

Validation du modèle d'endo-upwelling géothermique pour un atoll et un récif barrière d'île haute

Geothermal endo-upwelling model testing for an atoll and high island barrier reef

F. Rougerie & B. Wauthy,

Centre ORSTOM, BP 529, Papeete, Tahiti, Polynésie Française.

&

Ch. Andrie,

ORSTOM-LODYC, Université Pierre et Marie Curie

4 Place Jussieu, 75352 Paris Cédex, France.

Résumé : Les eaux interstitielles de forages réalisés sur le platier extérieur de l'atoll de Tikehau (15°S - 149°W, Tuamotu, Polynésie Française) jusqu'à 35 m de profondeur ont été analysées chaque mois depuis 1989. Ces eaux diffèrent des eaux du lagon (0-30 m) ou de la couche de mélange superficielle de l'océan (0-150 m): teneurs en sels nutritifs dissous et en CO₂ total élevées (PO₄ = 1 mmole/m³, NO₃ = 5 mmole/m³, SiO₄ = 8 mmole/m³; CO₂ = 2.3 mmole/l), teneurs en O₂ basses (1,3 ml/l) et pH bas (7,7). Ces caractéristiques cadrent avec le modèle d'endo-upwelling géothermique qui postule que des eaux océaniques profondes (Eau Antarctique Intermédiaire, 500-1500 m) pénètrent dans la partie inférieure du socle corallien poreux et s'élèvent par thermo-convection jusque dans les parties hautes de l'atoll. Les sites de sortie de ces eaux interstitielles endo-upwellées se situent préférentiellement sur la couronne extérieure de l'atoll là où l'action des houles entretient un nettoyage constant du placage algo-corallien dont la productivité est entretenue par ces nutriments endo-upwellés. Un test de validité de ce modèle avec un marqueur conservatif a été basé sur la présence d'une anomalie profonde d'hélium-3, qui forme un panache originaire de la dorsale active médio-Pacifique qui, se déplaçant vers l'ouest, atteint les Tuamotu. Nos mesures d'hélium-3 ont permis de retrouver cette anomalie positive dans les eaux interstitielles récifales et de vérifier son absence dans les eaux lagunaires et océaniques (0-400 m) adjacentes. Un forage de 50 m réalisé sur le récif barrière nord de Tahiti a permis de confirmer les caractéristiques des eaux interstitielles; le très fort excédent en silice dissoute permet de proposer que pour ce récif barrière de 150 m d'épaisseur, la circulation par thermo convection se fasse d'abord dans le basalte puis dans le carbonate.

Mots-clés : Endo-Upwelling, atoll, récif barrière, nutriments, helium-3

Abstract : *Interstitial waters from boreholes in reef flat conglomerate at Tikehau atoll contain positively anomalous concentrations of dissolved inorganic nutrients, CO₂ and He-3 compared to adjacent oceanic and lagoonal waters. These anomalies support the geothermal endo-upwelling model in which deep oceanic water penetrates the porous reef carbonates and ascends through the atoll flanks by thermo-convective advection. The presence of the well documented plume-shaped helium-3 anomaly originating from the East Pacific Rise and spreading westwards at the depth of the ridge crest through the entire Pacific basin has been used as new opportunity to demonstrate the reality of thermo-convective circulation inside the atoll reef, as already proposed in Bikini and Mururoa atolls. A borehole in Tahiti barrier reef gives data interpreted as evidence a mixed endo-upwelling process, partly in volcanics, partly in carbonate.*

Key-words : Endo-Upwelling, Atoll, Barrier Reef, Nutrients, Helium-3.

Introduction

Les eaux interstitielles prélevées dans des puits de forages dans le conglomerat du platier récifal de l'atoll de Tikehau contiennent d'anormales concentrations de nutriments inorganiques dissous, de CO₂ et de He-3 par rapport aux eaux océaniques voisines (couche de mélange) et aux eaux lagunaires. Ces anomalies appuient le modèle d'endo-upwelling (Rougerie & Wauthy, 1986, in press) dans lequel les eaux océaniques profondes pénètrent dans le récif carbonaté poreux et, le long des flancs de l'atoll, cheminent vers le haut par transport thermo-convectif. La présence d'une anomalie profonde d'hélium-3, qui forme un panache originaire de la dorsale active médio Pacifique (Lupton & Craig, 1981) et qui, se déplaçant vers l'ouest, atteint les Tuamotu a servi de nouvel argument pour appuyer la réalité de la circulation thermo-convective dans l'atoll ainsi que cela a déjà été proposé à Bikini (Swartz, 1958) et Mururoa (Samaden et al., 1985). Un forage sur la barrière récifale de Tahiti a fourni des données prouvant l'existence d'un processus d'endo-upwelling mixte, pour partie dans le socle volcanique et pour partie dans le socle carbonaté.

