

Une nouvelle hypothèse sur la genèse des phosphates d'atolls : le rôle du processus d'endo-upwelling

Francis ROUGERIE et Bruno WAUTHY

Résumé — Les hypothèses traditionnelles sur l'origine des dépôts de phosphate (apatite) des îles coralliennes ont toujours été peu convaincantes, en particulier celle faisant intervenir le guano issu des déjections des oiseaux de mer. La présence d'éléments chimiques exogènes ayant coprécipité avec l'apatite, l'âge des gisements et les tonnages en place nous conduisent à interpréter cette phosphatogenèse comme une conséquence logique du processus d'endo-upwelling pour des atolls en phase de fermeture.

The formation of phosphate deposit atop atolls as a consequence of the endo-upwelling process

Abstract — Traditional hypotheses on phosphate (apatite) deposits atop uplifted coral atolls have been questioned for a long time. The guano deposit-alteration model is particularly unconvincing, owing to the very scarce bird population in oligotrophic oceans and to the presence inside apatite of chemical elements such as zinc or fluor [1], present neither in guano nor in coral sediments. The considerable bulk of this high-grade ore and new datings giving an age older than hundreds of thousand years [5] lead us to interpret this phosphatogenesis as a consequence of our endo-upwelling concept [4] for atolls in a closing phase.

Abridged English Version — Element analysis of rocks and sediments of the Clipperton quasi atoll (10°N, 109°W) [1] has shown phosphate deposits to be mainly hydroxyfluorapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH})$ with several trace elements (Zn, Ni, Ca, La) present neither in guano nor in carbonate rock underneath but plentiful in volcanic material.

Thus the classical hypothesis on origin from bird droppings should be discarded, more particularly since the fluoride content of some 3% is indicative of deposition in a sea water environment [3].

We have proposed endo-upwelling [4], which involves geothermally driven upward transport of nutrient-rich deep ocean water through the structure of the atoll (Fig. 1), to sustain the high level of primary benthic production of the reef ecosystem as a whole in tropical oceanic deserts. Thus deep water is hypothesized as the source of phosphorus to be capitalized in sediments of closing lagoons.

Data from a survey in some polynesian atolls by R. V. Coriolis in 1985 have shown dissolved phosphate concentration in lagoon water increasing with enclosure (Table) : in slightly uplifted atolls where lagoons are completely closed, contents are 10 to 20 times higher than in surrounding surface ocean.

In interstitial water of lagoon sediments inorganic phosphate contents are even higher and precipitation of apatite could occur. Apatite layers have been found in the Niau closed atoll lagoon under organic-matter-rich anoxic mud; in the Mataiva reticulated atoll lagoon [2] dredging has uncovered apatite deposits beneath several meters of skeletal carbonate material topped by lime mud between reef constructions of the partitioning network.

Phosphorites seem to have resulted from phosphatic diagenesis which has affected all the carbonated sediments *in situ* in a marine environment both organic-rich and oxygen-poor. The phosphate deposits composed of unconsolidated material filling solution cavities and sinks of the karstic carbonate basement found in elevated atolls would then have resulted from

Note présentée par Maurice FONTAINE.

subaerial erosion and spatial relocation following uplift (*Fig. 2*); datings by $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ for Makatea apatite [5] give a minimum age of 800,000 years, implying a phosphate deposition prior to uplift.

Data from the Niue elevated atoll indicate that metals derived by leaching of the volcanic pedestal several hundred meters beneath ocean level are transported with endo-upwelled water and involved in the diagenesis through the carbonate sequence [6].

Des analyses élémentaires effectuées par Bourrouilh Le Jan et coll. [1] sur du phosphate du presqu'atoll de Clipperton (10°N , 109°W) montrent que celui-ci contient des éléments chimiques qui ne sont présents ni dans le guano ni dans le soubassement corallien. Bien que les éléments (Zn, Ni, Ga, La, Mn) soient seulement présents en quantités minimales ils permettent à juste titre à ces auteurs de rejeter l'hypothèse selon laquelle ces phosphates pourraient provenir de l'altération d'un guano plus ou moins ancien; ils font alors intervenir une altération de matériel volcanique accumulé (cendres, ponces), ou en place (roches basaltiques). D'autres auteurs [2] évoquent une dégradation anaérobie de la biomasse piégée dans les lagons en voie d'assèchement mais dans ce cas la charge totale en phosphore sous forme organique et minérale ne fournirait que quelques grammes d'apatite par mètre carré de lagon asséché. On est donc loin des tonnages rencontrés dans les atolls comme Makatea, où le gisement avait une épaisseur de plusieurs mètres et a fourni plus de 10 millions de tonnes de minerai d'une teneur minimale en P_2O_5 voisine de 37 %. Ce minerai constitué d'hydroxy fluoro-apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH})$, possède en outre une teneur en fluor de l'ordre de 3 %, ce qui n'est pas explicable par les hypothèses précédentes mais implique un contact avec l'eau océanique [3].

