

An aerial, black and white photograph of a coral atoll. The image shows a large, roughly circular lagoon in the center, surrounded by a wide, light-colored reef flat. The reef flat is bordered by a dark, narrow strip of reef, which is further out by a deeper, darker lagoon. The overall shape is somewhat irregular but generally circular. The text 'Les atolls' and 'OASIS' is overlaid in the upper left quadrant.

*Les atolls*  
OASIS

par Francis Rougerie  
et Bruno Wauthy

**Au milieu des mornes étendues océaniques, vides et bleutées du Pacifique central sud, les atolls constituent de véritables oasis luxuriantes. Pourquoi une telle exubérance de vie entourée du plus grand désert planétaire? A cette question, Francis Rougerie et Bruno Wauthy proposent aujourd'hui de répondre par un modèle original, fruit d'une longue recherche et qui commence peu à peu, contre vents et marées, à s'imposer parmi les océanographes. Un atoll, tel un gigantesque baobab océanique, puise les substances nutritives de l'océan profond, tandis que la couronne corallienne s'épanouit par photosynthèse au soleil tropical. A l'origine de ce modèle: un nouveau concept au nom barbare « d'endo-upwelling géochimique ».**

Figure 1. Un atoll est une structure calcaire, reposant sur un ancien volcan basaltique qui s'est enfoncé à cause de l'affaissement par subsidence du plancher océanique. C'est en luttant pour rester en zone éclairée que les coraux, constitués de colonies d'animaux fixés (les madrépores), ont par leur croissance compensé cet enfoncement. La photographie ci-dessus représente l'atoll Hiti (Tuamotu du Centre dans le Pacifique sud) qui est le type même de l'atoll circulaire, sans passe vers l'océan. Tous les atolls ont des caractéristiques structurales identiques, mais leur géomorphologie est variable. Plus des deux tiers des atolls des Tuamotu sont dépourvus de passe, certains ont un lagon comblé, d'autres ont été soulevés. (Cliché ORSTOM)

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 31215, ex 1

Cote : B

7 JANV. 1991

VOLUME 21 PAGE 833

**D**ès sa publication en 1842, le modèle proposé par Charles Darwin pour expliquer la formation des atolls suscita une chaude controverse. Il fallut attendre un siècle et les forages profonds effectués sur les atolls de Bikini et d'Eniwetok (îles Marshall) pour que la validité de ce modèle soit définitivement reconnue : un atoll constitue bien une structure calcaire, reposant sur un ancien volcan basaltique ayant émergé quelques millions (ou dizaine de millions) d'années auparavant et s'étant enfoncé avec le plancher océanique (fig. 1). En luttant pour rester en zone éclairée, le corail a pu compenser cet enfoncement par une croissance vers la surface, tandis que s'accumulaient, sous le fin placage de l'écosystème corallien vivant, les centaines ou milliers de mètres d'épaisseur de débris calcaires cimentés ; ces derniers constituent les

récifs barrières. Si le problème de la formation des atolls peut donc être considéré comme résolu, il n'en est pas de même en ce qui concerne leur fonctionnement énergétique et trophique. Comment en effet expliquer la présence de barrières récifales très productives au sein d'eaux océaniques tropicales qui le sont très peu ? Aujourd'hui, au terme d'une longue démarche, nous proposons un modèle original expliquant cet extraordinaire paradoxe ; nous faisons appel à un nouveau processus que nous avons baptisé « endo-upwelling géothermique ». Derrière ce terme un peu barbare se cache un concept qui, nous le verrons, se révèle capable d'expliquer bien d'autres mystères entourant les formations récifales.

Du fait de l'importante énergie solaire qu'il reçoit, l'océan tropical possède une couche de surface chaude et épaisse (cent

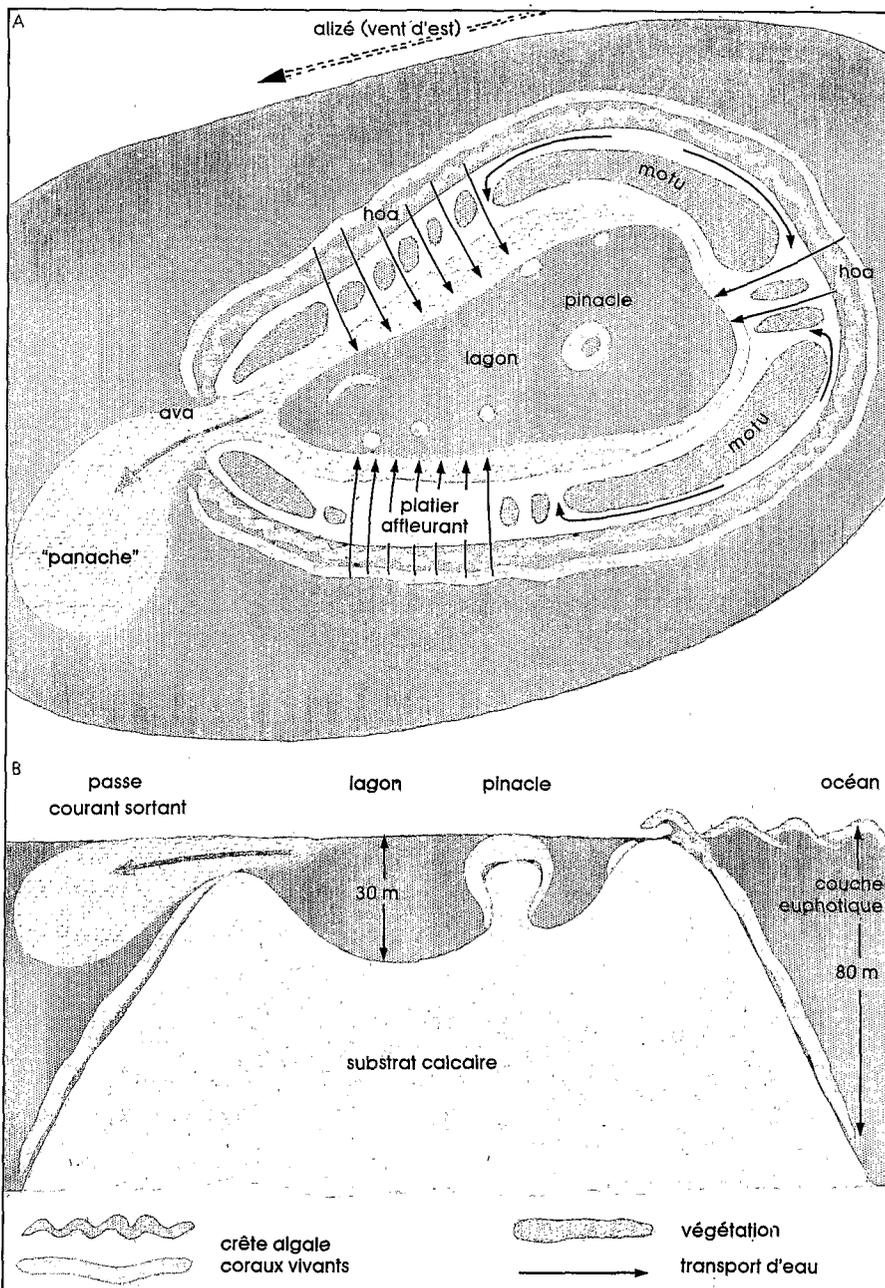
à deux cents mètres) dont la limpidité légendaire traduit la très faible teneur en particules et en plancton. Cette situation est la conséquence d'une productivité primaire faible car limitée par un manque chronique en sels nutritifs dissous. Ceux-ci sont en fait très abondants dans les couches océaniques profondes, à partir de quatre cents mètres, mais ne peuvent remonter vers la couche superficielle éclairée à cause de la stratification thermique permanente qui s'oppose aux échanges verticaux<sup>(1)</sup>. Il existe toutefois des zones océaniques où se produisent des remontées vers la surface d'eaux profondes, selon un processus appelé « upwelling » ; dans ces zones riches en nutriments et en plancton, comme par exemple les eaux côtières du Chili et du Pérou et la bande équatoriale du Pacifique, la productivité primaire peut atteindre 500 g de carbone fixé/m<sup>2</sup>/an. En zone tropicale nord et sud, la productivité est seulement de l'ordre de 30 g de carbone/m<sup>2</sup>/an : les énormes étendues bleu outre-mer constituent ainsi de véritables déserts océaniques.

A cet égard, le plus grand désert planétaire est le Pacifique central sud (quinze millions de kilomètres carrés) qui, dans sa partie polynésienne, possède une suite d'îles basses et de récifs allongée du SE au NW : c'est l'Archipel Dangereux redouté des premiers navigateurs à la voile, aujourd'hui archipel des Tuamotu, qui compte soixante-seize atolls et que le voyageur aborde de nos jours le plus souvent par avion (fig. 2).

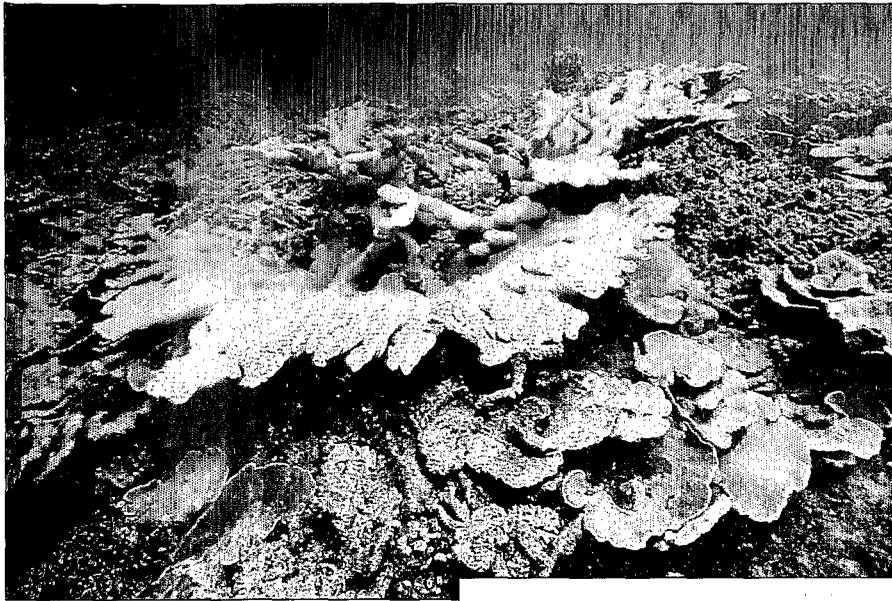
#### Des oasis dans le désert océanique.

