

Fonctionnement des récifs coralliens et atolls du paradoxe au paradigme

par Francis ROUGERIE

*Océanographe, Directeur de Recherche
ORSTOM - Centre de Papeete*

19 DEC. 1995

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

N° : 42898 ex 1.

Cote : B

P23
M

ORSTOM Documentation



010000834

NAUFRAGES ET CONTROVERSES

Crains et décrits depuis toujours par les marins comme de redoutables pièges à bateaux, les récifs coralliens et les atolls ont été également sources de longues controverses pour les scientifiques. Les premiers circumnavigateurs qui traversèrent le Pacifique payèrent souvent du prix de la perte de leur navire le droit de passage à travers les atolls de Polynésie. Ce fut le cas du Lieutenant de Magellan, S. Del Cane sur un atoll des Tuamotu de l'Est en 1520 puis de Roggenveen (le "découvreur" de l'île de Pâques) sur l'atoll de Takapoto en 1722.

C'était l'époque où les naturalistes s'opposaient avec passion sur la nature biologique des coraux. Pour J.A. Peyssonnel (1694-1759), les coraux appartenaient au règne animal, ce que contestaient avec force ses confrères de l'Académie des Sciences qui tenaient que du fait que "les coraux fleurissent sous la mer", ils appartenaient au monde des végétaux. Bien des siècles plus tôt, le géographe grec Strabon (-58 +21) penchait en ce sens lorsque, longeant les côtes arides de la Mer Rouge, il notait "Tout au long des côtes et s'étendant vers les profondeurs, poussent de petits arbres marins, totalement recouverts à marée haute...".

De nos jours et bien que la liste des épaves empalées sur les récifs coralliens continue de s'allonger (1 à 2 par an pour la seule Polynésie), des questions fondamentales continuent d'agiter la communauté scientifique dite "récifale", et en premier lieu celles portant sur les mécanismes internes qui contrôlent le métabolisme des coraux et la croissance des récifs-barrières et atolls. Ceux-ci apparaissent, au sein du champ océanique monotone, comme des singularités géomorphologiques aux dimensions très variables (5 à 1 600 km² pour les atolls des Tuamotu) et à la distribution aléatoire (Fagerstrom, 1987).

FONCTIONNEMENT DES RÉCIFS CORALLIENS ET ATOLLS

Les récifs-barrières et atolls de Polynésie Française constituent, à l'échelle de l'océan pacifique, des singularités bio-géochimiques résultant de la croissance/calciification des colonies algo-coralliennes à partir d'un support basaltique, anciennement volcanique. Le fait que ces récifs puissent prospérer au sein d'un océan tropical très pauvre en sels nutritifs et planctons, constitue un paradoxe qui pourrait être résolu par le modèle de fonctionnement par endo-upwelling géothermique (Rougerie et Wauthy, 1986-1993).

Ce modèle est basé sur une pénétration d'eau océanique profonde, riche en nutriments, à l'intérieur de l'édifice récifal, à sa circulation vers le haut par thermo-convection et à sa sortie au niveau de la couronne récifale externe, battue et nettoyée par les houles océaniques. D'autres implications géochimiques comme la phosphatogénèse, la dolomitisation ou la séquence évolutive atoll-guyot (atoll ennoyé) peuvent être prises en compte par ce modèle qui pourrait ainsi constituer un véritable paradigme généralisable à l'ensemble des barrières récifales et atolls.

● Le grand désert océanique tropical

La distribution géographique des coraux bâtisseurs de récifs (hermatypiques) révèle que ceux-ci sont l'apanage de l'océan intertropical, avec une limite inférieure de température de l'ordre de 18° C. L'océan polynésien, dont les températures oscillent entre 20 et 30° C (couche de surface) en fonction des saisons et surtout des latitudes, a donc des caractéristiques thermiques favorables au développement des récifs coralliens, jusques et y compris autour de l'île la plus méridionale, Rapa (28° S). Quant à la salinité des eaux, elle ne pose pas de problème, étant comprise en zone polynésienne entre 36,5 et 35,5 ups (unité pratique de salinité). De grandes fluctuations peuvent cependant être observées dans les lagons semi-fermés ou fermés, en fonction du bilan évaporation/précipitation/ruissellement local.

