les aléas de la circulation marine pouvaient se fixer sur des substrats assez

W140-40+

W140-30+

CANAL X S₂ - Rouge (0,61-0,69 μ)
Pénétration \approx 5 mètres.

Image SPOT du 13 Novembre 1987.
COPYRIGHT CNES 87.

MOTU ONE

EIAO -

Fig. 25 : Le banc MOTU-ONE (Marquises Nord) en imagerie SPOT.
: MOTU-ONE drowned atoll as revealed by SPOT signal.

Archives de la Banque de données de la Station Polynésienne
de Télédétection. TAHITI.

50001000+

50001000+

éclairés, tout en évitant trop fortement l'effet des houles et des tempêtes. La valeur modale de calcification d'un récif actuel, de l'ordre de $4 \text{ kg/m}^2/\text{an}$ correspond approximativement à une croissance vers le haut de 3 mm/an , si la totalité de la production carbonatée reste sur le récif (BUDDEMEIER and HOPLEY, 1988).

Ainsi, avec une croissance nette minimale de 1 à 3 mm/an un banc corallien de ce type a pu s'épaissir de 10 à 30 mètres au cours des 10.000 dernières années et se trouver actuellement entre la surface et 20 mètres de profondeur. Ce processus d'épaississement devrait d'ailleurs se poursuivre, mutatis mutandis, jusqu'à ce que l'ensemble de la plate-forme récifale de ces bancs coralliens affleure en surface, en prémisses à l'apparition dans cet archipel de plusieurs atolls.

On ne peut d'ailleurs écarter l'hypothèse que certains soubassements de ces bancs coralliens aient auparavant déjà atteint le stade atoll. Victimes comme leurs homologues récif-barrière des îles hautes du choc thermique létal ils ont pu bénéficier beaucoup plus rapidement d'une recolonisation par des larves planula, bien avant que la montée du niveau océanique ait atteint son maximum. Bénéficiant d'une moindre turbidité qu'autour des îles hautes (absence des particules terrigènes et absence de formation d'eau verte par trop grande dilution dans l'océan des nutriments endo-upwellés transitant dans leur socle) la réinstallation de l'écosystème a pu se faire avec un ennoisement de l'ordre d'une cinquantaine de mètres, dès que les conditions thermiques océaniques sont redevenues favorables ($T > 18^\circ \text{C}$ à partir de $- 12.000$ ans). Une évaluation de l'épaisseur de la couche carbonatée de ces bancs par sismique réflexion, permettrait de confirmer la validité de ces différents scénarios. Il reste que le banc corallien MOTU ONE a déjà bel et bien l'aspect d'un atoll de subsurface (Fig. 25).

Quant au rocher THOMASSET (émergé de quelques mètres) le superbe récif annulaire qui l'entoure entre les niveaux $- 10$ mètres et $- 60$ mètres (et au-delà ?) ne tardera pas dans sa victorieuse bataille pour la surface à le transformer en un presqu'atoll, comme le sont MARIA (îles Australes) ou Clipperton ($10^\circ \text{N} - 110^\circ \text{W}$). Ce scénario d'évolution des récifs ennoyés

des Marquises (bancs Clark et Lawson) est également applicable à des bancs coralliens situés au sud des Australes, bancs NIELSON, HAWAIIKI et THIERS, qui constituent des oasis de vie dans un océan d'une oligotrophie extrême, et qui, en période de déglaciation, ont pu eux aussi être victimes d'un choc thermique. A l'échelle mondiale notre modèle pourrait être utilement testé dans le cas de biotopes coralliens en position limite, comme autour de certaines îles du nord de l'archipel des HAWAII (Pacifique Tropical nord) à St Hélène (Atlantique sud) ou pour rendre compte des très nombreux guyots et atolls ennoyés des zones subtropicales.