Par contraste avec le désert océanique qui les entoure, les récifs sont, nous l'avons dit, très productifs : toute la masse visible des atolls oasis est calcaire ; de plus les vases, sables, roches en place, platiers (partie plane et affleurante du récif barrière), et îles basses (motu) sont formés des mêmes débris remaniés et consolidés ; ces derniers sont issus des squelettes carbonatés des coraux et des algues calcaires qui vivent à la périphérie côté océan et constituent le rebord solide de la couronne récifale, continuellement soumise aux assauts des vagues, des

*Figure 2. Vu d'avion, un atoll apparaît comme une oasis de quelques kilomètres de diamètre. A sa périphérie, une couronne de faible largeur d'une surface plate et rugueuse (platier en A) est rehaussée par endroits par des îles sableuses, les motu (en A), supportant une maigre végétation et des cocotiers élancés. La partie centrale est le lagon, en général peu profond (quelques dizaines de mètres) parsemé d'îlots et d'aiguilles coralliennes, les pinacles (en B). Le lagon et l'océan peuvent communiquer par des couloirs étroits peu profonds, les hoa (en A), et par des passes, les ava (en A). Dans les hoa, la circulation se fait exclusivement de l'océan vers le lagon ; dans les passes elle se fait dans les deux sens, suivant la marée, mais le plus souvent le courant est sortant (en B), puisqu'il faut que s'évacue la « surcote » du niveau du lagon créée par l'apport d'eau océanique déferlant par les hoa et sur les platiers affleurants (A).*



**Francis Rougerie** est océanographe tropicaliste. Il a travaillé sur les cycles et les bilans physico-chimiques de l'océan et des lagons. **Bruno Wauthy** est ingénieur agronome, spécialisé dans la production primaire océanique et les facteurs physico-chimiques et hydroclimatiques qui la contrôlent. Ces deux océanographes, de l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), poursuivent actuellement des travaux spécifiques sur les eaux interstitielles des récifs barrières dans le but de valider définitivement le concept d'« endo-upwelling géothermique ».

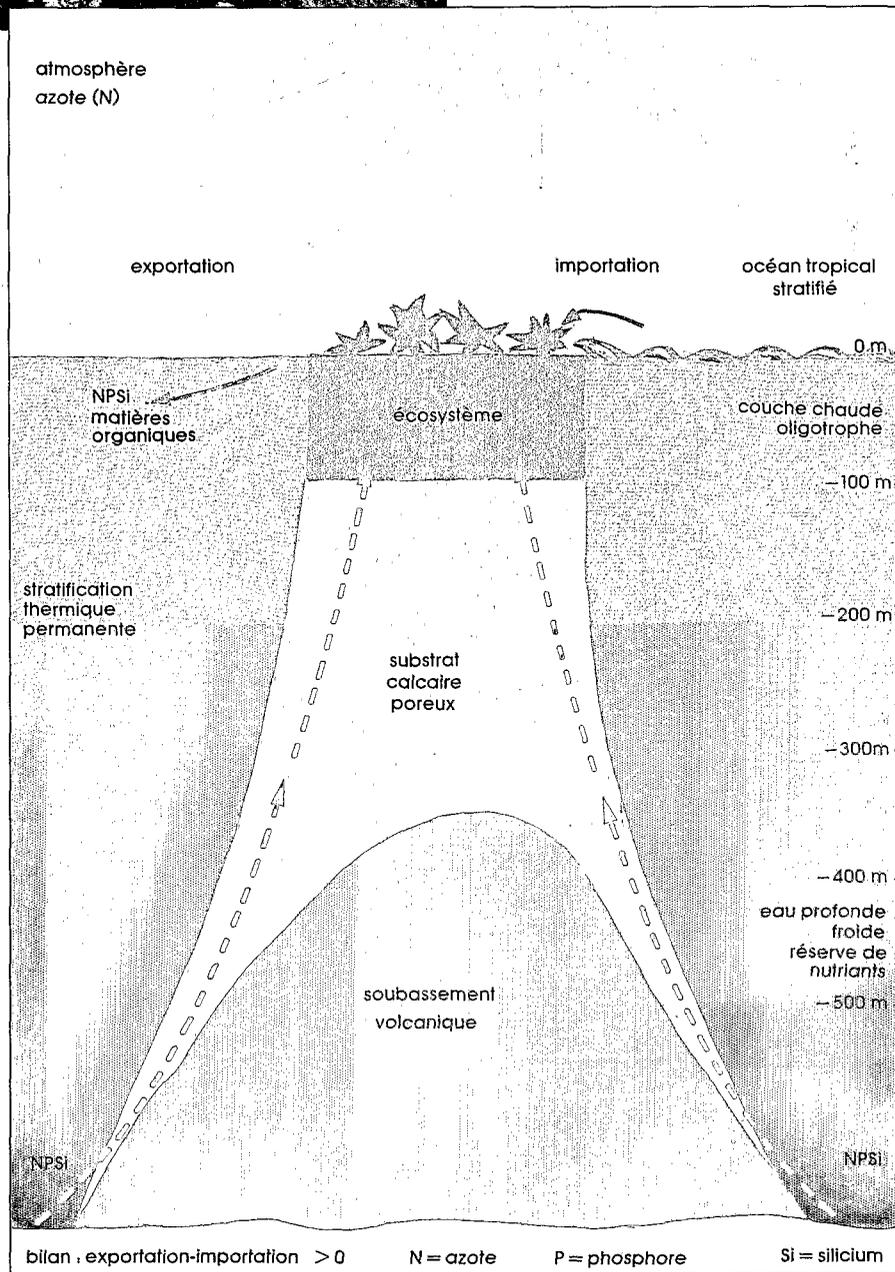


▲  
**Figure 3. Le paradoxe entre la luxuriance de l'atoll, oasis des merveilles, et la pauvreté des mornes étendues océaniques, vides et bleutées, est frappant. Cette photographie présente des colonies coralliennes sur la pente externe de l'atoll Hiti. Ces écosystèmes récifaux sont parmi les plus productifs de la planète avec des productions de plusieurs kilos de carbonate de calcium/m<sup>2</sup>/an. (Cliché ORSTOM)**

houles et des tempêtes. L'intense activité des coraux et des algues calcaires permet en effet la construction du rebord récifal, formé d'éperons et de sillons capables de dissiper l'énergie des houles et d'évacuer l'essentiel de la masse d'eau déferlante; toute une structure tourmentée de trous, de cavernes, d'arches et de passages, un véritable « gruyère », est ainsi construite par les coraux et consolidée par les algues calcaires; elle offre autant d'abris et de niches à une multitude d'espèces animales et végétales<sup>(2)</sup>. Formidable barrage annulaire contre le Pacifique, un récif barrière doit ainsi absorber l'énergie de l'océan, ce qui ne se fait pas sans « casse », surtout dans les périodes de paroxysme (tempêtes, cyclones, tsunamis). Pendant ces périodes agitées, une partie des squelettes coralliens est arrachée, cassée et transportée par la poussée des houles au-dessus des platiers affleurants et à travers ses entailles (ce qu'on appelle hoa; voir la figure 2); un certain tri se fait pendant le transport, les éléments les plus fins s'accumulant au centre du lagon qui est ainsi le « dépotoir » sédimentaire de l'atoll.

La partie la plus « active » de l'atoll, la plus productrice, celle qui doit construire et colmater les brèches, n'est en définitive qu'un modeste placage d'organismes vivants à la périphérie d'une immense nécropole résultant de l'accumulation et de la cimentation de squelettes calcaires. Un atoll est donc une oasis bio-construite affleurante, constitué de calcaire poreux et dont l'anneau corallien vivant enserme un lagon réceptacle de faible profondeur avec ou sans passe sur l'océan.

**Figure 4. Un atoll constitue un écosystème de dimensions modestes, parfaitement isolé, loin des continents, entouré par un milieu océanique chimiquement stable, pratiquement invariant et très pauvre. Le premier modèle de fonctionnement des atolls était un modèle horizontal où l'eau océanique devait fournir à l'écosystème corallien les éléments nutritifs et planctoniques nécessaires à sa survie. C'est ce que représente ce schéma où l'écosystème est tout entier contenu dans une boîte sans couvercle, dont le fond serait le substrat et les côtés une paroi verticale sur cent mètres d'épaisseur. De l'eau océanique de surface entre par déferlement par-dessus le rebord de la paroi; un volume égal d'eau de lagon sort par une passe et rejoint l'océan. Le lagon est exportateur en carbone, azote, phosphore et silicium. L'équilibre des bilans importation/exportation ne peut se réaliser sans apports de nutriments neufs. L'atmosphère peut fournir de l'azote, mais pas les autres éléments. Comme aucun phénomène d'upwelling (« remontée d'eau océanique profonde, froide et riche en nutriments ») n'a jamais pu être observé, il reste à envisager une remontée des eaux profondes à l'intérieur de la structure même de l'atoll. ▼**



(1) B. Wauthy, *L'environnement océanique physique dans la zone d'action de la CPS*, 89, 1986.  
 (2) D.A. Jones et R. Endean, *Biology and geology of Coral Reefs*, 1973.

