

# LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ :

## Controverses et nouveau modèle

F. ROUGERIE et C. JEHL

Océanographie récifale - Centre ORSTOM de Tahiti - B.P. 529, Papeete (Polynésie Française)

### RESUME

Les gisements de phosphate (Carbonate fluor-apatite ou CFA) présents sur les parties sommitales des reliefs calcaires sont à la base de la fabrication des engrais phosphatés pour l'agriculture. La distribution planétaire des gisements, leurs caractéristiques géomorphologiques et leur composition chimique révèlent de grandes similitudes, ce qui sous-tend un mode de formation unique, et ce depuis 2 milliards d'années.

Pour des raisons qualitatives (fossiles et biomarqueurs, nature de la cohorte de co-précipitation du P) et quantitatives (existence de gisements géants de plusieurs milliards de tonnes de CFA) on est conduit à lier la formation de fluor-apatite à la dégradation de matières organiques issues de mattes algaires. Seul l'océan profond pouvant fournir les nutriments et notamment le phosphore nécessaire au développement de ces mattes, la précipitation de CFA serait limitée aux zones d'upwelling, où effectivement se forment des phosphorites marines, qui sont cependant de faible épaisseur. Les autres modes de transfert du phosphore (modèle continental, oiseau-guano, dégradation des basaltes) butant sur des obstacles majeurs, nous proposons d'appliquer le modèle d'endo-upwelling géothermique ; celui-ci prend en compte le fonctionnement global des récifs et atolls par alimentation interne en nutriments, à partir de l'océan profond. L'existence d'épaisses mattes algaires à cyanophycées dans les mares et lagons dessalés des îles polynésiennes, constituerait ainsi l'étape d'accumulation de matière organique, aboutissant "in fine" à la précipitation d'apatite en gisements de dizaine de millions de tonnes, comme on les trouve sur les atolls soulevés. Ce modèle semble généralisable à l'ensemble des gisements côtiers (Floride, Maroc etc...).

### PRO LOGOS

Plus les différences de départ sont fortes, plus les rencontres peuvent être riches. C'est la différence de

potentiel qui crée l'énergie. On connaît... la pauvreté d'imagination des groupes homogènes. Formés aux mêmes écoles, ils ont les mêmes réflexes ; ils sont synchronisés, mais leur vision commune leur interdit le regard différent qui anticipe l'imprévisible. Ils sont victimes du "group thinking", une maladie de la pensée plus répandue qu'on ne le croit. Elle sécurise les membres du groupe, qui ne subiront pas l'agression d'idées "sauvages"... Or ce sont les idées sauvages, imprévues, portant un regard nouveau, un éclairage original sur nos objets de recherche, qui font avancer la science.

L. PREVOT - J. LUCAS

The PAMPHLET, n° 2, 1993

(*Palaeogeography of Authigenic Minerals and Phosphorites Letter*)

Projet UNESCO - 325

### THE PROBLEM WITH PHOSPHORUS

Phosphorus is King of the aquatic plant kingdom. Without it there would be no growth, no reproduction, and thus no life. This simple principle has been concealed from a generation of aquatic scientists seduced by the powers of the Queen Consort, Nitrogen.

..."If Phosphorus is King and Nitrogen is Queen, then a naive observer of the Chess Game of Life might prematurely conclude, after watching the moves unfolding on the board, that the Queen is all powerful and controls the game. She can move both diagonally and laterally across the board and travels long distances in one jump. Clones can be created from thin air on the back row. She literally dances over the board and controls the tempo of the game. A game without a dominant Queen is rare.

The King on the other hand, is indeed a subtle prince, spending his life sequestered on the back row. He exerts little if any influence on the flow of

the game, scarcely moving except perhaps to exchange places with his cornerstone vassal in the event of a threatened weak-side attack, and sallying forth at a single-step pace only near the end in a reckless attempt to avoid capture. He is the least dynamic member of the aristocracy, dividing his time between hiding and running away. Our observer might not discover the significance of this King until near the end of the Game.

Phosphorus is a weak King...".