Introduction

Interstitial waters from boreholes in reef flat conglomerate at Tikehau atoll contain positively anomalous concentrations of dissolved inorganic nutrients, CO₂ and He-3 compared to adjacent oceanic (Tropical Surface Water, TSW) and lagoonal waters. These anomalies support the geothermal endo-upwelling model (Rougerie & Wauthy, 1986 in press) in which deep oceanic water (Antarctic Intermediate Water, AIW) penetrates the porous reef carbonates and ascends through the atoll flanks by thermo-convective advection. The presence of the plume-shaped helium-3 anomaly originating from the east Pacific rise (Lupton & Craig, 1981) and spreading westwards at the depth of the ridge crest through the entire Pacific basin has been used as a new opportunity to demonstrate the reality of thermo-convective circulation inside the atoll reef, as already proposed in Bikini (Swartz, 1958) and Mururoa (Samaden et al., 1985). A borehole in Tahiti barrier reef gives data interpreted as evidence a mixed endo-upwelling process, partly in volcanics, partly in carbonate.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 35 407 exp 1

Cote : B 11

PH

Propriétés de l'eau interstitielle de l'atoll

Dans l'atoll de Tikehau (archipel des Tuamotou, 15°S, 149°30'W), les eaux interstitielles ont été prélevées dans les puits de forages tous les 2 mois, depuis 1989, à des profondeurs de 1 à 35 m. Les échantillons étaient récupérés à partir de tubes en tygon installés en permanence et analysés quelques heures plus tard en laboratoire. Les résultats indiquent clairement que les eaux interstitielles sont riches en nutriments : les concentrations en phosphate inorganique dissous, en nitrate et en silicate sont 7 à 20 fois plus fortes que dans l'océan (Feely *et al.*, 1987) et le lagon environnants mais sont proches des valeurs trouvées à 500 mètres de profondeur dans la partie supérieure de l'AIW. Les données confirment également les résultats obtenus il y a 10 ans dans des sondages profonds à Mururoa (23°S, 140°W) et fournissent des arguments supplémentaires en faveur du modèle d'endo-upwelling géothermique. D'après ce modèle, les eaux océaniques profondes pénètrent et s'élèvent par transport thermo-convectif dans les carbonates récifaux situés au dessus du socle volcanique, fournissant ainsi les nutriments nécessaires au métabolisme des algues et des coraux de l'écosystème récifal. A Tikehau, l'AIW pénètre dans les flans de l'atoll à une profondeur égale ou supérieure à 500 m et, grâce à la concentration élevée en CO₂ et à un pH bas, dissout en partie les carbonates (principalement la phase aragonitique). Aissaoui *et al.* (1988) notent que "that present centripetal sea water circulation induces marine dissolution below 655 m around the periphery of Mururoa atoll". Ainsi, les eaux océaniques profondes, dissolvant localement les carbonates récifaux, sont réchauffées par le flux géothermiques et s'élèvent par thermo-convection pour former ces eaux interstitielles riches en nutriments prélevées lors des sondages. Ces nutriments alimentent ensuite la production autotrophique de l'écosystème algues-coraux de la crête et de la pente externe récifale de Tikehau

L'atoll, singularité biologique dans l'océan tropical désertique

L'écosystème récifal de l'atoll, oasis au sein d'un univers marin tropical oligotrophe (Wauthy, 1986), exporte obligatoirement des matériaux organiques vers l'océan (Le Borgne *et al.*, 1989). Il doit donc avoir un rapport Production/Respiration au moins égal à 1 pour survivre. Cette condition vitale ne peut être maintenue que par un apport nouveau de nutriments, ce qui est parfaitement expliqué par le modèle endo-convectif proposé. Comme l'indiquent les valeurs d'oxygène, il y a une utilisation apparente de l'oxygène (U.A.O. = 2,6 ml/l) dans le socle poreux récifal (fig.1). L'oxygène pourrait, logiquement, être utilisé lors de la biodégradation de la matière organique provenant de la frange supérieure de la barrière corallienne vivante, attaquée et lessivée de façon permanente par les vagues de l'océan s'y brisant (Guilcher, 1988). Une évaluation graphique de la quantité de nutriments reminéralisés relargués dans le milieu interstitiel donne 0.3 mmole/m³ en excès pour les phosphates, ce qui cadre bien avec la valeur de l'utilisation apparente de l'oxygène (U.A.O.) (fig.2). Ainsi, quelques 30% des nutriments mesurés in situ viennent du biorecyclage ce qui signifie que 70% des nutriments pro-