Au plan de sa richesse en sels nutritifs dissous et de sa fertilité primaire, l'océan polynésien se place tout en bas de l'échelle planétaire : les teneurs en nutriments (phosphates, nitrates, silicates) de la couche éclairée, dite couche euphotique (0-150 m) sont très faibles, à la limite de détection analytique. Or, sans ces nutriments, indispensables à toute production de matière organique (fonction autotrophe), phytoplancton et zooplancton ne peuvent se développer. Cette carence en nutriments, ou oligotrophie, est d'ailleurs une caractéristique générale des océans tropicaux et explique la clarté de leurs eaux : l'océan polynésien est justement réputé pour l'extrême transparence de ses eaux, le fameux "bleu des mers du sud". Mais ce bleu est pour l'océan synonyme de désert, comme le jaune-ocre l'est pour le sable des déserts continentaux.

En fait, un énorme réservoir de nutriments existe dans l'océan profond, à partir de 500 mètres de profondeur, mais aucun mécanisme ne permet, en zone polynésienne, de faire migrer ces eaux riches jusque dans la couche éclairée. Lorsque du fait de la présence d'un continent (Pérou) ou le long de la ligne équatoriale (divergence), les effets conjugués vent-courant permettent de faire remonter les eaux profondes, riches en nutriments, vers la surface, ce processus appelé "upwelling", se traduit par une très forte production primaire des eaux. C'est ainsi que, bien que ne concernant que quelques % de la superficie de l'océan mondial, les upwellings sont à l'origine de 80 % de sa production (Wauthy, 1986).

L'océan polynésien ne peut bénéficier de ces processus d'enrichissement par upwelling du fait de sa stratification permanente : la couche de surface (9-150 m), chauffée par le soleil, flotte au-dessus des eaux plus profondes dont elle est séparée par une épaisse barrière de densité qui s'étale entre 150 et 500 m, profondeur à partir de laquelle se trouve l'Eau Antarctique Intermédiaire. On a donc un océan à 2 couches avec une couche chaude et oligotrophe de surface bien séparée de la couche profonde, froide et riche en nutriments. (Rancher et Rougerie, 1992).

● Récifs coralliens et atolls-oasis

Les colonies coralliennes se présentent sous forme de massifs plus ou moins élancés, où dominent les teintes marron et verte. Ces colonies qui représentent une quarantaine d'espèces différentes en Polynésie, sont issues du métabolisme des petits polypes coralliens, dont les tentacules ont la capacité de capturer des proies planctoniques (fonction hétérotrophe) ; ce sont donc bien des animaux, comme le pensait Peyssonnel, mais ce sont surtout des animaux symbiotiques puisque chaque cm³ de polype abrite des millions de micro-algues symbiotiques, les zooxanthelles, dont le rôle est déterminant dans la croissance des colonies : la photosynthèse de matière organique, assurée par les zooxanthelles, fait qu'en définitive la fonction autotrophe

est prépondérante, et ce d'autant plus que l'océan est pauvre en proies planctoniques. Le développement des zooxanthelles est conditionné à la fois par l'énergie lumineuse incidente, et donc par la transparence des eaux qui baignent les récifs, et par la disponibilité du milieu en nutriments ; la première condition est aisément remplie dans les eaux polynésiennes, mais pas la deuxième, et pourtant récifs et atolls y sont particulièrement prospères. Il existe par ailleurs une corrélation étroite entre le taux de production primaire des zooxanthelles et la vitesse de calcification des coraux, i.e., la vitesse de construction du squelette calcaire externe (celui qui subsiste après la mort des colonies). Les chiffres qui expriment ces productions sont d'ailleurs impressionnants et situent les récifs coralliens tout en haut de la gamme de production des écosystèmes de notre planète : 9,5 à 1 kg de matière organique fixée par m²/an et 4 à 8 kg de calcaire (Ca CO₃) fixé par m²/an. Les puissantes murailles récifales et atolls ainsi construits par les colonies algo-coralliennes constituent de fabuleuses oasis de vie pour une faune très diversifiée (poissons, crustacés, échinodermes, etc...) qui y trouve refuge et nourriture. Bien qu'à cette prédation d'ordre biologique s'ajoutent les destructions et pertes de matière du fait des houles, tempêtes et cyclones, les récifs réussissent l'exploit de croître en permanence pour se maintenir "au ras des vagues", et ce malgré la grande pauvreté/oligotrophie de l'océan environnant. (Laboute *et al.*, 1994).