APPLICATION DU MODÈLE D'ENDO-UPWELLING. — La prise en compte du modèle d'endo-upwelling récemment proposé par Rougerie et Wauthy [4] permet d'apporter au problème de la genèse des phosphates une autre solution. Ce modèle est basé sur un processus d'ascension verticale d'eau interstitielle originaire des niveaux océaniques profonds se réchauffant sous l'action du flux géothermique émis par le substrat basaltique sous-jacent. La convection ainsi créée à l'intérieur du socle corallien poreux se traduit par la sortie d'eau interstitielle riche en nutriments dans les zones à forte porosité de la couronne extérieure de l'atoll et secondairement à l'intérieur du lagon (*fig. 1*): la croissance des madrépores et des algues symbiotiques est ainsi assurée dans des eaux océaniques le plus souvent oligotrophes.

On constate par ailleurs que les teneurs en phosphate dissous et particulaire sont plus élevées dans les lagons fermés que dans les lagons communiquant avec l'océan par des passes. De plus les teneurs en phosphore des eaux interstitielles présentes dans les sédiments lagunaires sont extrêmement élevées puisqu'elles peuvent atteindre plusieurs fois celles de l'océan profond (tableau).

L'élément phosphore ainsi apporté par le flux d'eau interstitielle tend à s'accumuler et à précipiter selon un processus où intervient une diagenèse des carbonates en place : cas des lagons de Mataiva [2] et Niau, par exemple (*fig. 2*). Ainsi le fond du lagon de Niau, atoll fermé légèrement soulevé (+7 m), est actuellement occupé par un dépôt d'apatite recouvert par des boues anoxiques riches en matières organiques. Lors du soulèvement d'un atoll et de l'assèchement du lagon la masse du gisement d'apatite sublagonaire peut donc être considérée comme définitivement acquise : coupée de sa source et placée dans des conditions physiques nouvelles elle subit alors des réarrangements qui conduisent