By Robin D. Muench  
EOS - 1988

Les sédiments carbonatés contenant plus de 18 % de phosphore ( $P_2O_5$ ) sont appelés phosphorites et considérés comme exploitables. Le minerai constituant est connu sous le nom de carbonate-fluor-apatite (C.F.A.) de formule simplifiée (1) :

$$Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(CO_3)_x F_{0,4x+2} \quad \text{avec } x < 1,5.$$

### 1/ LES GISEMENTS DE PHOSPHATES ET LEUR EXPLOITATION

L'utilisation principale des CFA est l'agriculture (2) : le phosphore inorganique inclus dans l'ion phosphate  $PO_4$  est en effet indispensable à la production primaire des plantes (ou des algues) et constitue, au même titre que l'azote (sous forme d'ions nitrate ou ammonium) un élément nécessaire à leur croissance. A l'échelle planétaire, la consommation annuelle de phosphate est de l'ordre de 150 millions de tonnes ; ce besoin est pour l'essentiel comblé par la production de gisements géants, dont la réserve est évaluée à plusieurs dizaines de milliards de tonnes (Floride - Georgie, Maroc, Canada, Jordanie etc...). D'autres gisements ont été découverts et exploités sur des îles et atolls de l'Indo-Pacifique (Makatea, Nauru, Christmas, Clipperton etc...). Ces gisements se situent dans une gamme modeste de 10-50 millions de tonnes, mais ont fourni des phosphates à teneur élevée, (appelés fluoro-apatite) contenant jusqu'à 45 % de  $P_2O_5$ . En fait, la demande réelle de l'agriculture planétaire dépasse largement les 150 millions de t/an, mais ne peut être satisfaite, faute de financement. Il y a donc un découplage grandissant entre les besoins du tiers monde, aux champs carencés en engrais, et l'existence d'énormes réserves inutilisées. D'autres utilisations du phosphate comme celles de

complexant/adoucisseur des eaux douces (pour accroître l'efficacité des lessives et détergents) tendent à être restreintes, du fait de l'action eutrophisante des rejets en rivière, lacs (et lagons) : dopés par ce phosphore les algues opportunistes à croissance rapide tendent à étouffer les espèces benthiques (ou coralliennes). Comme le remarquait un vieux paysan jurassien. "Autrefois, les gens étaient sales, mais les rivières étaient propres et pleine de truites...".

Le traitement des minerais de CFA, nécessaire pour rendre l'ion phosphate soluble et assimilable comme engrais, est simple : on attaque le minerai de CFA avec de l'acide sulfurique et on obtient de l'acide phosphorique, que l'on peut alors combiner avec d'autres éléments (comme l'ammonium ou le potassium) pour avoir des superphosphates, utilisables comme engrais. Ce traitement entraîne cependant de redoutables risques pour l'environnement : outre la production en amont, et le transport, de dizaines de millions de tonnes d'acide sulfurique concentré, chaque tonne d'acide phosphorique produite correspond également à la production de 3 tonnes de boues riches en sulfate de calcium (gypse ou plâtre) : ce sous-produit occupe d'énormes surfaces nécessaires à sa décantation et n'est pas utilisable dans la construction : la tendance actuelle est de se débarrasser de ces boues en les envoyant dans l'océan profond aux moyens de tuyaux-émissoires ou de bennes abyssales.

Comme le réseau cristallin de la CFA permet énormément de substitutions (3), de nombreux atomes toxiques, y sont présents comme l'arsenic, le cadmium, le sélénium ou le mercure. Ces redoutables poisons, qui subsistent jusqu'au stade superphosphate-engrais, sont ainsi injectés par l'homme au début d'une chaîne alimentaire dont il se nourrit. On réalise ainsi le risque grandissant (et généralement occulté) pour les écosystèmes, de l'utilisation massive des engrais phosphatés, surtout dans la dynamique actuelle d'une inflation démographique à 2 %/an (soit 1 milliard de consommateurs de plus chaque décennie), impliquant, pour éviter la famine, une croissance d'au moins 2 %/an de l'usage des phosphates.

Des éléments naturellement radioactifs: uranium (jusqu'à 6000 ppm) et ses descendants, radium (et le radon 222) sont également présents dans les gisements de CFA (4). Ces éléments uranifères, accumulés dans les boues sulfatées après le

traitement acide, ont cependant constitué en Floride une vaste mine à portée de main sur laquelle les Etats-Unis ont bâti, à partir de 1942 leurs programmes nucléaires militaires puis civils. D'autres éléments sont également valorisés, comme le fluor (3 à 4 % dans les CFA), le vanadium et quelques terres rares. On peut légitimement s'interroger sur l'origine de cette cohorte d'éléments "exotiques" accompagnant systématiquement le phosphore dans les gisements de phosphates, question qui sera abordée au dernier chapitre.