**L'origine de la luxuriance des atolls :  
des remontées d'eaux profondes.**

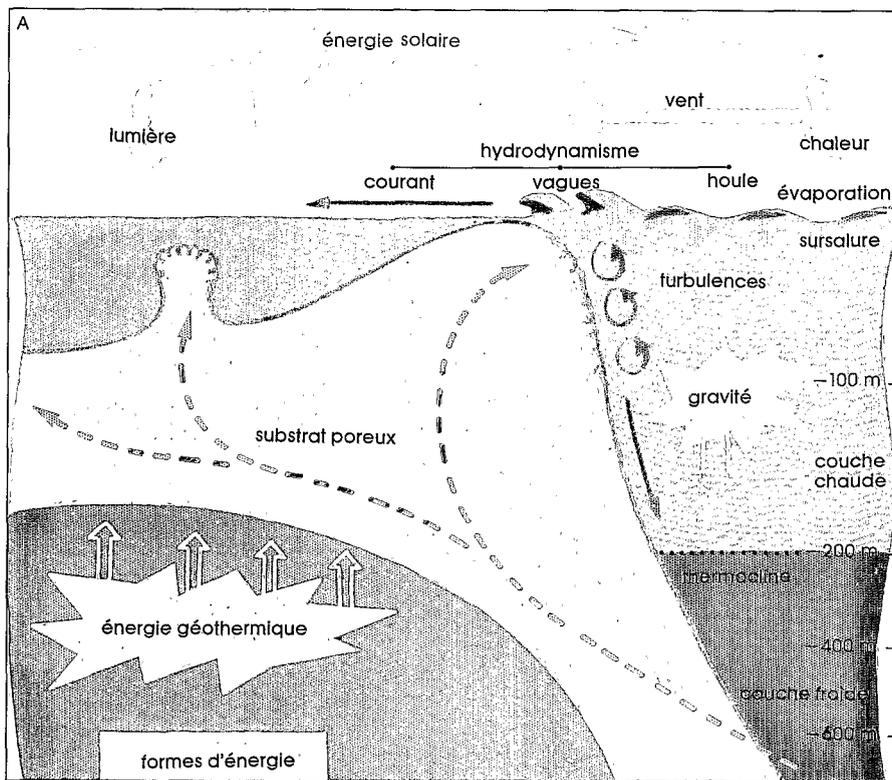


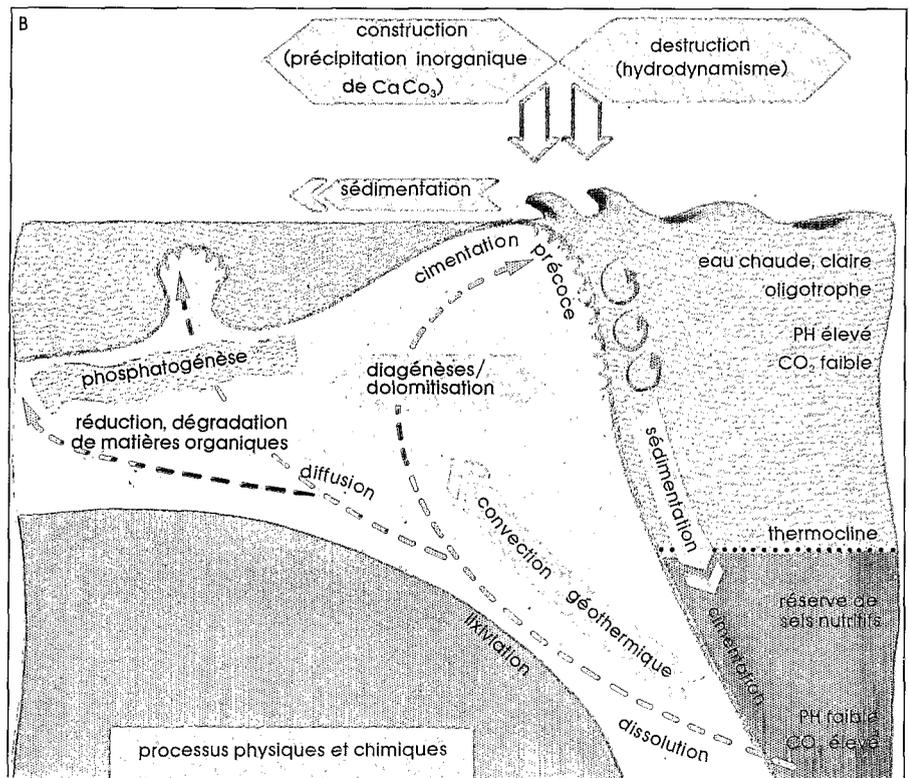
Figure 5. Les sels nutritifs nécessaires au développement d'un atoll peuvent provenir de la couche océanique profonde, selon le modèle suivant: les eaux océaniques profondes sous-saturées en carbonate-aragonite pénètrent dans le socle calcaire poreux de l'atoll et chauffés par le flux géothermique s'élèvent à l'intérieur de l'atoll par convection et ressortent soit de manière diffuse dans le lagon, soit de façon plus dynamique autour de la partie supérieure de la couronne externe (A). Ce phénomène d'endo-upwelling géothermique — proposé par les auteurs de l'article — joue un rôle irremplaçable dans la construction et le fonctionnement des édifices coralliens (B). Les eaux profondes endo-upwellées, riches en gaz carbonique dissous et de pH faible, subissent en fin de parcours un dégazage qui entraîne une précipitation carbonatée à l'intérieur de la matrice calcaire qui se trouve ainsi cimentée et consolidée. L'apport en sels nutritifs neufs entretient l'intense activité photosynthétique des algues benthiques et symbiotiques (C). Les zooxanthelles symbiotiques se multiplient très rapidement à l'intérieur des polypes coralliens, qui en expulsent régulièrement la fraction excédentaire; celle-ci sert de nourriture au zooplancton, départ de la chaîne alimentaire spécifique des systèmes coralliens et ce jusqu'aux grands prédateurs pélagiques.

**Comment l'oasis  
fonctionne-t-elle?**

Le paradoxe entre la luxuriance de l'atoll et la pauvreté de l'océan a été noté très tôt par les premiers observateurs, mais il a fallu attendre l'évolution des connaissances scientifiques pour que soit posé le problème du fonctionnement de l'ensemble.

Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, on a reconnu la nature animale des coraux que l'on tenait jusqu'alors pour minérale; très vite il fallut admettre que la densité en plancton de l'océan était trop faible pour assurer les besoins alimentaires des récifs. Vers 1930, on découvrit les « zooxanthelles », algues microscopiques vivant à l'intérieur des polypes coralliens (des madrépores) et dont la densité atteint trente mille par millimètre cube de tissu: on pensa alors que ces algues symbiotiques autotrophes pouvaient à elles seules nourrir les coraux; on en discute encore actuellement... Les travaux américains sur l'atoll d'Eniwetok ont établi dès 1955 que la base du système trophique de l'atoll est constituée par une biomasse algale autotrophe de zooxanthelles symbiotiques<sup>(3)</sup>.

Pour assurer la production primaire de ces végétaux, il faut des sels nutritifs, dont on a vu que la couche océanique de surface est particulièrement dépourvue. Or la production corallienne est très importante: plusieurs kilos de carbonate de calcium/m<sup>2</sup>/an. En fixation de carbone organique, ces chiffres donnent 1 à 4 kg/m<sup>2</sup>/an, ce qui place ce type d'écosystème parmi les plus productifs de l'ensemble des écosystèmes planétaires (fig. 3).



**Un modèle pour un atoll.**

Pour des raisons logistiques, les expéditions scientifiques étudiant l'écologie des récifs ont été entreprises, le plus souvent, sur des formations récifales le long des îles hautes ou des continents; l'hydrologie y est très variable et les apports terrigènes par les fleuves ou l'érosion météorique importants; l'éco-

système corallien y est à l'évidence d'une extrême complexité et encore mal compris.

Un atoll, en revanche, constitue un véritable dispositif expérimental naturel; c'est un écosystème de dimensions modestes, bien défini, parfaitement isolé, loin des continents, entouré par un milieu océanique chimiquement stable, pratiquement invariant à l'échelle de l'expé-

(3) R.E. Johannes, *Limn. and Oceanogr.*, 12, 189, 1967.  
(4) I.G. Macintyre et S.V. Smith, *Journal of Geology*, 82, 161, 1974.  
(5) Anonyme, *Les écosystèmes lagunaires de Polynésie française*, Cordet, 1984.  
(6) K.L. Webb et al., *Limn. and Oceanogr.*, 20, 651, 1975.

ience et facile à décrire en raison de sa pauvreté (fig. 4). Dans le classique modèle de fonctionnement des atolls, l'eau océanique de surface était censée fournir à l'écosystème corallien les éléments nutritifs et planctoniques nécessaires à sa survie<sup>(4)</sup>. Outre la difficulté d'appliquer ce modèle aux zones océaniques centrales très oligotrophes, les recherches menées en Polynésie depuis plus de vingt ans par l'ORSTOM, le Muséum national d'histoire naturelle, le MEA/CEP et le Service de la pêche de Polynésie ont montré que les eaux des agons ressortant par les passes contenaient plus de sels nutritifs dissous et plus de matière organique dissoute et particulaires que les eaux océaniques d'origine<sup>(5)</sup>.

Ces mesures confirmaient simplement un fait d'observation courante dans les atolls à passe des Tuamotu : l'eau du lagon, chargée en particules détritiques (inorganiques et organiques) et en plancton forme, par courant sortant, un panache turbide parfaitement visible qui contraste avec les eaux limpides et bleues du large. L'écosystème corallien est ainsi un exportateur de matière organique au bénéfice de l'océan alentour ; l'attraction, bien connue des pêcheurs, qu'exercent les

sels nutritifs dans l'écosystème afin d'équilibrer les pertes.

Il existe deux sources possibles d'apport nutritif : l'atmosphère et les couches profondes de l'océan. La solution atmosphérique a paru séduisante aux scientifiques américains de l'expédition SYMBIOS (1971) pour expliquer l'apparition de nitrate dans l'eau océanique qui déferlait sur un platier de l'atoll d'Eniwetok en direction du lagon<sup>(6)</sup> ; ils postulèrent que ce nitrate provenait de la fixation d'azote atmosphérique par des algues cyanophycées présentes sur ce récif. Cette interprétation soulève trois objections. D'une part, les algues susceptibles de réaliser cette fixation d'azote sont peu abondantes sur la couronne extérieure, là où se fait l'essentiel de la production récifale. D'autre part, cette fixation est insignifiante si la température des eaux est inférieure à 25 °C, ce qui est le cas pour les atolls situés près des tropiques. Enfin, l'atmosphère ne peut fournir le phosphore et la silice, les deux autres sels nutritifs essentiels à la production primaire. Ce problème de la fixation d'azote atmosphérique par les algues benthiques ou planctoniques est toujours l'objet d'une vaste controverse et donc de travaux spécifiques...