Atoll interstitial water properties

At Tikehau atoll, Tuamotu archipelago (15°S, 149°30'W), interstitial waters from four boreholes drilled on the reef flat are sampled bimonthly since 1989 at depths of 1-35 m. Samples were drawn from permanently inserted tygon polytubes and analyzed within a few hours of collection in our laboratory at Tikehau. These data clearly indicate that the interstitial waters are nutrient-rich : concentrations of inorganic dissolved phosphate, nitrate and silicate are 7-20 times higher than in the surrounding ocean (Feely *et al.*, 1987) and lagoon and are similar to figures found at 500 meters depth in the upper AIW. The data set also confirms results obtained 10 years ago from deep wells at Mururoa atoll (23°S, 140°W) and provide added support for the geo-thermal endo-upwelling model of Rougerie & Wauthy. From this model deep oceanic water penetrates and ascends by thermo-convective advection through the porous and permeable reef carbonates overlying the volcanic foundation thereby providing the nutrient required for the metabolism of the algae-coral reef ecosystem. At Tikehau, AIW enters the reef flanks at depths of 500 m or more, and due to its high CO₂ concentration and low pH, can dissolve some of the carbonate (mainly the aragonite phase). Aissaoui *et al.* (1988) have recently noted "that present centripetal sea water circulation induces marine dissolution below 655 m around the periphery of Mururoa atoll". Thus, deep oceanic waters entering, and locally dissolving the reef carbonates, are heated by the geothermal flux and ascend by thermal convection to become the nutrient-rich interstitial waters sampled in our boreholes. These endo-upwelled nutrients then sustain the huge autotrophic production of the algal-coral ecosystem living on Tikehau crest and seaward slope.

Atoll as a biological singularity within oceanic tropical desert

The reef ecosystem cannot avoid to be organic exporter (Le Borgne *et al.*, 1989), the atoll being an oasis surrounded by clear oligotrophic tropical ocean (Wauthy, 1989) : so it needs to have a productivity/respiratory ratio $PIR > 1$ for its long term survival. This vital constraint can only be secured by new nutrients entering the coral ecosystem, an ecological exigence well satisfied by our endo-convective model. As indicated by oxygen data, there is an apparent oxygen utilisation (A.O.U. = 2.6 ml/l) inside reef porous framework (fig. 1). This oxygen could logically be used in biodegradation of organic matter coming down from the upper living coral veneer of the barrier reef margin, permanently splashed and cleaned by oceanic waves (Guilcher, 1988). Graphical evaluation of the amount of remineralized nutrients released into the interstitial medium gives 0.3 mmole/m³ as excess of phosphate that fits well with the value of A.O.U. (fig. 2). Therefore, some 30 % of measured in situ nutrients come from biorecycling, a figure that means that 70 % of the nutrient pool consist-

viennent directement de l'A.I.W. entourant les flancs profonds de l'atoll (fig. 4) Le mécanisme d'endo-upwelling géothermique est identique à celui des endo-upwelling côtiers : la matière organique produite dans les couches su-

of new nutrients, directly originating from A.I.W. surrounding the deep flanks of the atoll (fig. 4). As a matter of fact, a geothermal endo-upwelling belongs to the same family as coastal upwelling where a

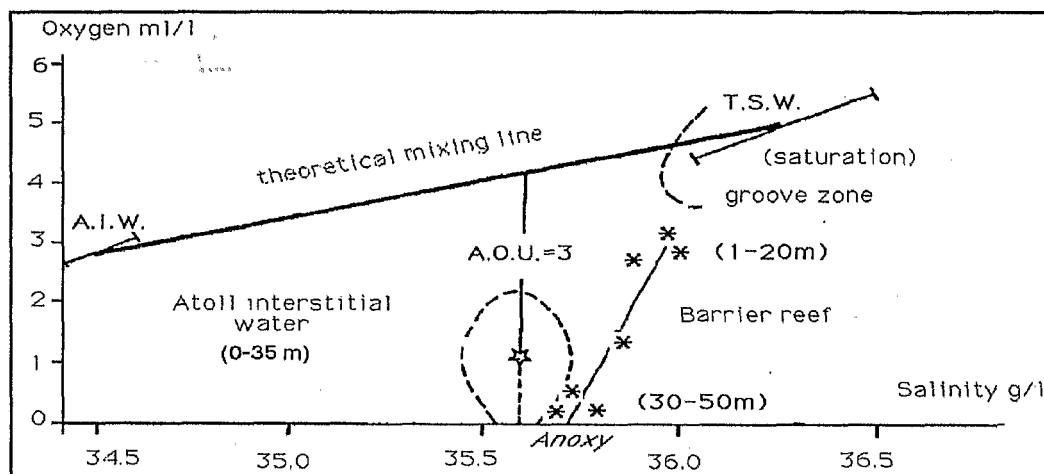


Figure 1. Diagramme oxygène-salinité entre AIW(500 m) et TSW (0-150 m). Utilisation apparente de l'oxygène (UAO) est de 3l/m³ pour une salinité de 35,6 g/l. Figure 1. Dissolved oxygen versus salinity between AIW (500 m) et TSW (0-150 m). Apparent Oxygen utilisation (AOU) is 3 l/m³ for salinity 35.6 g/l.