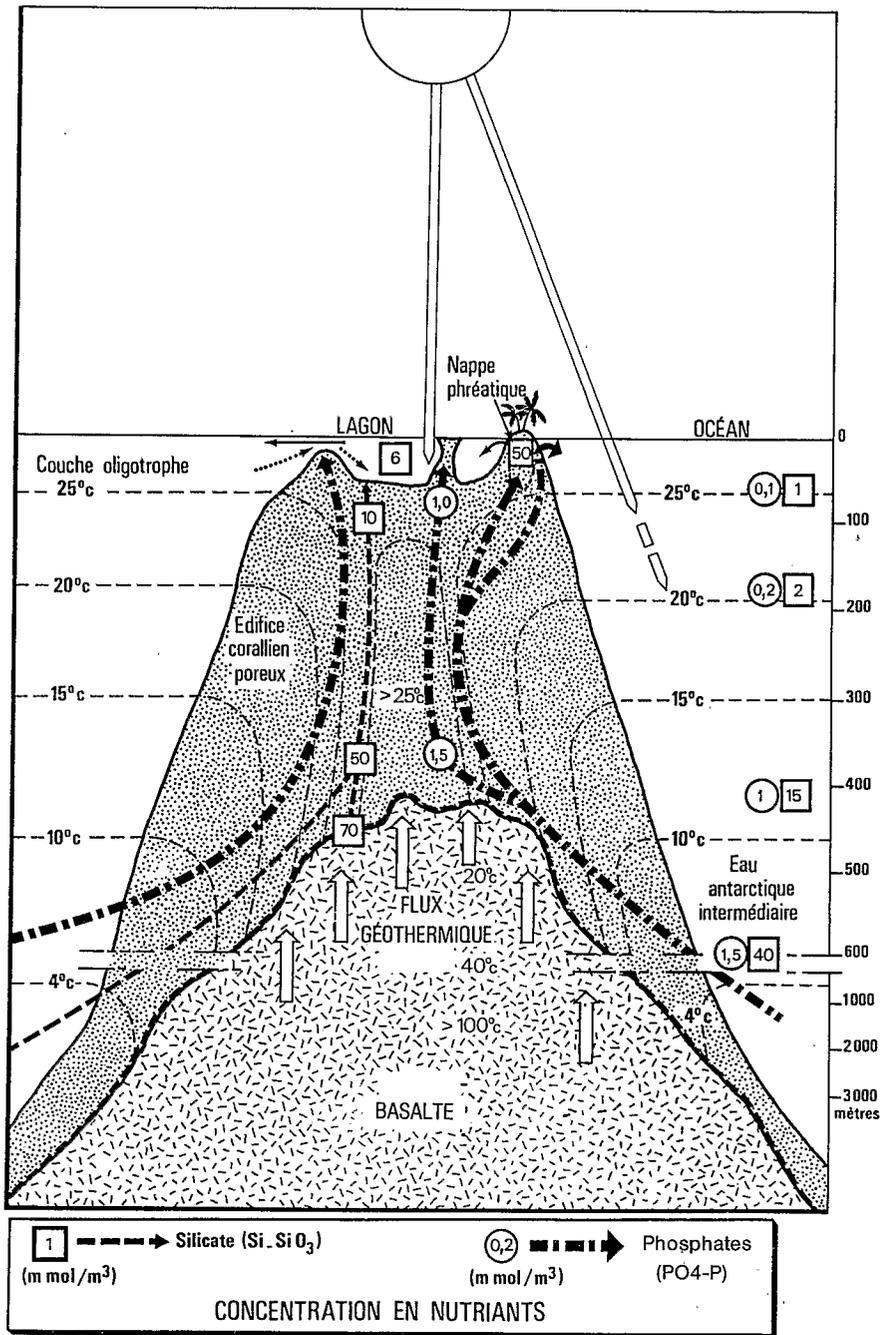
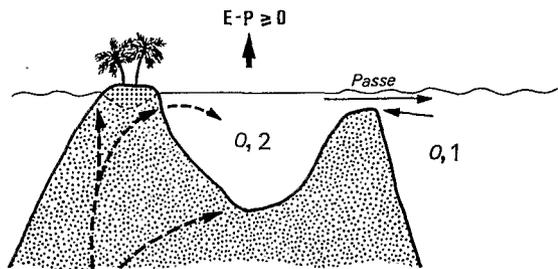


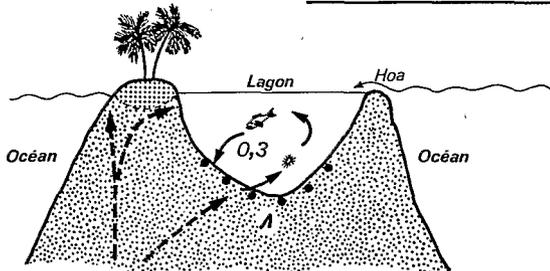
Fig. 1. — Endo-upwelling géothermique. — Représentation schématique des interactions entre le moteur géothermique, l'eau interstitielle et les zones à forte productivité récifale.

Fig. 1. — Geothermal endo-upwelling. — The geothermally driven internal ocean water circulation in an atoll and the relations between nutrient-rich upwelled water, high organic production and coral reef building localization.



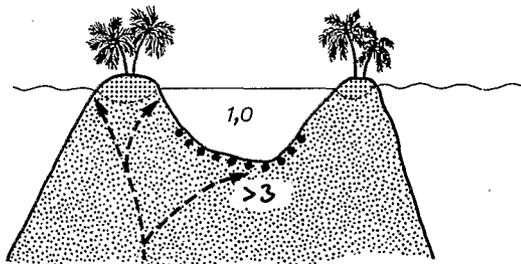
Atoll ouvert: **TIKEHAU**
(148°10'W-15°00'S)

Perte de nutriments (dissous et particulaires)
par la passe.



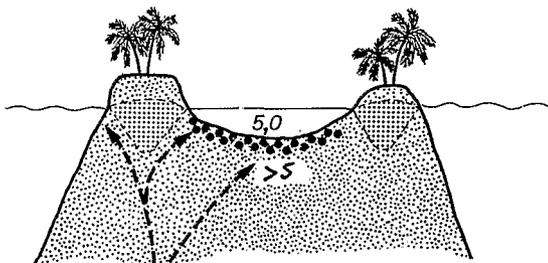
Atoll presque fermé: **TAKAPOTO**
(145°20'W-14°40'S)

Arrêt des pertes en nutriments.