● Le paradoxe de Darwin

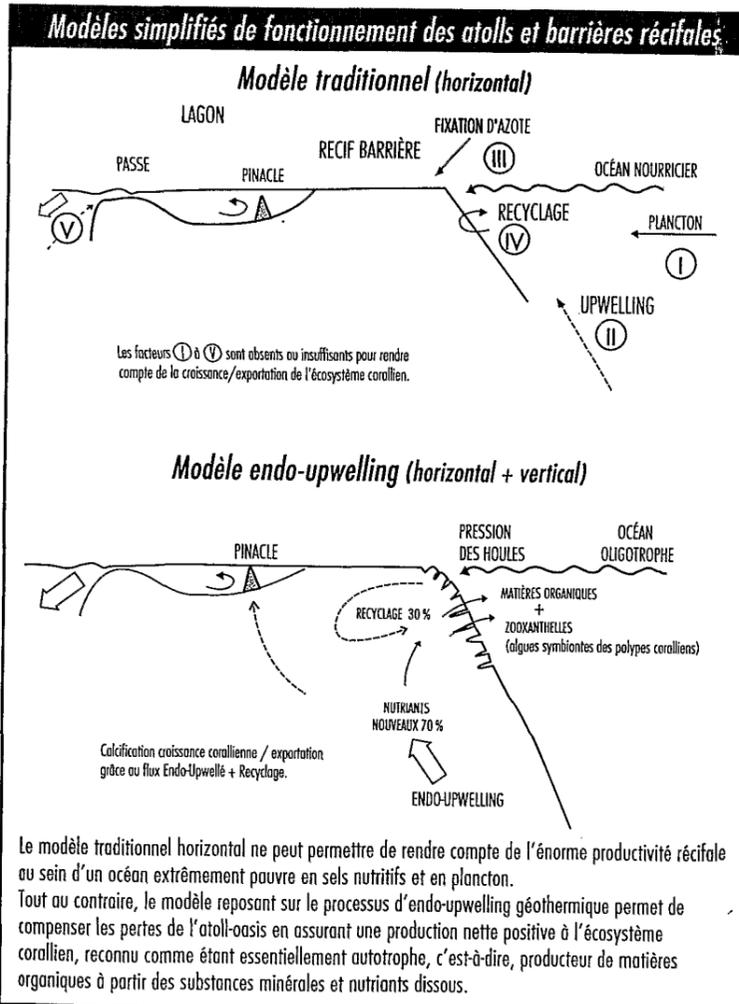
Les coraux semblent donc proliférer d'autant mieux que les eaux océaniques sont chaudes, pauvres, claires et agitées, ce qu'avait déjà noté Darwin lors de son passage à Tahiti en 1842.

Il y a donc là un paradoxe fondamental qui peut s'exprimer au plan quantitatif par l'impossibilité apparente d'équilibrer le bilan entrée/sortie des éléments nutritifs contrôlant le métabolisme des polypes coralliens. Les campagnes modernes d'océanographie ont permis d'illustrer la réalité de ce paradoxe en confirmant que l'oligotrophie de la couche euphotique océanique se maintient jusque sur la crête récifale battue par les houles : lorsque venant du grand bleu quasi-désertique du large, on s'approche des tombants récifaux et atolls, on passe sans transition de la quasi-absence à la pléthore de vie. Pourquoi donc y a-t-il quelque chose plutôt que rien, et plus précisément d'où viennent les nutriments nécessaires au fonctionnement de l'extraordinaire machine récifo-corallienne ? (Fig.1).

● La solution par endo-upwelling géothermique

Des forages réalisés à partir de 1988 à travers les couronnes récifales de l'atoll de Tikehau (Tuamotu) et du récif barrière