perficielles, grâce au flow des nutriments remontant des profondeurs, sédimente sous la forme de particules détritiques. Ces particules subissent une reminéralisation intense dans les eaux de sub-surface, ce qui entraîne une forte U.A.O. et provoque la formation d'une couche sub-superficielle pauvre en oxygène caractéristique des eaux côtières upwellées (Pérou, Mauritanie). Contrairement aux upwellings côtiers, très faciles à détecter grâce à leur signature thermique froide, leur richesse en nutriments, leur forte turbidité due à la richesse en phyto- et zooplancton et à la présence d'une couche presque anoxique, la signa-

large part of the organic matter produced in the lighted layers by the flow of upwelled nutrients sinks as detritus particles. These particles undergo intense remineralization in subsurface, that triggers a strong A.O.U. and creates the subsurface oxygen-poor layers characteristics of coastal waters (Peru-Chili or Mauritania). Contrary to coastal upwellings, very easy to detect by their thermal signature (cooling), superficial nutrients enhancement, high turbidity due to phyto and zooplankton blooming and subsurface near-anoxic layer, endo-upwelling signature is diffi-

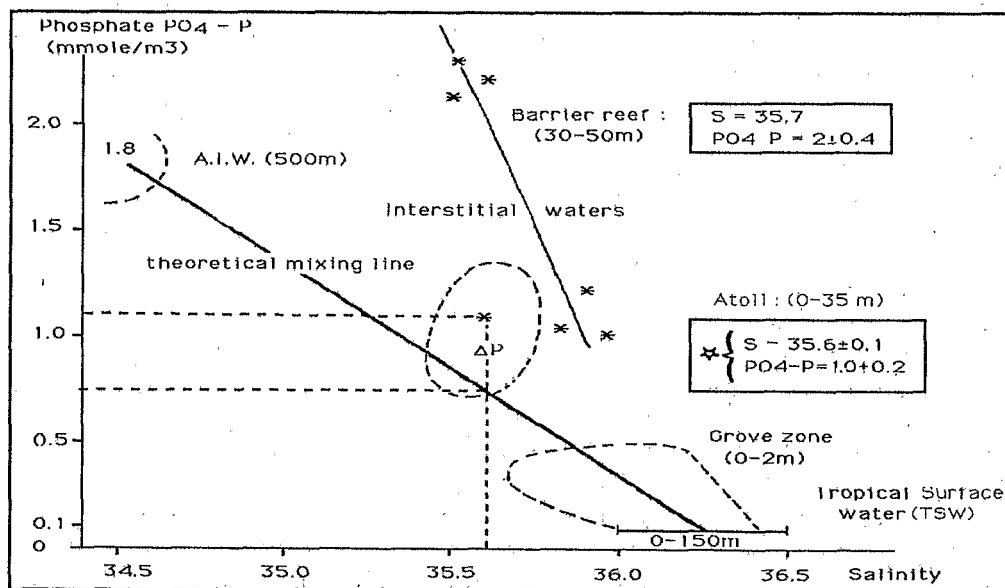


Figure 1. Diagramme phosphate-salinité entre AIW(500 m) et TSW (0-150 m). Excès de phosphate $\Delta P = + 0,35$ pour une salinité de 35,6 g/l. Figure 1. Phosphate versus salinity between AIW (500 m) et TSW (0-150 m). Excess of phosphate $\Delta P = + 0,35$ for salinity 35.6 g/l.

ture d'un endo-upwelling est difficile à appréhender. L'eau convective endo-upwellée est censée s'écouler continuellement vers le haut au travers de la structure récifale poreuse puis atteindre la couche corallienne vivante. Les zooxanthelles des coraux et les macro-algues sont les

cult to grasp. Endo-upwelled convective water is assumed to continuously flow upwards through reef porous structure and gently seeps out through the living coral veneer layer; the endosymbiotic zooxanthellae of corals and benthic macroalgae are then

principaux consommateurs de ce flot de sels nutritifs qui représentent la condition indispensable à la calcification des squelettes et à la croissance organique. Ce processus dynamique entraîne une expulsion permanente de zooxanthelles et peut être vu comme un point de départ de la chaîne trophique spécifique des récifs coralliens.

main, if not exclusive, consumers of this flow of nutrients, a necessary and sufficient condition for their organic growing and coral skeleton calcification. This dynamic process induces a permanent release of blooming zooxanthellae from coral and can be viewed as a starting point of the specific reef food chain.