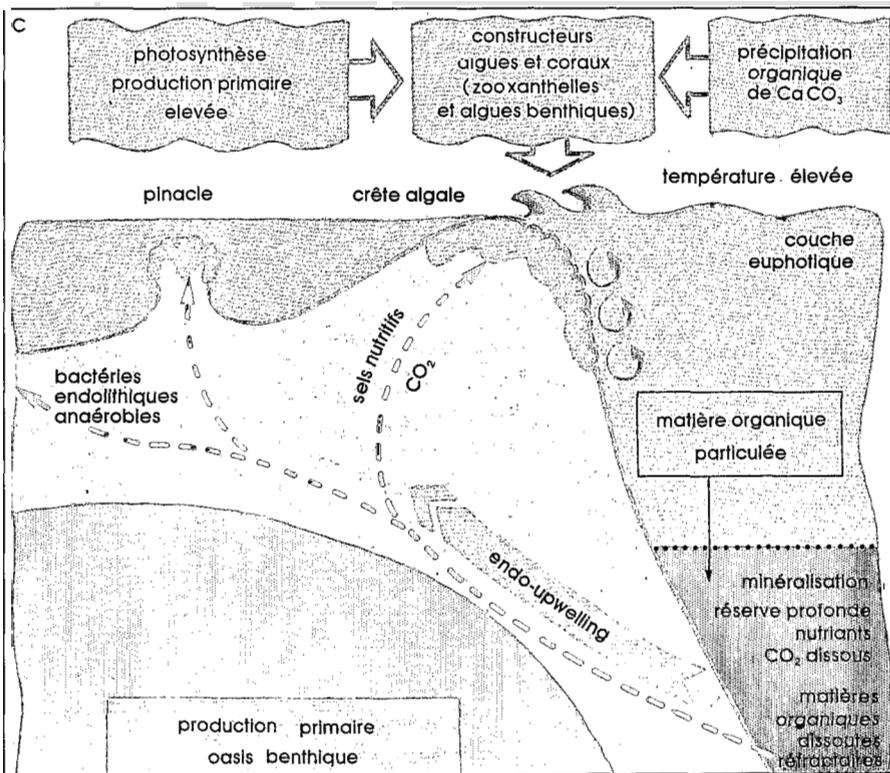
éléments constitutifs de base (carbone, azote, phosphore), mais aussi du silicium et la plupart des oligo-éléments. La recherche d'upwelling et de zones d'enrichissement autour des îles pouvant localement augmenter la productivité océanique a fait l'objet d'un effort très important de la part des océanographes de l'ORSTOM basés en Nouvelle-Calédonie et à Tahiti, en particulier à bord du navire océanographique *Coriolis*. Or aucun de ces processus d'enrichissement n'a jamais été détecté de façon significative en dehors de la zone équatoriale, parce que l'épaisse couche chaude de surface, qui s'étend de la Polynésie à la Nouvelle-Guinée et constitue le principal chauffe-eau solaire planétaire, maintient une stratification thermique permanente, s'opposant ainsi à tout mélange vertical avec les couches profondes et riches froides.

#### Les formations récifales : de vraies passoires.

Reste donc comme hypothèse ultime : une remontée des eaux profondes à l'intérieur de la structure poreuse des atolls et récifs barrières ; nous avons pu tester pour la première fois la validité de cette hypothèse à Mururoa en 1980.

Une indication déterminante de la réalité des échanges lagon-océan à travers la structure corallienne poreuse nous avait été fournie par nos travaux sur l'atoll fermé de Takapoto, Tuamotu du nord, dans le cadre d'une étude patronnée par l'UNESCO, entre 1974 et 1978. Dans ce lagon sans passe, soumis à une évaporation supérieure à un mètre par an, les eaux lagunaires ont une salinité qui fluctue entre 38 et 42 pour mille, alors que, par effet cumulatif, la salinité aurait dû atteindre la saturation en quelques siècles. Il était donc évident qu'une évacuation de l'excès de sel s'effectuait à travers les parois du lagon, à partir des eaux de fond les plus denses<sup>(7)</sup>. Par ailleurs, les nombreux forages entrepris sur les atolls depuis un demi siècle (par les Japonais à Kita-Daitojima en 1934-1936 ; par les Américains à Eniwetok et à Bikini en 1947-1952 ; par les Français à Mururoa depuis 1965) avaient montré que : les formations calcaires récifales sont très poreuses, avec une perméabilité élevée<sup>(8)</sup>, facteurs favorables à une circulation interne ; l'eau océanique profonde et froide peut y pénétrer aisément, ce qui se traduit dans les profils thermiques verticaux des eaux interstitielles, par une diminution anormale de la température<sup>(9)</sup> ; sous les roches et sédiments carbonatés se trouve le volcan basaltique originel, confirmation directe de l'hypothèse de Darwin de la formation d'un atoll ; un flux géothermique important subsiste dans le soubassement basaltique qui peut de ce fait chauffer les eaux océaniques froides pénétrant à l'interface basalte/calcaire.

Nos mesures de sels nutritifs réalisées



atolls sur le necton pélagique (requins, scombres, etc.), est due à l'abondance des roches potentielles qu'ils abritent. Or un écosystème ouvert qui perd de façon continue une fraction même faible de sa production organique ne peut que disparaître à terme. Le fait qu'un atoll puisse prospérer pendant des millions d'années au sein d'un océan pauvre vers lequel il exporte, implique un renouvellement des

Concernant la seconde possibilité — une source de nutriments originaires des couches océaniques profondes — rappelons qu'une remontée de nutriments vers les couches éclairées, par upwelling, est un facteur déterminant de la fertilité primaire de l'océan mondial. Cette eau profonde constitue un « engrais » complet, directement utilisable par les organismes autotrophes ; on y trouve les

(7) F. Rougerie, *Journal Société des Océanistes*, 62, 35, 1979.

(8) G. Deneufbourg, *Mururoa Cah. Pac.*, 12 et 13, 1969.

(9) H.R. Atkinson et al., *Report of a Scientific Mission to Mururoa Atoll*, 166, 1984.

en 1980 dans des puits forés à Mururoa avaient révélé la présence de fortes valeurs de nitrates, phosphates et silicates dissous, dans les eaux interstitielles du socle calcaire. Ces valeurs étant proches de celles de la couche océanique profonde baignant la base de l'atoll, nous avons alors proposé, en 1984, un premier modèle où les nutriments pénétrant la structure poreuse diffusaient ensuite lentement vers le haut de l'atoll: « affleurant à la surface océanique, la vasque lagonaire fonctionne ainsi de façon analogue à une lampe à pétrole; la photosynthèse brûle les nutriments qui apparaissent à la base du lagon après avoir migré dans le socle corallien (la mèche) à partir du riche réservoir océanique profond »<sup>(10)</sup>.

La modélisation effectuée par les chercheurs du CEA à partir des profils thermiques verticaux mettait dans le même temps, en 1985, en évidence l'existence d'une véritable cellule de convection à l'intérieur de l'atoll, avec des vitesses de déplacement de l'ordre du cm/jour: notre modèle initial recevait ainsi un puissant moteur géothermique<sup>(11)</sup>.

#### Une circulation par convection géothermique.

Il en résultait que l'eau océanique de pénétration, chauffée par le flux géothermique et diminuant ainsi de densité pouvait s'élever à l'intérieur de l'atoll par convection et tendait à ressortir, soit de manière diffuse à travers le fond du lagon, soit de façon plus dynamique autour de la partie supérieure de la couronne externe (fig. 5A), nettoyée en permanence par les houles océaniques.

Dans le même temps, une recherche bibliographique révélait que dès 1958, à partir des données thermiques mesurées dans les eaux interstitielles de l'atoll de Bikini, l'Américain J. Swartz avait établi l'existence d'une convection forcée<sup>(12)</sup>. Les forages effectués dans les années 1960 en Floride avaient amené F.A. Kohout à proposer un modèle de circulation d'eau océanique à travers les structures profondes carbonatées de Floride, par un processus similaire de convection thermique<sup>(13)</sup>. Plus récemment en 1985, d'autres chercheurs américains travaillant sur l'atoll de Niue, dans le Pacifique sud, ont montré que le remplacement du carbonate de calcium par de la dolomite, processus connu sous le nom de dolomitisation, s'était fait grâce à un flux vertical d'eau de mer profonde mue par convection<sup>(14)</sup>; au contact du socle volcanique, cette eau s'était enrichie en fer, magnésium, cuivre et zinc, dont les teneurs se trouvaient anormalement élevées dans les dolomites.

L'ensemble de ces observations confirme ainsi la validité du modèle vertical de circulation par convection géothermique et son rôle comme facteur causal de l'évolution des roches carbona-

tées et en particulier de leur dolomitisation, comme à Mururoa<sup>(15)</sup>. En effet, le passage de grands volumes d'eau profonde sous-saturée en carbonate de calcium (forme aragonite), mais toujours saturée en carbonate de magnésium, ne peut que favoriser les échanges ioniques calcium/magnésium qui transforment lentement la matrice calcaire en calcite magnésienne puis en dolomie (carbonate double de calcium et de magnésium) (fig. 5B). Enfin nos dernières mesures, réalisées en 1989 grâce aux trous forés dans le platier affleurant de l'atoll de Tikehau, côté océan, ont bien confirmé la forte conductivité hydraulique de ce récif barrière et les teneurs très élevées en nutriments des eaux interstitielles présentes entre la surface et trente-cinq mètres de profondeur. Il existe ainsi un véritable continuum d'eaux riches en nutriments, mais aussi en gaz carbonique, depuis la base de l'atoll jusqu'en haut de la plate-forme récifale, où les eaux viennent imprégner en fin de parcours le biotope corallien vivant, fournissant ainsi aux zooxanthelles et aux algues benthiques une ration nutritive sans cesse renouvelée.

Grâce à la mise en évidence d'un puissant moteur géothermique convectif, nos collègues géophysiciens et géologues comblaient définitivement une lacune essentielle du puzzle: sous l'effet d'une circulation interne soutenue, il y a bien remontée de nutriments; mais à la différence d'un upwelling « classique », la remontée a lieu ici à l'intérieur de la structure poreuse des atolls. Nous avons alors forgé l'expression « endo-upwelling géothermique » et exposé ce concept lors du cinquième congrès sur les récifs coralliens tenu à Tahiti en mai 1985<sup>(16)</sup>. L'impact de cette communication nous parut d'ailleurs assez discret pour ne pas dire décevant, mais une synthèse sur le sujet parue dans *Oceanologica Acta* en 1986 nous valut une abondante demande de tirés à part: l'endo-upwelling commençait lentement à fonctionner dans les esprits...