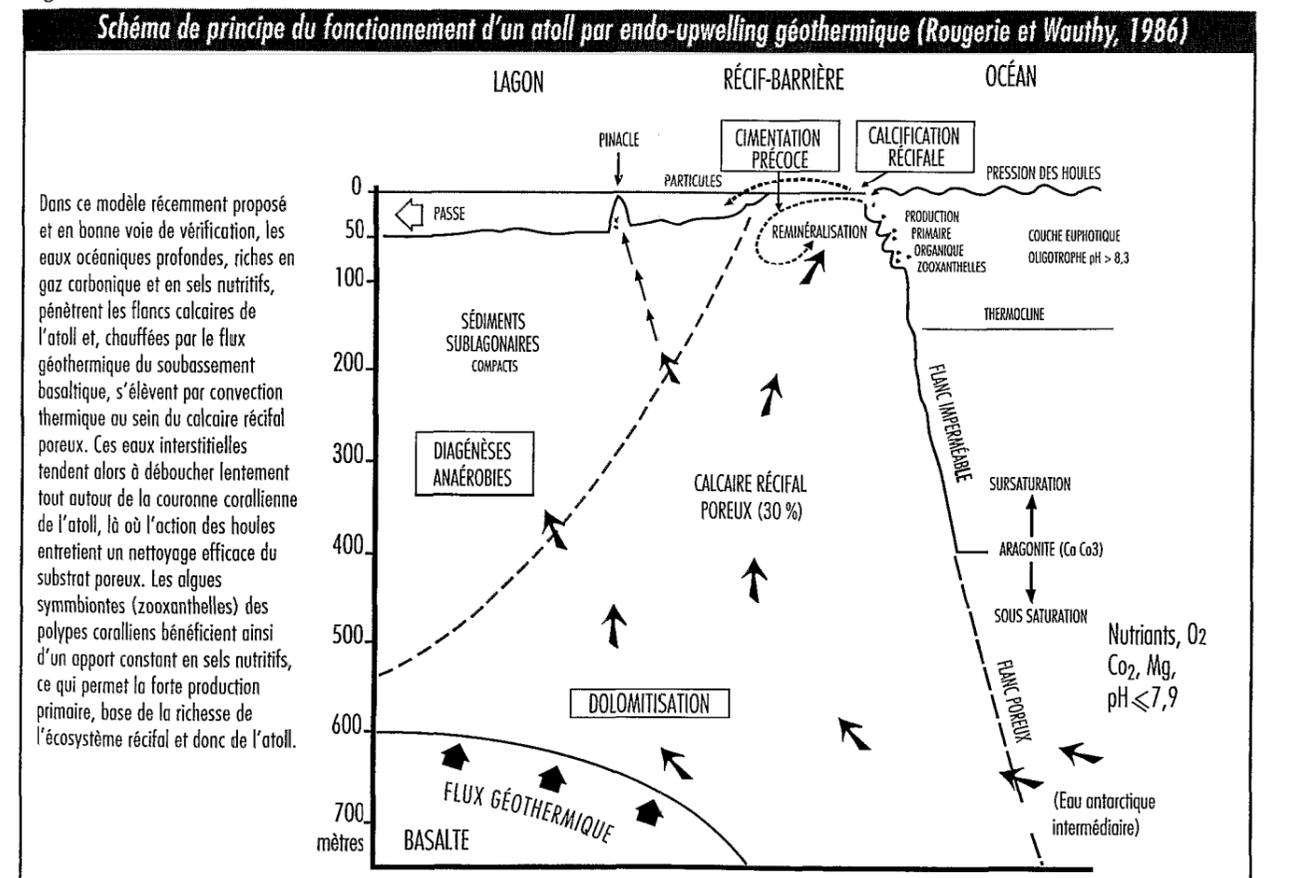
Figure 1



de Tahiti ont permis d'apporter des éléments de réponse déterminants : les analyses faites sur les eaux interstitielles de ces forages (entre 5 et 50 mètres de profondeur) ont révélé la présence de fortes teneurs en nutriments dissous immédiatement utilisables par les zooxanthelles symbiotiques. La découverte de ce réservoir interstitiel de nutriments, au sein du calcaire récifal à forte perméabilité/porosité (30 à 50 %) confirmait des résultats analogues obtenus dans l'atoll de Mururoa au début des années 80. Des analyses de traceurs et marqueurs océaniques profonds (salinité, hélium-3, fréon) ont permis de déterminer que ces nutriments étaient originaires de l'océan profond (Eau Antarctique Intermédiaire). Dans le même temps, plusieurs auteurs américains et français ayant travaillé sur des forages profonds dans les atolls de Eniwetok (Iles Marshall) et Mururoa (Tuamotu) concluaient à l'existence d'une circulation par convection thermique à l'intérieur de ces atolls, sous l'action du flux géothermique émis par le soubassement basaltique, anciennement volcanique (Guille *et al.*, 1993). La synthèse de ces données nous a alors permis de proposer un modèle de fonctionnement récifal par "endo-upwelling géothermique" (Fig.2) : l'eau océanique profonde, froide et riche en nutriments qui pénètre à la base du récif ou de l'atoll est légèrement chauffée par le flux géothermique et s'élève par convection thermique (baisse de densité) jusqu'en haut de la structure ; les zones de sortie de cette eau endo-upwellée sont localisées au niveau de la couronne externe du récif battu et nettoyé par les houles qui empêchent ainsi le colmatage du réseau poreux. (Rougerie et Wauthy, 1990).