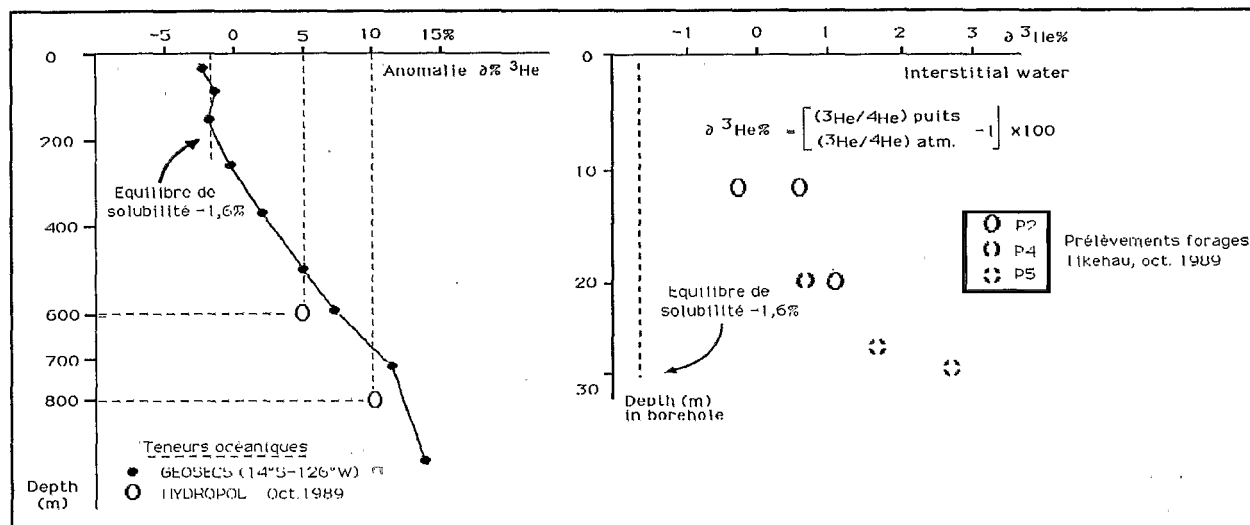


Figure 3. Diagramme He 3 - salinité entre AIW et TSW à Tikehau. Les prélèvements océaniques montrent des Δ He 3 négatifs proches de la valeur atmosphérique à l'équilibre (couche 0-200 m au dessus de la thermocline) et des valeurs positives dans l'AIW. Les valeurs mesurées dans les forages sont remarquablement en accord avec la ligne de mélange théorique AIW/TSW, un résultat qui ne peut s'expliquer que par une remontée de l'AIW (endo-upwelling) au travers du calcaire.

Figure 3. He 3 versus salinity between AIW and TSW in Tikehau atoll. Oceanic samples show negative Δ He 3 values close to the equilibrium atmospheric value in TSW (the 0-200 m depth layer above thermocline) and positive values in AIW. Values in boreholes are remarkably in accordance with the theoretical AIW/TSW mixing line, a result that can only be explained by AIW upward (or endo-upwelled) flow through reef limestone.

L'anomalie en Helium-3 : marqueur de l'endo-upwelling

Des travaux antérieurs (Ostlund *et al.*, 1987) portant sur la distribution de l'Hélium sur une grande échelle dans les couches profondes du Pacifique ont montré que celui-ci a pour origine les sources hydrothermales de la dorsale est Pacifique. Ces sources ont provoqué panache riche en hélium-3 centré à la profondeur de cette dorsale (2500 m). Le panache s'étend vers l'Ouest dans le Pacifique central, englobant les Tuamotou, où les anomalies d'hélium peuvent atteindre 35% (à 2000 m de profondeur). Des prélèvements pour mesurer l'hélium-3 ont été réalisés dans les eaux interstitielles de Tikehau en octobre 1989 à partir de trois des forages. 40 cm³ d'eau de mer ont été prélevés à chaque fois et les composants gazeux analysés pour doser l'hélium-3 et l'hélium-4 en spectrométrie de masse selon le protocole de Jean-Baptiste *et al.* (1988). En outre, un profil de concentrations en 3-He/4-He et en nutriments était réalisé à quelques miles au large de l'atoll de Tikehau à bord du B.C.B. Marara. Les données d'hélium 3 sont indiquées en Δ ‰, c'est à dire par la déviation du rapport isotopique He/He de l'échantillon par comparaison avec le rapport isotopique atmosphérique (RA = 1,384.10⁻⁶). Les valeurs du Δ 3He pour les forages augmentent progressivement avec la profondeur; de plus, à chaque profondeur, la valeur est significativement en excès par rapport à la couche océanique de mélange entre la surface et 150 m de profondeur (fig. 3). Ces valeurs excédentaires de Δ 3He sont cohérentes avec un processus d'endo-upwelling d'eaux océaniques profondes remontant vers le haut de l'atoll. Pour ce qui est du profil océanique en Σ 3He, ce-