V - CONCLUSION

Réalisée de façon opportuniste entre 1985 et 1988 à l'occasion des missions HYDROPOL d'océanographie générale et d'hydroclimatologie de la Zone Economique Exclusive de Polynésie Française, cette étude de l'archipel des Marquises nous permet de rendre compte de façon cohérente des conditions physico-chimiques, biologiques et écologiques rencontrées. Les points forts qui s'en dégagent portent sur :

- l'évaluation de la richesse et de la productivité marine autour de cet archipel, caractérisé par la présence d'eaux vertes très chargées en plancton à proximité immédiate des îles hautes.

- l'évidence de peuplements coralliens vivaces, dispersés et en banquettes frangeantes autour des îles hautes, denses et épais sur les bancs du large.

- la redécouverte d'une plate-forme carbonatée périphérique des îles hautes par 90 mètres de profondeur, jouxtant une pente externe à 30° d'angle.

- l'interprétation géomorphologique de cette structure comme un ancien récif barrière tué par choc thermique il y a 18.000 ans en début de déglaciation.

- le postulat d'un maintien du processus "d'endo-upwelling géothermique" au sein de cet ancien récif, ce qui permet de bien rendre compte de la présence des eaux vertes à proximité des îles hautes.

- la spécificité de cet effet d'île, entretenu par les nutriments neufs fournis par les eaux endo-upwellées au niveau de la barrière ennoyée.

- le transfert de l'écosystème corallien à l'écosystème planctonique pélagique du flux énergétique et trophique de l'endo-upwelling après la mort du récif barrière.

- un scénario vraisemblable rendant compte des différents types de recolonisation du biotope corallien, dès le réchauffement des eaux ($T > 18^{\circ}\text{C}$) intervenant à la fin de la phase la plus rapide de montée du niveau océanique (à partir de - 12.000 ans).

- l'extrême fécondité du concept "d'endo-upwelling géothermique" qui, permettant de rendre compte de la situation paradoxale de la forte productivité des écosystèmes coralliens en zone oligotrophe, constitue un véritable paradigme (ROUGERIE et WAUTHY, 1988) dont les implications potentielles sont très nombreuses : son application au cas des Marquises permet ainsi de résoudre de façon rationnelle le difficile problème posé par l'écologie marine de cet archipel (GUILCHER, 1988).

Il nous reste à souhaiter que des opérations et investigations ad hoc (carottages et datations des récifs barrières, sismique, prélèvements des eaux interstitielles et endo-upwellées, etc ...) puissent confirmer de façon définitive ce modèle de fonctionnement très spécifique des eaux et écosystèmes de l'archipel des Marquises.

R E F E R E N C E S

- AGASSIZ (A.) - 1903.- The coral reef of the Tropical Pacific. Mem. Mus. Comp. Zool. Harvard, 28, 410 p. Cambridge (Mass.).
- AHARON (P.), SOCKI (R.A.) and CHAN (L.) - 1987.- Dolomitization of atolls by sea water convection flow : test of a hypothesis at NIUE, South Pacific, Journal of Geology University of Chicago, vol. 95 p. 187-203.
- BROUSSE (R.), CHEVALIER (J.P.), DENIZOT (M.), SALVAT (B.) - 1978.- Etude géomorphologique des îles Marquises. Cahiers du Pacifique, Fondation Singer Polignac, n° 21, 407 p.
- BUDDEMEIER (R.W.) and HOPLEY (D.) - 1988.- Turn-on's and turn-off's : causes and mechanisms of the initiation and termination of coral reef growth. Proceedings of the sixth International coral reef symposium, Townsville, 9 p.
- CHEVALIER (J.P.) - 1978.- Les coraux des îles Marquises. In "Cahiers du Pacifique" n° 21, p. 243-283.
- CLIMAP Project Members - 1976.- The surface of the ice-age earth. Science 191, 1131-1137.
- CROSSLAND (C.) - 1927.- Marine Ecology and coral formations in the Panama region Galapagos and Marquesas Islands and the atoll of Napuka. Trans. Roy. Soc. Edinburgh, 55, 531-554.
- DAVIS (W.H.) - 1928.- The coral reef problem. Am. Geogr., Soc., Spec., Publ., 9, 1-596, New York.
- DOTY (M.S.) and OGURI (M.) - 1956.- The island mass effect. Journal du Conseil International pour l'exploration de la mer, 22, p. 33-37.
- FAGERSTROM (J.A.) - 1987.- The evolution of reef communities. John WILEY, New York, 600 p.
- FLENLEY (J.R.) and KING (S.M.) - 1984.- Late quaternary pollen records from Easter Island. Nature, vol. 307, n° 5946, p. 47-50.
- GILMARTIN (M.) and REVELANTE (N.) - 1974.- The island mass effect on the phytoplankton and primary production of Hawaiian islands. Journal of experimental, Marine biology and ecology : 36, p. 181-204.
- GUILCHER (A.) - 1988.- Coral Reef Geomorphology, John WILEY, Chichester, 228 p.