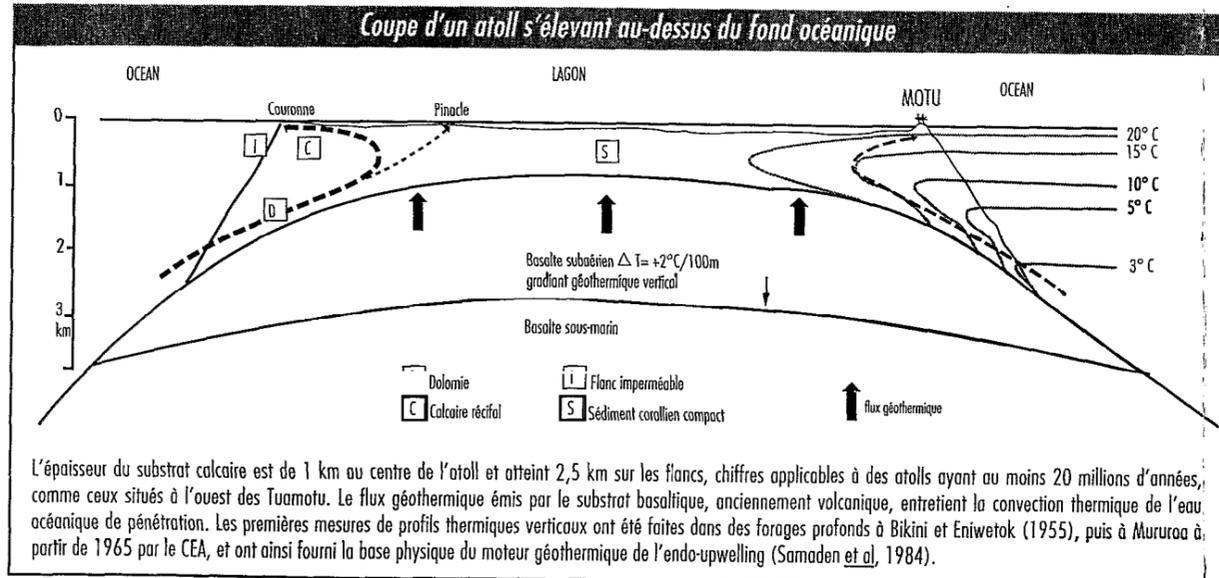
Des sites de sorties secondaires, dépendant du réseau sublagonaire de fractures et de fissures peuvent exister dans les lagons, ce qui rend bien compte de la présence et de la distribution aléatoire de pâtés coralliens et de pinacles (GUILCHER, 1988). Ces structures coralliennes en forme de stalagmites constituent des oasis ponctuels de vie

Figure 2



au sein de vasques lagonaires peu productives et en voie de comblement par les sables calcaires issus de la crête récifale. De nombreux lagons polynésiens sont d'ailleurs complètement fermés, comblés ou soulevés, sans que les caractéristiques géomorphologiques de la muraille récifale qui les enserme en soient altérées. Bien que jouant un rôle important dans l'harmonie de la société polynésienne et paumotu, les lagons sont au plan du fonctionnement global des atolls des structures d'ordre second, condamnés à disparaître par assèchement lors des régressions marines ou des surrections tectoniques (Makatea). La crête algo-corallienne et la pente récifale externe constituent la structure essentielle, d'ordre premier, dont la pérennité est sous la dépendance étroite du flux d'eau interstitielle qui sourd lentement à son niveau ; ce flux entretient, grâce à sa richesse en nutriments, la forte productivité/calcifération récifale mais reste sans effet, du fait d'un énorme facteur de dilution, sur la composition ionique de l'océan de surface ; on rappelle que le maintien de l'oligotrophie de la couche euphotique et donc de la transparence des eaux, est vital pour assurer aux zooxanthelles une énergie lumineuse optimale. Lorsqu'elle atteint la partie supérieure de l'édifice récifal, l'eau interstitielle subit une rapide baisse de pression ce qui entraîne un dégazage en CO_2 et un déplacement de l'équilibre CO_2 -carbonate ce qui favorise la cimentation précoce de l'édifice, en soudant entre eux les blocs coralliens détritiques ; sans ce processus de cimentation précoce un récif serait dans la situation d'un immeuble construit avec du ciment non armé : sa longévité serait brève. D'autres phénomènes géochimiques et diagénétiques affectent la matrice récifale, en fonction de l'intensité et de la composition ionique du flux d'eau interstitielle. En corollaire, on peut donc considérer qu'un récif-barrière ou qu'un atoll constitue un signal bio-géochimique délimitant les sites de sortie d'eau endo-upwellée : ce modèle (Fig. 3) est une solution nécessaire et suffisante au paradoxe de Darwin. (Rougerie and Wauthy, 1993).