Par leurs caractéristiques d'origine et leur lente évolution au cours de la remontée, les eaux de l'endo-upwelling jouent un rôle irremplaçable dans la construction et le fonctionnement des édifices coralliens, les plus grands et les plus anciens créés par des organismes vivants. L'apport en sels nutritifs neufs entretient l'intense activité photosynthétique des algues benthiques et symbiotiques, puisqu'il permet de compenser les pertes vers l'océan d'un système très productif, capable par ailleurs de recycler une part importante de ce qu'il produit<sup>(17)</sup>. L'endo-upwelling assure donc, et au minimum, la production récifale nette, équivalente sur le long terme à la fraction exportée ou perdue dans l'océan: ainsi se trouve résolu le paradoxe fonctionnel qui avait suscité bien des interrogations depuis le début du siècle. Mais nous découvrons alors que ce processus

dynamique permet aussi de répondre à de nombreuses questions portant sur le devenir des barrières récifales et sur l'évolution dans l'espace et le temps des atolls.

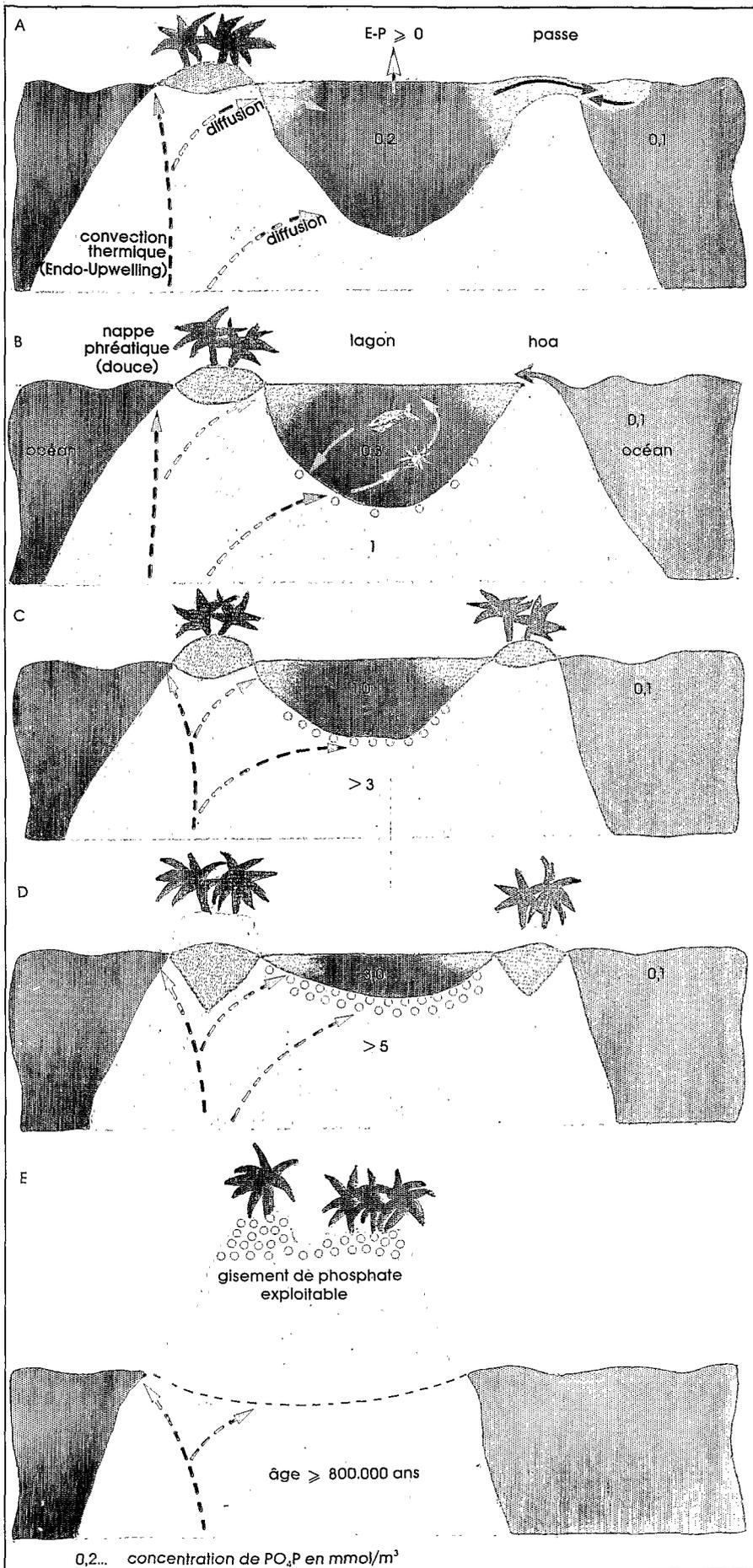
#### Le concept d'endo-upwelling.

L'arrivée des eaux endo-upwellées en surface s'accompagne d'un double processus de précipitation: une précipitation organique, résultant du métabolisme des coraux et des algues, et une précipitation inorganique due aux propriétés intrinsèques de ces eaux. L'eau profonde est en effet riche en gaz carbonique dissous, sous-saturée en carbonate de calcium (forme aragonite), froide, avec un pH bas de l'ordre de 7,8, ce qui facilite sa pénétration à la base de l'atoll par dissolution partielle des flancs calcaires. Pendant son réchauffement et sa montée par convection, le produit de solubilité du carbonate de calcium diminue, évolution accentuée par la diminution de pression. Des précipitations carbonatées se produisent alors à l'intérieur de la matrice calcaire, cimentant et consolidant l'édifice. Ces précipitations sont favorisées par la diminution de la pression partielle de CO<sub>2</sub> due au dégazage en surface et à la photosynthèse qui utilise le CO<sub>2</sub>; l'ensoleillement et la forte évaporation, habituelle par petit fond en zone tropicale, sont également des facteurs favorables.

Dans les années 1960-1970, le rôle important de la « cimentation précoce » sous-marine dans la consolidation du récif et donc dans sa survie sur le long terme a été mise en évidence; on sait désormais que des ciments de calcite-magnésienne et d'aragonite soudent entre eux les éléments de la « charpente » (*framework*) construite *in situ* par les algues et les coraux et augmentent sa résistance à la destruction physique par les houles<sup>(18)</sup>; sans cette cimentation interne, liée dans notre modèle à la précipitation inorganique des carbonates dans des conditions favorisées par le balayage continu d'eau endo-upwellée, un récif barrière se trouverait dans une situation analogue à celle d'une construction cimentée mais non armée: sa longévité serait brève.

Sur le plancher du lagon, la sédimentation des particules fines diminue fortement la perméabilité hydraulique du substrat et la sortie directe d'eau endo-upwellées y est peu probable, ce qui serait en accord avec la rareté relative des constructions coralliennes. Toutefois, dans certains lagons, pour des raisons qui pourraient être liées à l'histoire tectonique du volcan sous-marin, des failles, des fissures, des interstices dans la couverture sédimentaire rendraient possible la sortie d'eau endo-upwellée en certains points, à partir desquels se développeraient des pâtés de coraux. Ainsi peut-on envisager que les constructions comme les « patch reefs », ou les pinacles, se fassent sur des sites de sorties secondaires dans les lagons (fig. 5C).

- (10) F. Rougerie et al., *Rapport CEA, R, 5236, 77, 1984.*  
(11) G. Samaden et al., *La houille blanche, 2, 143, 1985.*  
(12) J.H. Swartz, *U.S., Geol., Prof. Paper, 260, 711, 1958.*  
(13) F.A. Kohout, *N.Y. Acad. Sci., II, 28, 249, 1965.*  
(14) P. Aharon et al., *Journal of Geology, 95, 187, 1987.*  
(15) D.M. Aissaoui et al., in *Reef Diagenesis, 27, 1986.*  
(16) F. Rougerie et B. Wauthy *Oceanologica Acta, 9, 133, 1986.*  
(17) A. Szmant Froelich, *Noaa, 1, 133, 1983.*



Selon l'Américain J.A. Fagerstrom, auteur du plus récent ouvrage sur l'évolution des récifs, « un récif marin organique type est le produit d'une réponse biologique vigoureuse à un ensemble relativement restreint de facteurs environnementaux interdépendants (chimiques, physiques, géologiques et biologiques) »<sup>(19)</sup>. La construction récifale algo-coralienne peut donc être considérée comme la réponse biologique benthique majeure à toute manifestation d'endo-upwelling dans les mers chaudes, et ainsi rendre compte de la présence des atolls, des bancs coralliens et des récifs barrières d'îles hautes.

#### Des gisements d'apatite et d'hydrocarbures.

Dans quelle mesure le concept d'endo-upwelling peut-il expliquer d'autres caractéristiques des atolls? Sous le plancher des lagons où se sont accumulées sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur des particules calcaires issues de la couronne récifale extérieure, la circulation des eaux interstitielles est très ralentie. La quantité d'oxygène libre initialement présente dans les eaux océaniques de pénétration tend à s'épuiser du fait de l'activité des micro-organismes présents: le milieu devient réducteur et propice à des activités bactériennes anaérobies et à des évolutions ou diagenèses spécifiques. Les phosphates issus de la circulation endo-upwellée et qui se sont lentement accumulés dans les eaux interstitielles<sup>(20)</sup>, peuvent précipiter ainsi qu'en témoignent les gisements d'apatite repérés sous certains lagons fermés (Mataïva) ou sur les atolls soulevés et exploités comme Makatea ou Nauru (fig. 6). Rien n'interdit de proposer par ailleurs que la matière organique dissoute des eaux océaniques profondes, remontées par endo-upwelling, puisse lors de son lent passage en zone sublagonaire, subir une dégradation bactérienne anaérobie dans ce milieu sans oxygène libre, d'autant plus chaud qu'on se rapproche du cœur de l'atoll ou d'un soubassement carbonaté de type Floride.