- JONES (E.C.) - 1962.- Evidence of an islands effect upon the standing crop of zooplankton near the Marquesas islands, Central Pacific. Journal du Conseil International pour l'exploration de la mer, 27, p. 223-232.
- RAITT (H.) - 1955.- Exploring the deep Pacific (The Capricorn expedition) STAPLES Press Limited, LONDON, 350 p.
- RANSON (G.) - 1952.- Note sur la cause probable de l'absence de récifs coralliens aux îles Marquises. C.R. Somm. Sciences Soc. Biogéogr., n° 248, 3-11.
- ROUGERIE (F.), MAREC (L.), PICARD (E.P.) - 1982.- Caractéristiques hydro-climatiques de la zone marine polynésienne pendant l'année 1981. Notes et Documents Oceanogr., n° 18, TAHITI, 73 p.
- ROUGERIE (F.), MAREC (L.) et WAUTHY (B.) - 1985.- Caractéristiques hydro-climatiques de la zone marine polynésienne en 1982 et 1983. Notes et Documents Oceanogr., n° 27, TAHITI, 112 p.
- ROUGERIE (F.) et WAUTHY (B.) - 1986.- Le concept d'endo-upwelling dans le fonctionnement des atolls oasis. Océanologica Acta, vol. 9, n° 2, p. 133-148.
- ROUGERIE (F.) et WAUTHY (B.) - 1988.- The endo-upwelling concept : a new paradigm for solving and old paradox. Proceedings of the sixth International Coral Reef symposium, TOWNSVILLE, 6 p.
- TAXIT (R.) - 1978.- Les phénomènes d'eaux rouges aux îles Marquises. In Cahiers du Pacifique, n° 21, p. 285-292.

CAMPAGNES EN MER EFFECTUEES DANS LA ZONE ECONOMIQUE EXCLUSIVE DES 200
MILLES DE POLYNESIE FRANCAISE (5°S-30°S) - 155°W-135°W) DEPUIS L'OUVERTURE
DU LABORATOIRE D'OCEANOGRAPHIE PHYSIQUE DE L'ORSTOM - TAHITI EN 1978-1979

- Programmes : SURTROPOL : Surveillance Trans Océanique en Polynésie (UR101 - Dept. A)
: HYDROPROD : Hydrologie et Productivité (UR305 - Dept. C)

<u>CAMPAGNE</u>	<u>NAVIRE</u>	<u>DATE</u>	<u>PARTICIPANTS</u>	<u>PARAMETRES</u>
AUSTRALES 79	MARARA	10/05 au 27/05/79	SMCB (3) ORSTOM (1)	S.H. GEK. NUT. Chl-a
AUSTRALES 80	MARARA	18/04 au 05/05/80	SMCB (3) ORSTOM (2)	
MARQUISES 80	MARARA	27/09 au 04/10/80	SMCB (3) ORSTOM (1)	
AUSTRALES 81	MARARA	13/04 au 25/04/81	SMCB (3) ORSTOM (2)	
MARQUISES 81	MARARA	15/09 au 30/09/81	SMCB (3) ORSTOM (1)	

(Non renouvellement de la convention DIRCEN/SMCB/ORSTOM
du fait du manque d'équipement du MARARA)