Figure 3



● L'énigme des phosphates d'atolls

Des gisements de phosphate pouvant dépasser plusieurs dizaines de millions de tonnes occupent la partie sommitale de certains atolls comblés ou soulevés. Ces gisements exploités depuis le début du siècle, et pour certains épuisés (Makatea), sont composés de fluor-apatite insoluble contenant jusqu'à 35 % de P_2O_5 . Confrontés au problème de l'origine de ces phosphates insulaires ou atolls, les premiers

découvreurs de gisements ne purent faire autrement que de proposer une origine aviaire par analogie avec ce qu'ils connaissaient déjà, i.e., les gisements de guano. Ces gisements résultent à l'évidence de l'accumulation des déjections d'oiseaux de mer dans des zones marines à très forte productivité ; ces zones bénéficient de remontées d'eaux profondes riches en sels nutritifs (upwelling), ce qui entraîne une prolifération planctonique pouvant entretenir de grandes populations de poissons (anchois, sardines), eux-mêmes condamnés par des prédateurs, dont les oiseaux. Les populations aviaires des zones d'upwelling peuvent être énormes (plusieurs dizaines de millions d'oiseaux) et donc fournir chaque année des épaisseurs notables de guano. C'est ainsi que les guanos du Chili ont été massivement exploités et importés en Europe comme source d'engrais azoté et d'explosifs nitrés jusque dans les années 1920. (Ensuite on a découvert la synthèse électrique de l'ammoniac à partir de l'azote de l'air et les explosifs sont devenus nucléaires !).

La richesse de ces guanos aviaires provenait donc (et provient toujours) de leur teneur élevée en composants azotés (ammonium ou nitrate) alors que leur teneur en phosphate est faible et inférieure à quelques %. L'analyse chimique ne permet pas non plus de retrouver dans les guanos la cohorte d'éléments accompagnant le phosphore des fluors-apatites : le fluor est à l'état de trace et d'autres éléments caractéristiques sont absents, comme le zinc, le titane et le bore. De plus, une réfutation majeure du modèle oiseau-guano s'appuie sur le fait que les oiseaux sont apparus au Jurassique (il y a 120 millions d'années) en descendance directe de leurs célèbres ancêtres dinosauriens volants.