Figure 6. La présence de gisements de fluoro-apatite, dans certains lagons fermés ou sur les atolls soulevés et pouvant contenir jusqu'à 70 % de phosphore ( $P_2O_5$ ), a longtemps été interprétée comme une conséquence d'un dépôt de guano par les oiseaux de mer. Pour des raisons géochimiques, cette hypothèse ne tient plus<sup>(27)</sup>, alors qu'en revanche l'endo-upwelling apporte une nouvelle explication. L'océan profond est un énorme réservoir de phosphore dissous et les eaux interstitielles des lagons sont très riches en phosphates dissous (A et B). En cas de fermeture des lagons les phosphates peuvent atteindre la valeur de saturation et précipiter sous forme d'apatite insoluble (cas des lagons de Niau et de Mataïva aux Tuamotu, en C). Si le lagon se soulève (en D), lors de mouvements tectoniques, et s'assèche, le gisement d'apatite, situé au sommet de l'atoll, devient aisément exploitable par l'homme: plusieurs dizaines de millions de tonnes d'apatite ont été extraites des atolls soulevés de Makatea (en E), Nauru, Christmas, etc.

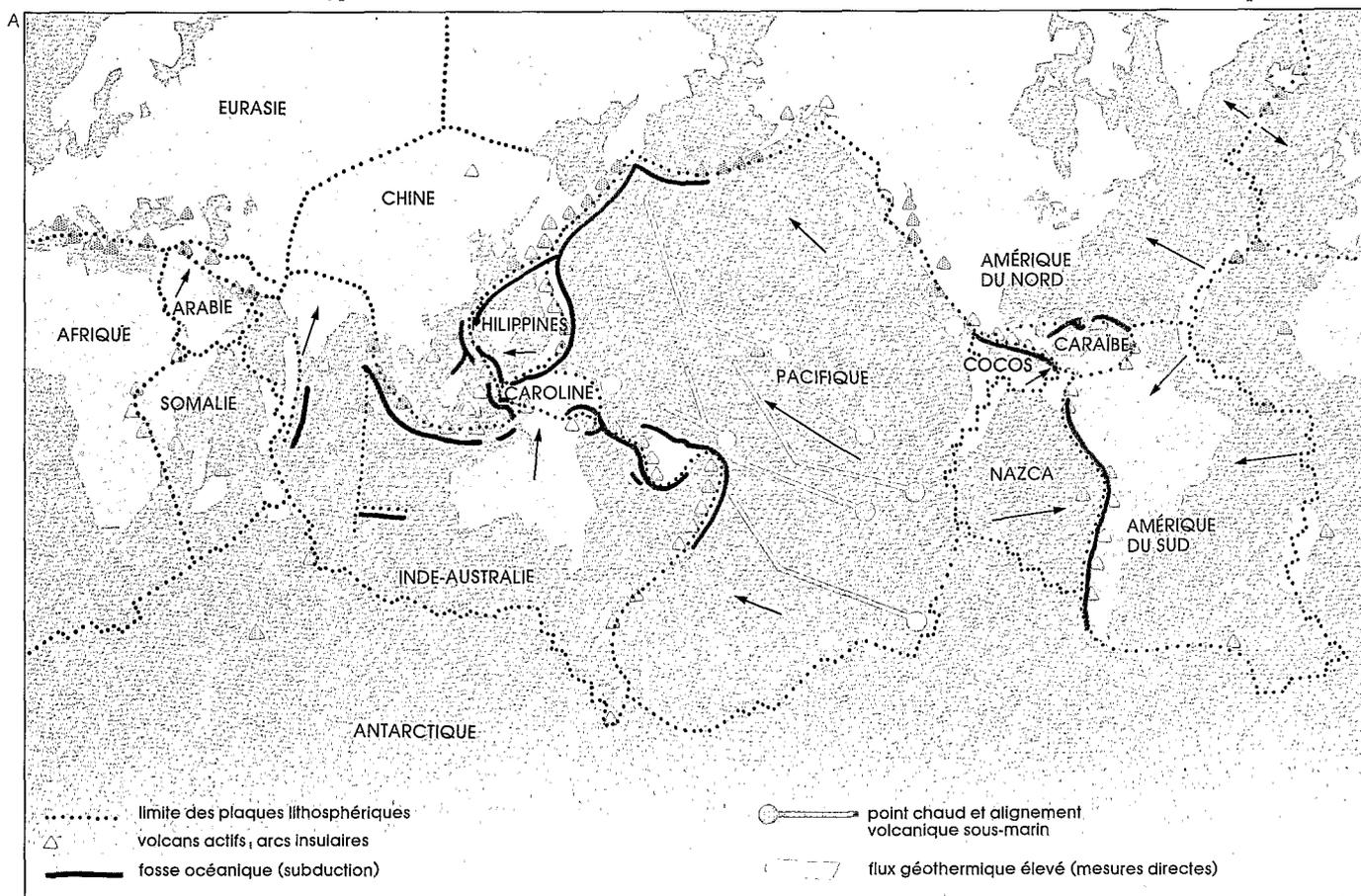
**L'endo-upwelling : un concept valable dans le temps et l'espace.**

Les hydrocarbures à longue chaîne carbonée pourraient ainsi progressivement être réduits en kérogène, puis en hydrocarbures de masse moléculaire décroissante. La présence d'indices huileux suintant de nombreuses structures calcaires (Atoll des Tonga, Floride, anciens atolls des marges indonésiennes) plaide en faveur de cette hypothèse. Il est par ailleurs significatif que la « coïncidence » de la présence au sein d'anciens socles calcaires de gisements superficiels d'apatite et d'hydrocarbures (voir, par exemple, le colloque sur la géologie comparée des gisements de phosphate et de pétrole, tenu à Orléans en 1979), n'ait pas à ce jour reçu d'explication causale simple. Aussi le modèle que nous proposons d'une évolution-diagenèse des phosphates ou de la matière organique présente un intérêt économique incontestable, qui pour être vérifié nécessite un accès direct aux différents types d'eaux

tout point d'une plaque lithosphérique et est d'autant plus élevé que l'asthénosphère sous-jacente est proche; les régions à flux géothermique fort correspondent aux zones d'amincissement ou de discontinuité, c'est-à-dire pour une plaque océanique, la dorsale qui l'engendre, les zones de déchirement, les points chauds et les bords; le volcanisme résultant de l'extrusion de l'asthénosphère à travers la lithosphère est toujours une indication de flux géothermique important. La répartition planétaire des sites favorables à l'endo-upwelling devrait donc suivre *a priori* les zones d'activité de la croûte terrestre au sein du domaine océanique (fig. 7A). Les plus remarquables sont les zones de subduction, là où les plaques océaniques du Pacifique et de l'océan Indien plongent sous les plaques continentales, les zones où les dorsales océaniques affluent comme au niveau de l'Islande et des

ces points correspondent effectivement à des zones actives de la croûte terrestre.

Parce qu'il est sous la dépendance étroite du flux géothermique et de la cellule de convection qu'il entretient, le processus d'endo-upwelling peut être considéré comme la manifestation d'un hydrothermalisme discret, de basse énergie, dans la partie haute de nombreux socles immergés. Les sels nutritifs ainsi libérés trouvent toujours des consommateurs dans la couche éclairée, mais leur importance se fait surtout sentir dans les milieux oligotrophes tropicaux, qui ne bénéficient pas, par définition, d'autres processus d'enrichissement. C'est d'ailleurs dans ces milieux que la pénétration lumineuse est la meilleure, du fait de la clarté des eaux, condition essentielle de la réussite de l'autotrophie par photosynthèse. Les prairies de posidonies (plantes colonisant les fonds sableux) des côtes de la Méditerranée pourraient,



(18) R.W. Buddemeier et al., in *Reef Diagenesis*, 91, 1986.  
 (19) J.A. Fagerstrom, *The evolution of reef communities*, 600, 1987.  
 (20) F. Rougerie et B. Wauthy, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 12, 1043, 1989.

interstitielles par forages profonds. Il est donc hautement souhaitable que la coopération française multi-organismes qui se développe actuellement pour l'étude des systèmes coralliens, sous la houlette de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), soit financièrement dotée en conséquence.

Le concept d'endo-upwelling est généralisable à tous les sites où sont réunis un substrat poreux où l'eau circule facilement, une source d'eau de mer profonde contiguë et un flux géothermique élevé.

Le flux géothermique naturel existe en

centres actifs méditerranéens, du golfe de Californie et de la mer Rouge, véritable océan en début de formation. A l'intérieur des plaques océaniques elles-mêmes, l'activité géothermique se traduit par des formations volcaniques, reliefs sous-marins ou émergés en îles: plateau faillé des Mascareignes et alignement des Chagos-Laccadives dans l'océan Indien; arcs insulaires des Caraïbes et des Antilles dans l'Atlantique; archipels des Australes-Cook, des Tuamotu-Gambier, de la Société, des Marshall-Gilbert, des Carolines et d'Hawaï dans le Pacifique. Tous

d'après ce modèle, constituer le signal biologique des sites de sortie d'eaux endo-upwellées en mer tempérée.

La force du concept d'endo-upwelling est qu'il peut, bien mieux que les modèles qui l'avaient précédé, rendre compte de la réussite des biotopes coralliens actuels; nous allons maintenant tester sa validité par un examen de l'évolution dans l'espace et dans le temps des grandes communautés récifales.