POLYDROTHON 82	CORIOLIS	19/01 au 09/02/82	ORSTOM/TAHITI (2) ORSTOM/NOUMEA (3)	Bat. Pr. Nut. O ₂ Chl-a.
----------------	----------	-------------------	--	--

ETM 1	TAINUI	24 au 28/11/82	IFREMER (2)	S.H. Pr. Nut. Chl-a. Tur.
2	TAINUI	14 au 18/03/83		
3	TAINUI	23 au 28/06/83		
4	TAINUI	14 au 28/10/83		
5	CORIOLIS	19 au 23/03/84	ORSTOM (3)	
6	MARARA	09 au 13/07/84		
7	MARARA	23 au 27/10/84		

(Fin du travail en mer prévu par la convention IFREMER/ORSTOM
pour l'étude physico-chimique du site ETM de TAHITI
(Projet Energie Thermique des Mers))

TATI	CORIOLIS	24 au 28/03/84	ORSTOM Dept.A (3) ORSTOM Dept.C (3)	Bat. Pr. Nut. Chl-a.
CO2	TOHITIKA	19 au 28/04/85	SCRIPPS (1) ORSTOM (1)	CO ₂ Nut.
TATU	CORIOLIS	28/10 au 24/11/85	ORSTOM Dept.A (3) ORSTOM Dept.C (3)	Bat. Pr. Nut. Chl-a Tur. CO ₂

(Signature Convention (DIRCEN/SMSR/ORSTOM))

HYDROPOL II	MARARA	14/04 au 10/05/86	SMSR (4) ORSTOM (1)	Bat. S.H. Nut. Chl-a O ₂ , pH Tur. CO ₂
HYDROPOL III	MARARA	10/10 au 09/11/86	SMSR (4) ORSTOM (2)	
HYDROPOL IV	MARARA	05/03 au 06/04/87	SMSR (4) ORSTOM (2)	Lachers de bouées
HYDROPOL V	MARARA	Octobre 1987	SMSR (4) ORSTOM (2)	+ Opérations spécifiques aux abords des Marquises
HYDROPOL VI	MARARA	Février 1988		

<u>PARAMETRES</u> (Abréviations)	S.H. : Station hydrologique	Nut : Nutriants
	Bat. : Bathysonde TS	Chl. : Chlorophylle-a
	Pr. : Profileur de courant	O ₂ : Oxygène dissous
	GEK : Géoelectrokinetographie	Tur. : Turbidimétrie

R E M E R C I E M E N T S

- à l'équipage et aux officiers du MARARA dont la disponibilité souriante a constitué un soutien psychologique précieux.
- au Commandant Jean MATHIOT dont la compétence et l'efficacité ont joué un rôle déterminant dans la bonne marche des missions HYDROPOL.
- aux scientifiques du contingent, VAT, stagiaires et techniciens pour leur enthousiasme et leur technicité.
- à l'équipe de géophysique-géologie du centre ORSTOM de Nouméa pour le prêt des dragues et leur précieux soutien scientifique.

A tous MAURURU

14/4/89

Loïc CHARPY
ORSTOM, COM, Station Marine d'Endoume
13007 Marseille

aux destinataires du
Notes et Document d'Océanographie
de l'ORSTOM Tahiti n°37 (1988)

J' apparais par erreur comme co-auteur de l'article:

Formations récifales et effet d'île par endo-upwelling autour des îles Marquises. *Notes et Doc. Océanogr. n° 37, 1988.*

Je vous prie de bien vouloir rectifier cette erreur sur le volume que vous avez reçu.

4/14/89

Loïc CHARPY
ORSTOM, COM, Station Marine d'Endoume
13007 Marseille

to the recipients of
Notes et Document d'Océanographie
de l'ORSTOM Tahiti n°37 1988

My name appears by mistake in the author's list of the paper:

Formations récifales et effet d'île par endo-upwelling autour des îles Marquises. *Notes et Doc. Océanogr. n° 37, 1988.*

Please, rectify on the volume you received.