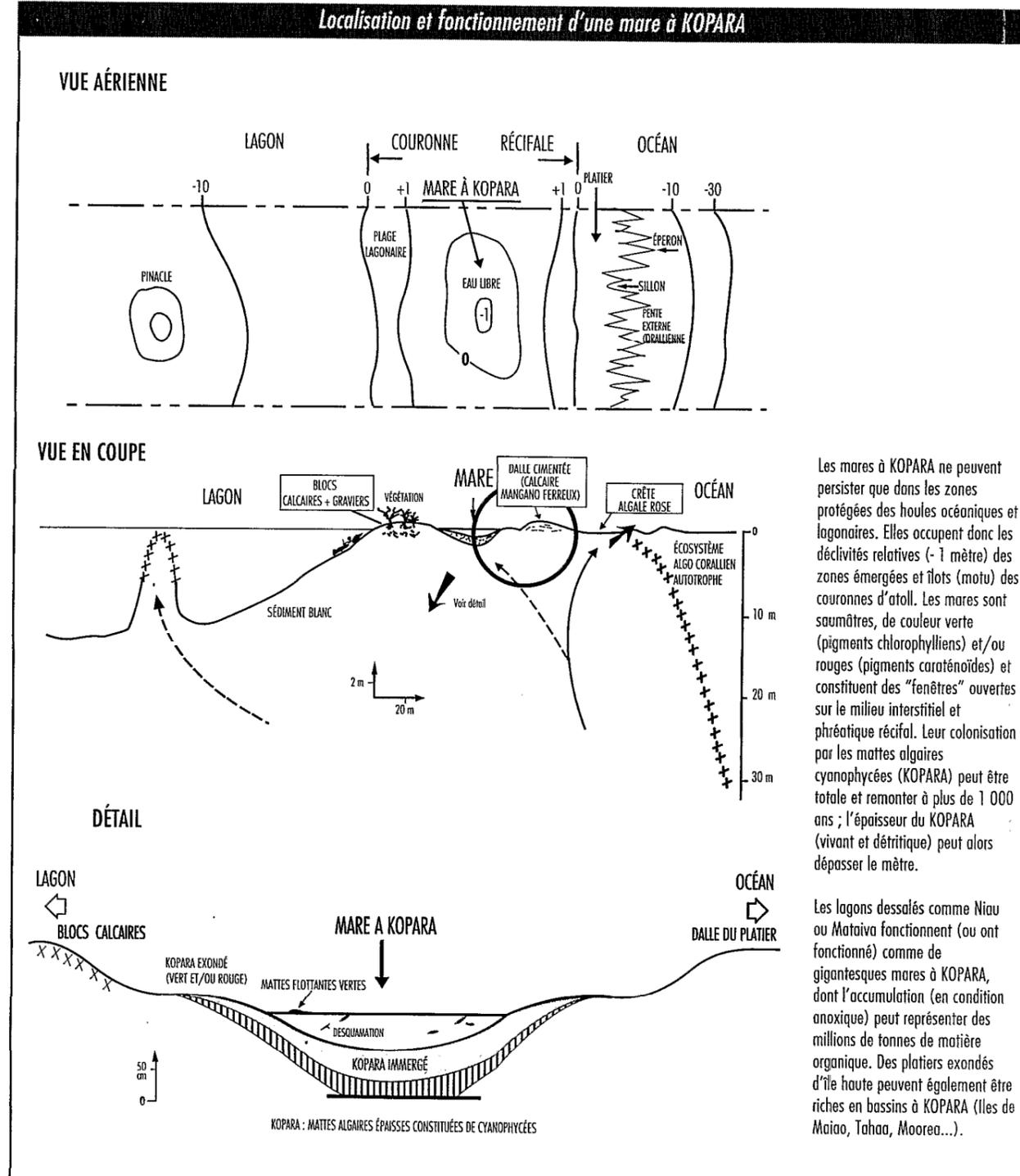
Etant donné l'importance quantitative des gisements de phosphates datés du Cambrien et au-delà, et leur similitude géochimique avec les gisements plus récents, il est évident que le modèle classique oiseau-guano a très sérieusement du plomb dans l'aile. Et notons, pour rappel, que la zone océanique du Pacifique intertropical est occupée par des eaux à très faible productivité, ne pouvant soutenir que de très faibles populations d'oiseaux. Cette situation évidente à Makatea (16° Sud) et même à Nauru (170° E, 0°) perdure depuis plusieurs dizaines de millions d'années et probablement depuis le début de l'Oligocène (36 millions d'années).

Un autre modèle de phosphatogénèse est basé sur la dissolution de basaltes ou de pierres-ponces, processus qui pourrait effectivement fournir quelques éléments de la cohorte géochimique, mais pas tous (notamment déficiences en bore et fluor). De plus, au plan quantitatif, l'impasse est évidente : il faudrait dissoudre ou altérer une épaisseur de roches supérieures à 500 mètres pour obtenir une couche de quelques décimètres de phosphates. Le problème de l'association ultérieure carbonate-phosphate et de leur diagénèse serait également redoutable. Le vide conceptuel découlant des limites de ces modèles traditionnels semble cependant pouvoir être aisément comblé en prenant en compte le modèle de fonctionnement par endo-upwelling. Bien que l'essentiel du flux de nutriments dissous (nitrates et phosphates notamment) soit utilisé par l'écosystème algo-corallien de la crête récifale et de la pente externe, une fraction de ceux-ci peut atteindre les lagons et les nappes phréatiques situées sous les motu (îlots) des atolls, maintenant ainsi la forte productivité de la végétation et de la cocoteraie.

Dans les lagons ouverts sur l'océan les échanges turbulents, ensachages et courants de passe entraînent une dilution constante des nutriments interstitiels libérés, ce qui fait que les eaux lagonaires restent limpides. Dans les lagons fermés et les atolls légèrement soulevés, les teneurs en nutriments croissent avec le temps, le lagon subit un processus d'eutrophisation, les coraux disparaissent et d'épais tapis d'algues se développent sur les fonds. Une précipitation de fluor-apatite peut alors commencer au sein de l'horizon détritique de ces algues cyanobactériennes (appelées kopara en Paumotu), comme c'est le cas actuellement dans le lagon de Niau (Tuamotu) (Fig. 4). L'horizon riche en apatite va croître tant que l'alimentation en phosphore profond par

le processus d'endo-upwelling et donc l'accumulation de kopara est maintenu ; on a donc un gisement se développant au sein de sédiments organiques lagonaires, (lagon de Mataiva) gisement qui pourra éventuellement se trouver à l'air libre dans le cas d'une surrection totale de l'atoll comme à Makatea, Nauru, Christmas (Océan Indien) etc... (Jehl et Rougerie, 1993).