Les grandes constructions récifales algo-coralliennes apparaissent concentrées dans les zones de contact entre les

plaques tectoniques, et autour des arcs insulaires et des volcans sous-marins; elles se situent à l'intérieur d'une bande intertropicale où la température de surface ne descend pas en dessous de 18 °C (fig. 7A); nous voyons que cette distribution spatiale, bien explicitée par le modèle de la « tectonique des plaques », recoupe celle géothermiquement favorable aux manifestations d'endo-upwelling, avec une température de surface suffisamment élevée pour assurer la précipitation des carbonates à un faible coût thermodynamique<sup>(21)</sup>. Si l'on définit un indice de diversité des espèces animales invertébrées à pièces dures carbonatées (bivalves, gastéropodes, échinodermes et coraux), sa répartition géographique fait apparaître deux provinces privilégiées (fig. 7B). D'une part la province Indo-Pacifique autour du point multiple de convergence des plaques Eurasie, Indo-Australie, Pacifique, Phi-

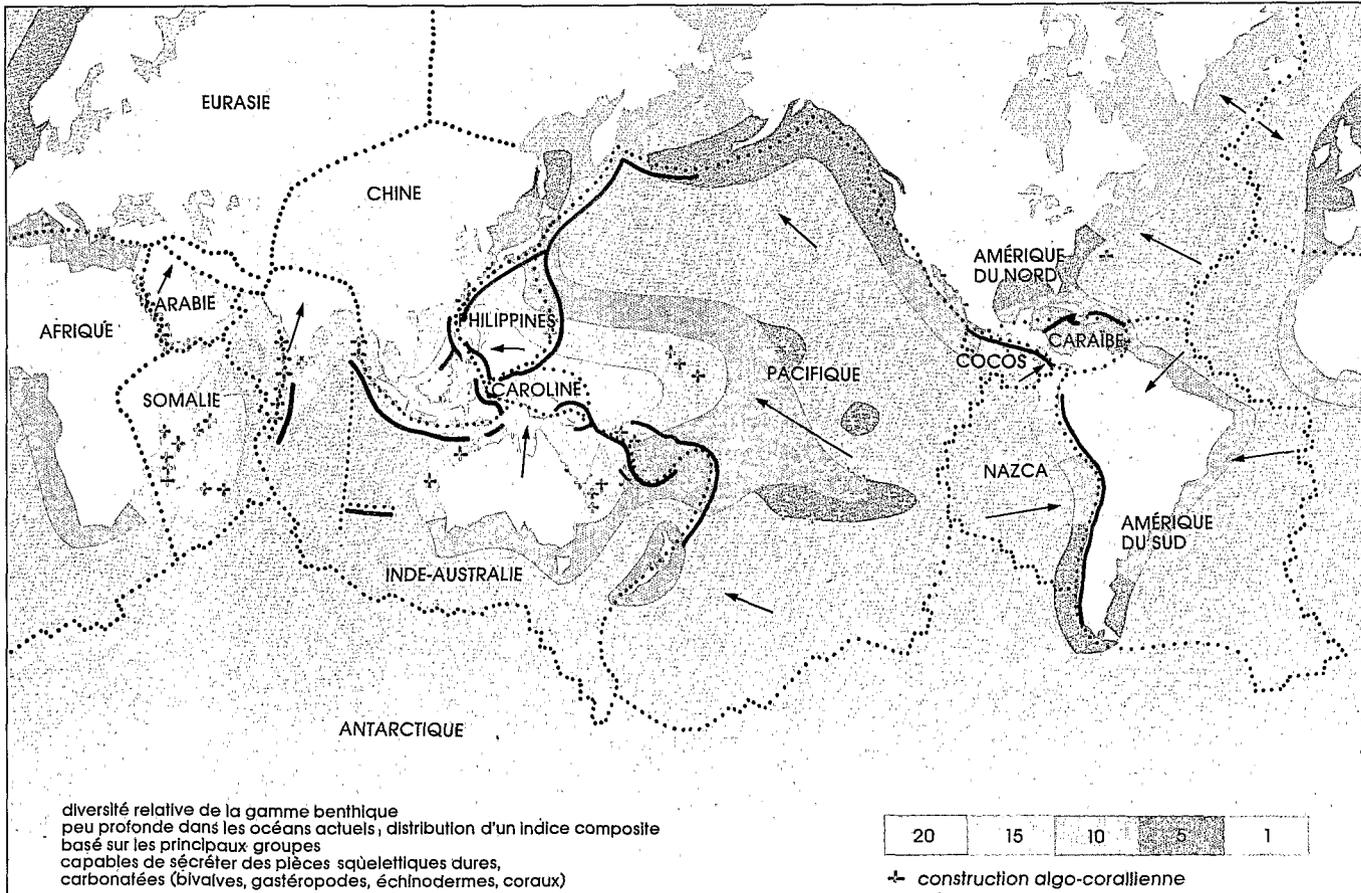
d'eaux profondes à travers les substrats poreux et le long des plans de faille et de fracture.

Cette proposition trouve un appui dans la très longue histoire de la construction récifale telle qu'elle est révélée par l'étude des fossiles. J.A. Fagerstrom souligne qu'à partir du Secondaire un accroissement de l'importance des constructeurs récifaux, scléractiniaires et corallinacées, fut suivie par des périodes de relative extinction au Tertiaire puis par un épanouissement optimal des constructions coralliennes à partir de l'Oligocène, il y a 35 millions d'années. Que s'est-il passé à cette époque pour favoriser ainsi le développement récifal?

La réponse est d'ordre hydro-climatique: des changements dans la géométrie des bassins océaniques (fermeture du détroit Indonésien entre l'Asie et l'Australie; isolement de l'Antarctique) et le refroidissement global du climat de la

fond froides (psychrosphère) et les eaux de surface chaudes. Il est évident qu'une telle disposition à deux couches entraîne à terme une différence dans leurs propriétés: la couche chaude tend à s'épuiser en sels nutritifs au bénéfice des couches profondes, comme dans notre océan tropical actuel.

Que constate-t-on si on applique notre modèle d'endo-upwelling? Aux époques précédant l'Oligocène, lorsque l'océan est homogène, une circulation par endo-upwelling fournit des eaux peu différentes de celles de surface et donc non propices aux précipitations minérales. Riche en nutriments, la couche de surface océanique est très productive, donc turbide, et la croissance des coraux est gênée, voire interdite, par un recouvrement d'algues benthiques non calcaires (situation analogue à une eutrophisation). A partir de l'Oligocène et du réarrangement de l'océan en couches thermiquement strati-



lipines, Caroline et d'autre part, la province Panama-Caraïbes autour du point multiple de convergence des plaques Amérique du Nord, Cocos, Nazca, Caraïbe, Amérique du Sud.

**La longue histoire des constructions récifales.**

Nous en sommes arrivés à la conclusion que la convergence des plaques accroît la diversité biologique, aux endroits mêmes où un intense flux géothermique ne peut que favoriser les convections internes

planète ont entraîné la constitution d'une importante réserve de glace continentale et polaire, ceci ayant une conséquence directe sur la circulation océanique; partant d'un océan où les eaux ne sont pas stratifiées en fonction de la température et constituent une épaisse couche de mélange relativement homogène (analogue à la Méditerranée actuelle en hiver), une nouvelle circulation s'instaura en zone intertropicale: une circulation tournoyante en « gyre » dans le plan horizontal, alors que verticalement s'effectuait un découplage entre les eaux de

Figure 7. Il existe à l'échelle planétaire, une étroite relation entre les zones d'activité tectonique à l'intérieur et aux bords des plaques de la lithosphère (le flux géothermique y est élevé — en A), et les zones de constructions récifales les plus développées (la diversité biologique est très grande — en B). Cette répartition spatiale répond bien aux critères de réussite d'un endo-upwelling: un flux géothermique puissant permettant une circulation soutenue par convection, à travers un substrat calcaire perméable, fissuré ou faille, baigné par une eau profonde. Il est remarquable que les deux centres de diversité maximale, en Indonésie et aux Caraïbes, correspondent à des points multiples de convergence des plaques.

(21) A. Guilcher, Coral Reef Geomorphology, 228, 1988.

fiées, avec une couche de surface chaude, oligotrophe et claire, le processus d'endo-upwelling fournit à l'écosystème benthique des eaux profondes riches en nutriments et en gaz carbonique: cette situation est propice aux précipitations minérales (cimentations), à la calcification corallienne et à la production autotrophe des zooxanthelles (dont la population tend à consommer la totalité des nutriments endo-upwellés).

Notre interprétation est confortée par l'évolution des volcans aériens et sous-marins de la chaîne Hawaii-Emperor, correspondant à un point chaud très actif de la croûte terrestre. Bien que les premiers volcans aient fait surface il y a au moins 70 millions d'années dans un environnement tropical, les récifs coral-

résultant de l'érosion subaérienne et de l'action de l'océan en surface du temps de leur émergence; il s'en trouve quelques-uns qui sont indubitablement coiffés par des atolls fossiles submergés; on les trouve côte à côte avec des atolls affleurant la surface et qui semblent, eux, avoir très bien « résisté » à la montée relative du niveau marin. C'est le cas des guyots Sylvania et Harrie, trouvés submergés sous plus de mille deux cents mètres d'eau à proximité de l'atoll de Bikini. Pourquoi les formations récifales de Sylvania et de Harrie n'ont-elles pas survécu, alors que les atolls voisins ont traversé les âges avec succès jusqu'à ce jour? Il est clair que tous les facteurs « physiques » externes évoqués jusqu'ici (tectoniques, hydrodynamiques, climatiques, etc.) agissant de la même façon sur deux atolls voisins ne peuvent être à l'origine d'un devenir aussi différent<sup>(23)</sup>. *A contrario*, le moteur de la circulation endo-upwellée, le flux géothermique peut, lui, subir d'importantes fluctuations de régime. Cette variabilité du flux géothermique peut aussi bien provenir de l'importance et de la nature de l'anomalie thermique originelle (dorsale, fracture, point chaud) que de la possibilité d'un refroidissement ou d'un rajeunissement ultérieur. Du reste, R. Le Suavé et ses collaborateurs, de l'IFREMER, avaient déjà pressenti l'influence de cette variabilité du volcanisme et de l'hydrothermalisme associé, dans l'origine des concrétions polymétalliques riches en cobalt, trouvées à l'intérieur d'un atoll ennoyé par mille mètres de profondeur et situé à proximité de l'atoll de Niau (Tuamotu)<sup>(24)</sup>. Si l'efficacité de la convection géothermique peut être modulée par l'intensité du flux géothermique, elle est également sensible à la porosité du calcaire récifal, qui peut varier sur le long terme. Les avatars de la perméabilité hydraulique du substrat peuvent aller d'une diminution de la porosité par colmatage ou diagenèse à une augmentation des cheminements possibles (porosité secondaire par dissolution, réseau karstique, fissures, failles). Il peut même se produire, à l'extrême, un court-circuit par pertes latérales empêchant l'eau endo-upwellée d'atteindre la couche éclairée.