Helium-3 anomaly as an adequate and conclusive marker of endo-upwelling

Previous work (Ostlund *et al.*, 1987) on a large scale distribution of helium-3 in the deep Pacific ocean have shown that primordial Helium is dispersed from hydrothermal venting on the East Pacific Rise. This has led to an helium-3 enriched plume centered at about the depth of the ridge crest (2500 m). The plume spreads westward into the central Pacific, including the Tuamotu archipelago, where Helium-3 anomalies up to 35% (at 2000 m depth) can be detected (Clarke *et al.*, 1970). Sampling for He was done from Tikehau interstitial water in October 1989. Copper tubes were flushed and then filled directly with interstitial water from the polytubes of three of our boreholes and sealed with clamps. In the laboratory 40 cc seawater samples were extracted and their dissolved gaseous component analyzed for helium-3 and helium-4 by mass spectrometry following our routine analytical procedure (Jean-Baptiste *et al.*, 1988). In addition, an oceanic 3-He/4-He and dissolved nutrient profile was made a few miles off Tikehau with the B.C.B. Marara. He-3 data are given in Δ ‰ values, i.e. by the deviation of the isotopic ratio He/He of the sample to the atmospheric isotopic ratio, RA = 1.384.10⁻⁶. The Δ 3-He values for boreholes samples show a progressive increase with depth. Moreover, at each depth, the value is significantly in excess relative to the oceanic mixed layer between 0-150 m (fig. 3). These Δ 3-He excesses are quite consistent with the endo-upwelling process

ci correspond à un apport à partir de la profondeur de 700 à 800 m, profondeur à laquelle les eaux océaniques pénètrent dans l'atoll, ce qui est en accord avec les données se rapportant aux nutriments telles qu'elles ont été exposées précédemment.

Eau interstitielle du récif barrière de Tahiti

Un puits de 50 mètres a été foré en avril 1990 dans le récif barrière de Tahiti (17°30 S, 150°W). Ceci a permis de récolter et d'analyser 10 paramètres de l'eau interstitielle prélevée mensuellement. L'eau est pompée par un système péristaltique à 7 niveaux : 50, 40, 30, 20, 10, 5 et 1 mètre. La première série de données indique clairement que :

- l'eau interstitielle est riche en nutriments, comparée aux eaux du lagon et de la couche de mélange (0-100 m);
- les valeurs moyennes des nutriments à 30 m sont significativement supérieures à celles observées à la même profondeur dans l'atoll de Tikehau;
- l'oxygène libre est présent de 1 à 20 m avec un potentiel Redox positif; plus bas l'oxygène est indétectable et le potentiel Redox est de -120 mv;
- les valeurs de nitrates varient de 1 à 3 mmole/m³ dans la partie supérieure du récif; au dessous de 30 m, NH₃ est la seule forme d'azote observée (7.6 mmole/m³);

of deep oceanic water ascending towards the top of the atoll. From the oceanic $\Delta^3\text{He}$ profile, it corresponds to a recharge depth of about 700-800 m, depth for the oceanic waters penetrating the atoll, which is in good agreement with above nutrient data.

Tahiti barrier reef interstitial water

A 50 meters hole drilled in April 1990 through the barrier reef (north of Tahiti: 17°30 S, 150°W) enable us to sample and analyse interstitial water properties (10 parameters) on a monthly basis. Water is pumped by peristaltic device at 7 levels : 50, 40, 30, 20, 10, 5 and 1 meter.

The first set of data clearly show :

- interstitial water is nutrients rich when compared with lagoonal and oceanic mixed layer (0-100 m);
- mean nutrients values at 30 m depth are significantly superior to what they are at the same depth in Tikehau atoll.
- free oxygen is present from 1 to 20 meters depth along with positive Redox potential. Under 20 m, oxygen is undetectable and Redox potential is -120 mv;
- nitrate values are 1 to 3 mmole/m³ in the reef upper part ; under 30 meters depth ammoniac is the only