Figure 4



● Autres implications géologiques

Les avantages phénoménologiques de la filière endo-upwelling -kopara-phosphore sont donc évidents aussi bien au plan qualitatif que quantitatif, puisque l'océan profond constitue un réservoir énorme de phosphore et fluor et possède la totalité de la cohorte géochimique. Les tests de validation en cours sur l'atoll de Tikehau et sur le récif barrière de Tahiti, en particulier au moyen de forages de moyenne profondeur (15, 30, 50 et 150 m), tendent à confirmer la pertinence et la robustesse du modèle de fonctionnement par endo-upwelling. Sa généralisation aux zones côtières et marges continentales carbonatées ne pose pas de problèmes spécifiques, en particulier en Floride, où la circulation par thermo-convection a été modélisée il y a 25 ans. D'autres questions portant sur la nature et l'évolution des édifices carbonatés peuvent être abordées sous un angle nouveau, comme par exemple la dolomitisation ; ce processus de transformation du calcaire (carbonate de calcium) en dolomie (carbonate de calcium et de magnésium) peut logiquement résulter de la circulation thermo-convective de l'eau interstitielle : celle-ci, grâce à son pH bas peut dissoudre le calcaire le plus tendre tout en fournissant le magnésium dont l'océan profond est saturé ce qui aboutirait, in fine, à la formation de dolomie. Ces roches, plus résistantes et plus poreuses que les calcaires d'origine, sont connues comme étant d'excellents pièges/réservoirs à pétrole. Dans ce domaine, nous avons pu mettre en évidence l'existence de traces d'hydrocarbures dans les eaux interstitielles de l'atoll de Tikehau, établissant ainsi la possibilité que ces systèmes, récifs et sédiments calcaires sublagonaires, puissent fonctionner comme des réacteurs biologiques. Même si la production actuelle des atolls des Tuamotu n'est pas quantitativement significative, une évolution tectonique et géomorphologique favorable peut, à terme, conduire à une accumulation/piégeage de produits hydrocarbonés : c'est le cas par exemple d'un atoll de l'archipel des Tonga, riche en bitumes et naphtes. Ces processus de thermo-convection, de maturation des matières organiques et d'interactions entre la matrice récifale et l'eau interstitielle conduisent à modifier la composition chimique de celle-ci par rapport à ce qu'elle était (eau océanique profonde) au moment de sa pénétration dans l'édifice : il s'agit donc en définitive, d'un hydrothermalisme de basse énergie. Atolls et récifs barrières constituent à ce titre des oasis hydrothermaux océaniques, dont le fonctionnement est assuré par une cellule de convection interne propre à chaque édifice. Cette remarque peut être utilisée pour expliquer la présence d'atolls ennoyés ou guyots, que l'on trouve par plusieurs centaines de mètres, voire kilomètres de profondeur. Ces anciens atolls ont manifestement perdu la bataille pour se maintenir en surface et ont donc été inexorablement engloutis par la subsidence de l'édifice. Nous proposons que leur mort ait pu résulter d'un arrêt de la croissance/calcification de leur couronne récifale, en réponse à une diminution du flux endo-upwellé, suite à un affaiblissement inopiné du flux géothermique de leur soubassement basaltique.

● Vers un nouveau paradigme

Nous avons donc en définitive une large gamme d'implications biologiques, géochimiques, diagénétiques et géologiques sous la dépendance d'un processus thermo-convectif unique, basé sur 3 contraintes : une structure poreuse et perméable, un flux géothermique sous-jacent, un océan profond contigu (et donc riche en nutriments). Initialement proposé pour rendre compte du paradoxe biologique posé par l'existence de récifs coralliens très productifs au sein d'un désert océanique tropical, le modèle d'endo-upwelling débouche ainsi sur un concept beaucoup plus vaste et pourrait "in fine" constituer un véritable paradigme. L'avenir dira si les résultats des recherches sur les systèmes récifs et atolls extérieurs à la Polynésie tendent à confirmer, ou non, cette conclusion que nous ont offerte les récifs et atolls de Polynésie.

textes réunis pour les
JOURNÉES GEOGRAPHIQUES 1994

Nouvelle-Calédonie

Polynésie Française

Wallis & Futuna

GEO-PACIFIQUE

DES ESPACES FRANÇAIS