Il résulte de toutes ces possibilités de perturbation de la convection géothermique un grand nombre de situations dont certaines conduisent au dysfonctionnement de la cellule de convection thermique et donc de l'endo-upwelling. Ces dysfonctionnements peuvent rendre compte du devenir différent de deux atolls contigus, l'un se maintenant à fleur d'océan pendant que l'autre, perdant la bataille pour se maintenir en zone éclairée, finit par perdre la guerre contre l'enfoncement et devient guyot ou atoll ennoyé.

Dans notre modèle, une communauté récifale constituée de façon univoque le signal biologique d'un site de sortie d'eau endo-upwellée. Constamment irriguées

par ce fluide qui sourd lentement à leur niveau, les zooxanthelles symbiotiques peuvent se multiplier très rapidement à l'intérieur des polypes coralliens qui en expulsent régulièrement la fraction excédentaire: cette manne phytoplanctonique sert de nourriture au maillon zooplanctonique, copépodes notamment, ce qui constitue le départ de la chaîne alimentaire spécifique des systèmes coralliens et ce jusqu'aux grands prédateurs pélagiques; ainsi 80 % des contenus stomacaux des thons tropicaux sont constitués par des poissons benthiques capturés sur les tombants des récifs barrières. Un atoll peut en définitive être imaginé comme un énorme baobab océanique: les racines puisent les substances nutritives de l'océan profond tandis que la couronne corallienne s'épanouit par photosynthèse au soleil tropical en enserrant la nappe tranquille du lagon réceptacle. Que ce soit à l'échelle récifale, avec les modifications lentes de l'édifice, ou à l'échelle planétaire, avec l'étroite relation entre la dispersion des récifs barrières et les anomalies de flux géothermique, ce concept d'endo-upwelling constitue un outil heuristique puissant. Son application au problème des guyots ou à celui de la reprise des constructions récifales au début de l'Oligocène constitue une approche originale, dont nous souhaitons que nos collègues géophysiciens et paléontologues puissent tester la validité.

Il faudra toutefois du temps et encore beaucoup de travail de terrain pour que l'ensemble de la communauté scientifique accepte ce nouveau concept qui ne va pas sans bousculer un certain nombre d'idées admises.

Sur le plan écologique, une meilleure compréhension du fonctionnement des récifs devrait permettre d'en améliorer la gestion: la pression humaine qui s'exerce sur certaines zones coralliennes les a malheureusement déjà fortement dégradées et la forte démographie en zone intertropicale<sup>(25)</sup>, leur laisse peu d'espoir d'échapper au saccage écologique en cours.

## DES ENCLOS NATURELS POUR L'AQUACULTURE

Dans les perspectives de développement de l'aquaculture, l'utilisation des atolls a souvent été évoquée; ce sont des sites qui répondent remarquablement aux trois conditions nécessaires: un enclos permettant le contrôle de la production et de la récolte; une eau non contaminée par les pollutions continentales; une réserve d'engrais proche, comme par exemple les eaux profondes de l'océan contigu<sup>(26)</sup>.

Cette dernière condition impliquait la nécessité de faire fonctionner un upwelling artificiel par un pompage d'eau profonde. Or la découverte d'un fonctionnement naturel de l'atoll par endo-upwelling rend les conditions d'exploitation encore plus favorables: il suffirait de puits peu profonds (quelques dizaines de mètres) forés dans les platiers et les îlots de la couronne, et équipés d'éoliennes mues par les alizés pour pomper de l'eau chargée en sels nutritifs et la rejeter dans le lagon. A partir de cet enrichissement se développerait une chaîne trophique aboutissant à des espèces exploitables. On peut aussi envisager de laisser s'établir et se stabiliser dans les lagons ainsi équipés des communautés benthiques qui existent naturellement autour des pinacles et des pâtés coralliens, et dont la valeur marchande est élevée (poissons, crustacés et nacres).

liens n'y apparaissent qu'au début de l'Oligocène, donc au moment du découplage thermique vertical. Depuis lors, les communautés constructrices semblent y avoir persisté avec de petits changements taxonomiques, malgré quelques périodes d'extinction vite contrées par des recolonisations<sup>(22)</sup>.

### L'énigme des guyots et des atolls ennoyés.

Cette interprétation du fonctionnement de l'écosystème constructeur pourrait éclairer le problème de la formation des « guyots ». En effet, parmi les nombreux exemples de monts sous-marins considérés comme d'anciennes îles volcaniques englouties, certains sont classés comme « guyots » à cause de leur sommet aplati

(22) R.W. Grigg,

*Science*,

240, 1737, 1988.

(23) R.W. Grigg

et D. Epp,

*Science*,

243, 638, 1989.

(24) R. Le Suavé

et al., *C.R.*

*Acad. Sci. Paris*,

11, 1013, 1986.

(25) F. Ramade,

*Les catastrophes*

*écologiques*,

Mc Graw Hill,

1986, p. 286.

(26) G.B. Pinchot,

*in Ocean Science*,

20, 231, 1977.

(27) F.

Bourrouilh

Le Jan et al.,

*Sci. Geol. Mém.*,

77, 109, 1985.

## Pour en savoir plus

● Mururoa, *Cahier du Pacifique*, CEA/CEP/Muséum National d'Histoire Naturelle, 1969.

● 5<sup>e</sup> Congrès International sur les récifs coralliens, 6 volumes, Antenne Museum, Ephe, Tahiti, 1985.

● J.H. Schroeder and B.H. Purser, *Reef Diagenesis*, Springer-Verlag, 1986.

● J.A. Fagerstrom, *The evolution of reef communities*, John Wiley, 1987.

● A. Guilcher, *Coral Reef Geomorphology*, John Wiley, 1988.

● Fondation Cousteau, *Mission scientifique de la Calypso sur le site d'expérimentation nucléaire de Mururoa*, 1988.

● Pour se procurer une bibliographie plus complète voir page 963.

LA

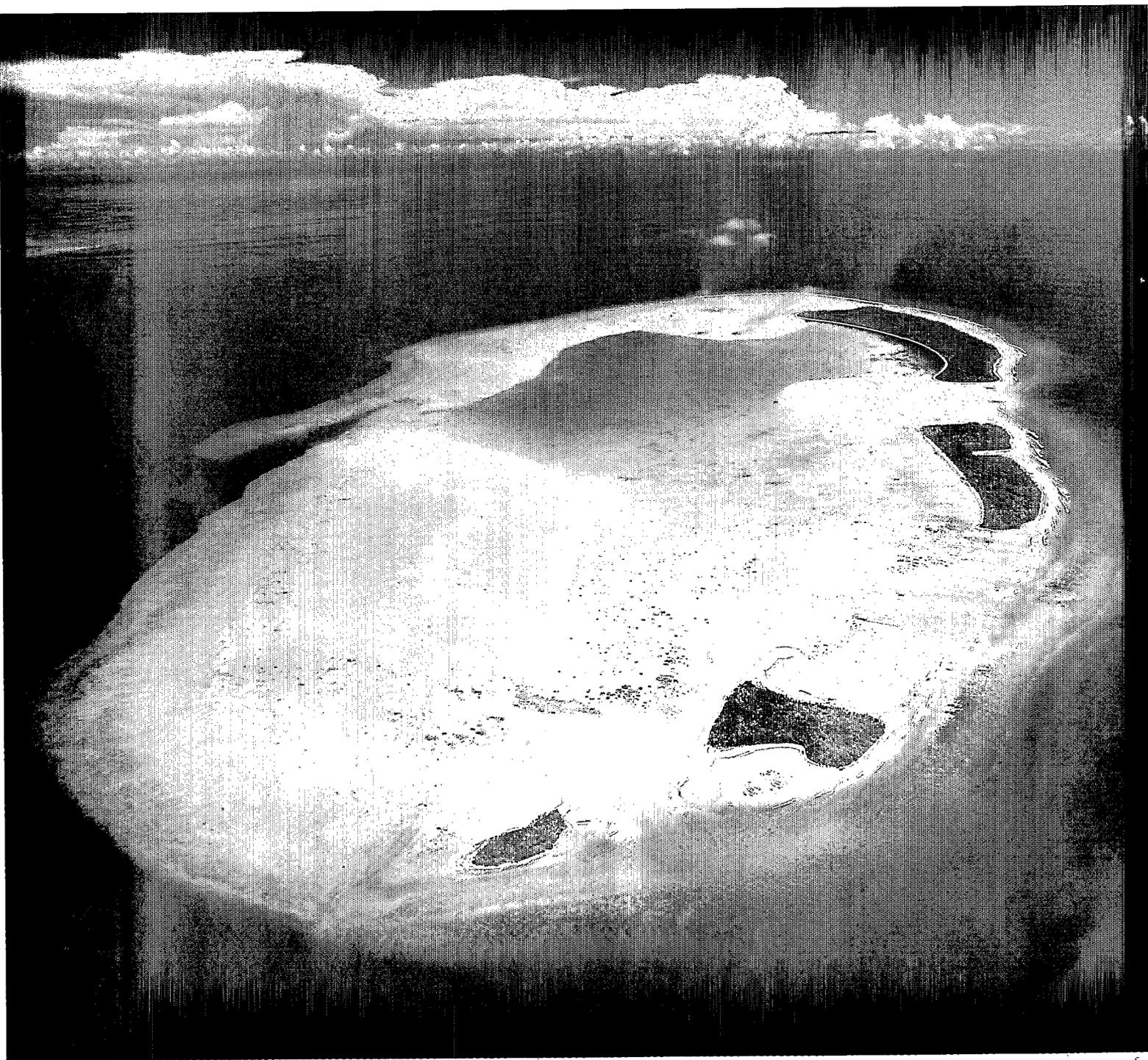
# RECHERCHE

Enquête :  
Les Français  
face au sida

M 1108-223-35 F

mensuel n° 223 juillet-août 1990 - 35 francs

**Magie et technoscience • Le magnétisme du cerveau  
Le squelette du globule rouge • Les atolls oasis**



BELGIQUE : 255 FB CANADA : 5,95 \$ ESPAGNE : 685 PTAS SUISSE : 11 FS MAROC : 28 DH TUÑISIE : 2300 MIL SÉNÉGAL : 1750 CFA

B 31215, ex 1 P 24