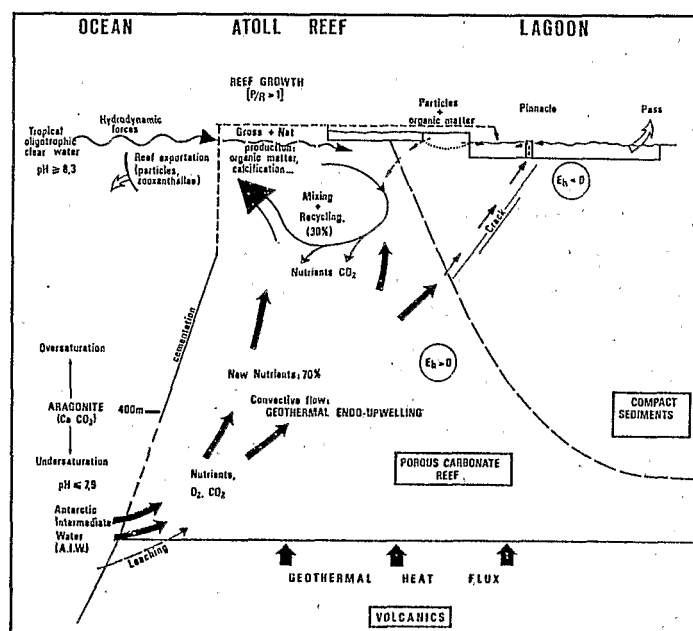


Figure 4. Représentation schématique des processus de convection, de mélange et de recyclage à l'intérieur du socle calcaire de l'atoll. Figure 4. Schematic representation of convective, mixing and recycling processes inside atoll carbonate pile.

- les silicates dissous sont très élevés à chaque niveau et atteignent 80 mmole/m³ près du fond du forage. Ces données peuvent servir à dresser une première approche du schéma de fonctionnement du récif barrière :

- l'eau interstitielle de la partie supérieure du récif (0 à 20 mètres) subit un mélange dynamique avec l'eau océanique de surface injectée dans la matrice récifale par l'énergie des vagues (Fagerstrom, 1987);

- l'eau interstitielle (30 à 50 mètres) pauvre en oxygène et riche en ammonium est caractéristique de l'eau présente dans la matrice profonde du récif. Cette eau provient certainement des couches volcaniques présentes sous la couverture calcaire dont l'épaisseur ne doit pas dépasser 150 m (pour Tahiti, île de 1 m.a.).

nitrogen form to be found (NH₃ = 7.6 mmole/m³).

- dissolved silicate are very high at each level and reach 80 mmole/m³ at the bottom of the hole.

These data can be used to draw a first approach of this barrier reef functioning :

- the upper reef (0-20 meters) interstitial water undergoes a dynamic mixing with surface oceanic water pushed into the reef matrix by wave energy (Fagerstrom, 1987).

- the interstitial water (30 to 50 m) oxygen depleted and ammoniac rich represent the main bulk of the water soaking the deep reef matrix. This water can be originating from the volcanics underlying the carbonate pile whose thickness is thought to be no more

- cette circulation convective vers le haut au travers du socle volcanique semble la seule explication permettant d'expliquer la très grande concentration en silicate ($S > 80$)

than 150-200m (for Tahiti, 1 million years old)
- that upward convective circulation through the volcanics seems the only possibility to take into

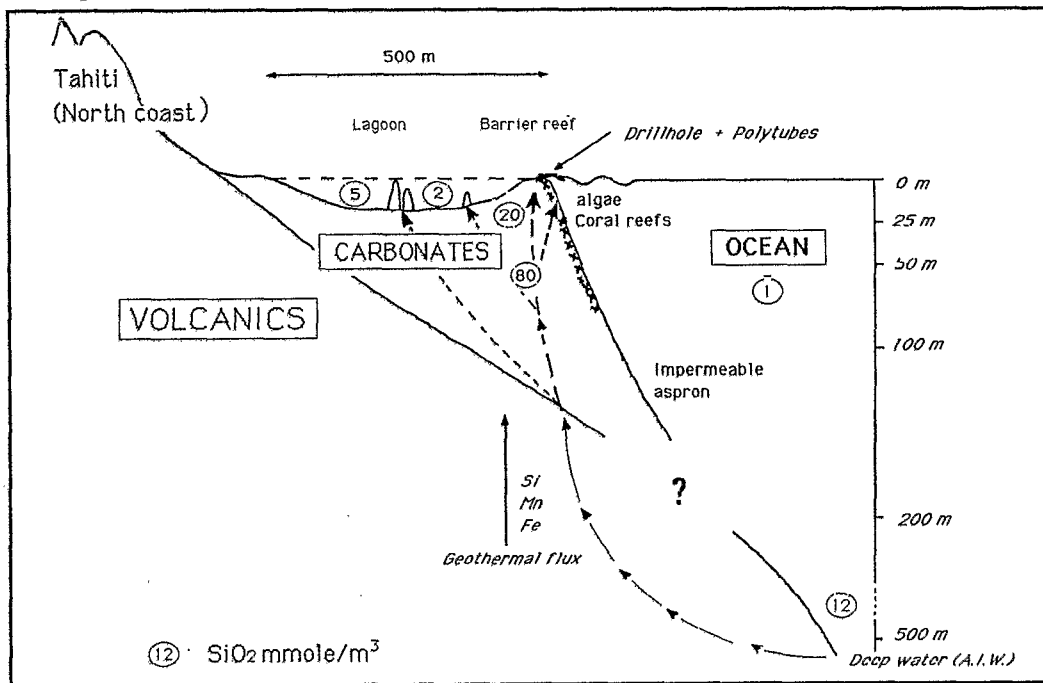


Figure 5. Circulation simplifiée au travers des structures volcaniques puis calcaires par endo-upwelling géothermique.
Figure 5. Alleged circulation through volcanics then carbonates by geothermal endo-upwelling.