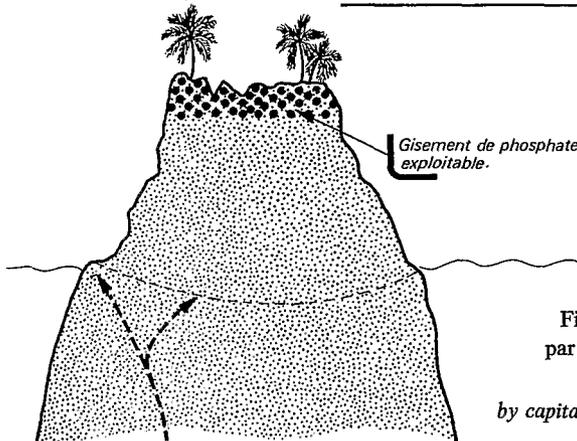
Atoll totalement fermé: **TAIARO**
(144°40'W-15°45'S)

Augmentation des teneurs en nutriments
des eaux interstitielles et accumulation
de phosphore.



Atoll fermé et légèrement soulevé: **NIAU** (+ 7 m)
(146°22'W-16°10'S)

Précipitation de phases insolubles et
phosphatogénèse.



Atoll soulevé: **MAKATEA** (+100m)
(148°20'W-15°50'S)

âge \geq 800.000 ans

Fig. 2. — Formation d'une couche de phosphate insoluble (apatite)
par capitalisation du flux de nutriments en zone sublagonaire anaérobie.
Fig. 2. — Formation of insoluble phosphate layer (apatite)
by capitalization of endo-upwelled nutrients inside sublagoonal anaerobic sediments.

0,3 Concentration de $PO_4 P$ en $mmol/m^3$

TABLEAU

Teneurs en phosphate dissous de quelques eaux polynésiennes (lagons et océan).

Données de la campagne TATU, du N.O. Coriolis, 1985.

*Inorganic dissolved phosphate. Contents in different polynesian waters (lagoons and ocean).**Data from TATU Cruise by R.V. Coriolis, 1985.*

	Lagon ouvert (TIKEHAU) eaux libres	Lagon fermé (TAIARO) eaux libres	Eau interstitielle (-30 cm) (sédiment)	Océan Tropical (0-100 m) (500 m) eaux libres	
PO ₄ -P (mmol/m ³) ..	0,2	0,5 à 2	1 à 5	0,1	1,5

progressivement à la mise en place des « poches » d'apatite nichées dans les parties hautes de la structure calcaire karstique.

Ce processus de phosphatogenèse est confirmé par les datations les plus récentes basées sur l'équilibre ²³⁴U/²³⁸U qui montrent que de nombreux gisements ont un âge supérieur à plusieurs centaines de milliers d'années [5]. Ainsi les phosphates de Makatea (15°30S, 148°30W) ont un âge minimal de 800 000 ans, probablement antérieur à la date de soulèvement de cet atoll (+ 100 m) et à l'assèchement définitif de son lagon. La formation *in situ* du gisement d'apatite serait ainsi le résultat d'un processus diagénétique lié à un flux continu d'eau océanique profonde transportant du phosphore à travers la structure carbonatée. Au contact des roches basaltiques sous-jacentes ce flux océanique de pénétration peut se charger des oligoéléments décelés dans les phosphates et dans certaines dolomites, comme dans l'atoll soulevé de Niue [6].

Note remise le 18 novembre 1988, acceptée après révision le 3 février 1989.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. G. BOURROULH LE JAN, J. L. CARVIN, O. M. NIAUSSAT et Y. THOMMERET, *Sci., Géol., Mém.*, 77, p. 109-123, Strasbourg, 1985.
- [2] B. DELESALLE, *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, 1, Tahiti, p. 269-322, 1985.
- [3] P. N. FROELICH, K. H. KIM, R. JAHNKE, W. C. BURNETT, A. SOUTAR et M. DEAKIN, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, p. 1605-1612, Pergamon Press, 1983.
- [4] F. ROUGERIE et B. WAUTHY, *Oceanologica Acta*, 9, n° 2, 1986, p. 133-148.
- [5] H. VEEH, *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, 3, Tahiti, 1985, p. 463-469.
- [6] P. AHARON, R. A. SOCKI et LUI CHAN, *Journal of geology*, 95, 1987, p. 187-203.

O.R.S.T.O.M., B.P. n° 529, Papeete, Tahiti.