mmoles/m³) mesurée à 30-50 mètres;

- il est suggéré que ce flux convectif prend son origine dans la couche océanique profonde entourant l'île et qu'il pénètre les formations volcaniques subariennes très perméables (Rougerie & Wauthy, 1988);

- ce type de circulation à travers les basaltes est semblable à ce qui est décrit par Mink (1964) et Souza & Woss (1987) à Oahu (archipel des Hawaii). De futurs dosages de Mg, Fe et Mn, présents dans cette eau interstitielle, devraient fournir des indices complémentaires sur le fonctionnement exact de ce processus d'endo-upwelling mixte qui se déroule pour partie dans des roches volcaniques, pour partie dans des roches carbonatées (fig.5).

account the huge silicate content ($S > 80$ mmole/m³) measured at 30-50 meters.

- it is alleged that this convective flow find its origin in the deep oceanic layer surrounding the island where AIW penetrates inside the rather permeable subaerial volcanics (Rougerie & Wauthy, 1988).

- this kind of circulation inside volcanics is equivalent to that described by Mink (1964) Souza & Woss (1987) in Oahu. Planned measurements of Mg, Fe, Mn present in this interstitial water would give complementary clues on the exact pattern of this mixed endo-upwelling process that occurs partly in volcanics and partly in carbonate (fig. 5).

Références

- Aissaoui, D.M., Buigues, D. & Purser, B.A., 1988. Marine lithification and dissolution in the periphery of Mururoa atoll, French Polynesia. *Proc. 6th Intern. Coral Reef Symposium, Townsville Australia 1988* : 541-546.
- Fagerstrom, A., 1987. The Evolution of Reef Communities, J. Wiley ed. New-York : 600 pp.
- Feely, R.A. *et al.*, 1987. Distribution of chemical tracers in the Eastern equatorial Pacific during and after the 1982-83 el Nino. *J. Geophysical Res.* 92 (C6) : 6545-6558.
- Guilcher, A., 1988. Coral Reef Geomorphology, John Wiley ed., Chichester : 228 pp.
- Jean-Baptiste, P., Andrié, C. & Lelu, M., 1988. A tool for oceanography. In : Radionuclides, Elsevier, London : 45-54.
- Le Borgne, R., Blanchot, J. & Charpy, L., 1989. Zooplankton of the atoll of Tikehau and its relations with particulate matter. *Marine Biology* 102 : 341-353.
- Lupton, J.E. & Craig, H., 1981. A major helium-3 source at 15°S on the East Pacific Rise. *Science* 214 : 13-18.
- Mink, J.F., 1964. Groundwater temperatures in a tropical island environment. *J. Geophysical Res.* 69 (24) : 5225-5230.
- Ostlund, G.H., Craig, H., Broecker, W.B. & Spencer, D., 1987. *Geosecs Atlantic, Pacific & Indian ocean exped., NSF, Wash. DC* 7 : 200 pp.
- Rougerie, F. & Wauthy, B., 1986. Le concept d'endo-upwelling dans le fonctionnement des atolls-oasis. *Ocean. Acta* 9 : 133-148.
- Rougerie, F. & Wauthy, B., 1988. The endo-upwelling concept : a new paradigm for solving an old paradox. *Proc. 6th Intern. Coral Reef Symp., Australia* : 21-26.
- Rougerie, F. & Wauthy, B., in press. The endo-upwelling concept: from geothermal convection to reef construction. *Coral Reefs*.
- Samaderi, G., Dallot, P. & Roche, R., 1985. Atoll d'Eniwetok. Système géothermique insulaire à l'état naturel. *La Houille Blanche* 2 : 143-151.
- Souza, W. & Voss, C.I., 1987. Analysis of an anisotropic coastal aquifer system using variable-density flow and solute transport simulation. *J. Hydrology* 92 : 17-41.
- Swartz, J.H., 1958. Geothermal measurements. Eniwetok and Bikini atolls. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 260-U : 711-739.
- Wauthy, B., 1986. L'environnement océanique physique dans la zone de la CPS-PNUE. *Rap. mers régionales* 83: 91 pp.