## 2/ CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

### Distribution spatio-temporelle

La distribution planétaire des gisements de CFA, toujours proches de bassins océaniques intertropicaux, présents ou disparus (5), montre que quelle que soit la situation géographique des gisements (marge continentale, atoll normal, soulevé ou ennoyé, monts sous-marins), ceux-ci sont situés au sein de massifs calcaires ou dans leur partie sommitale et ont des épaisseurs de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres. Deux types de phosphorites peuvent être différenciés, par leur localisation, leur mode de formation et leur composition :

- les phosphorites marines (7) formées de strates fines (quelques centimètres) localisées à quelques centaines de mètres de profondeur sur les pentes continentales enrichies par un upwelling, ou sur certains monts sous-marins (28). Elles sont plus pauvres en  $P_2O_5$  mais plus riches en  $CO_3$ , F, terres rares avec une forte anomalie du Ce reflétant bien les conditions de leur formation. En général, elles ne sont pas exploitables, nombre d'entre elles se forment toujours actuellement (au large des côtes du Chili, de Namibie etc...) et leur taux de "croissance" a pu être mesuré.

- les phosphorites formées dans des bassins sédimentaires peu profonds (6) ou dans les lagons d'atoll (teneurs moyennes en  $CO_3$ , fluor (F), terres rares, anomalie du Cerium (Ce), importantes teneurs en  $P_2O_5$ ) ; ces phosphorites émergées constituent l'essentiel des gisements géants exploitables.

Les gisements sont généralement exploités à ciel ouvert (Floride, atolls), par ouverture de puits verticaux et extraction mécanique. Les petits

gisements des atolls océaniques ont été exploités à la pioche et à la pelle, le convoyage jusqu'aux navires de chargement se faisant à l'aide de wagonnets. Certains faciès sédimentaires caractéristiques sont (presque) systématiquement associés aux gisements de CFA, comme les schistes bitumineux ou les silex noirs (8). On a ainsi pu définir une trilogie biochimique phosphate-schiste-silex noir, trilogie qui sous-tend un processus de formation unitaire et ce depuis des temps très anciens : des gisements de CFA sont datés à plus de 2 milliards d'années, d'autres remontent au Précambrien et au Cambrien (600 millions d'années). Des gisements, souvent énormes se sont formés au cours des ères géologiques suivantes et ce jusqu'au quaternaire (9).

Une autre particularité des phosphorites est d'être le plus souvent associées à des dolomies ; on sait que le calcaire, carbonate de calcium ( $Ca CO_3$ ) est relativement sensible à la dissolution par les eaux de pluie (processus de karstification) mais peut se transformer en calcaire beaucoup plus résistant ou dolomie. La dolomitisation est le résultat du remplacement, dans la matrice cristalline de  $Ca CO_3$ , d'un atome de Ca par un atome de Mg. La dolomie ainsi formée est plus dure et plus poreuse que le calcaire de départ et peut constituer ainsi un excellent réservoir à pétrole. Une bonne moitié des ressources connues de pétrole est ainsi stockée dans les calcaires dolomités, eux-mêmes souvent coiffés par des horizons riches en CFA (Floride, Canada, Russie etc...). Dans le Pacifique Sud, les atolls à phosphate (Makatea, Nauru, Ocean) sont également fortement dolomités et l'on trouve des bitumes dans l'atoll soulevé de Tonga-Tabu.

Le magnésium est un puissant inhibiteur de la croissance cristalline des apatites (10). Son abondance dans tous les milieux marins suggère qu'un processus de piégeage du Mg constitue une étape préalable nécessaire à toute formation de CFA. La dolomitisation systématiquement rencontrée dans les calcaires porteurs de couches phosphatées, pourrait donc être le processus nécessaire et suffisant au piégeage du Mg : cela implique évidemment une circulation interstitielle adéquate. Si la cohorte des éléments "exotiques" inclus dans les CFA peut poser un problème écologique du fait de la toxicité de certains (As, Hg, Cd), les éléments radioactifs sont très utiles pour dater les gisements. L'état d'équilibre de la filiation de l'uranium (11) et de ses descendants radioactifs (plomb, thorium)

## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ

permet des datations jusqu'à plusieurs dizaines de millions d'années ; on utilise aussi les rapports isotopiques des strontium 87 et 86 (12) et du couple potassium 40/argon 40 pour dépasser les 15 à 20 millions d'années et remonter jusqu'au milliard.

### Géomorphologie et variabilité

La quasi-totalité des phosphorites mondiales est constituée de carbonate-fluorapatite résultant de la substitution plus ou moins importante de groupements  $PO_4$  par des groupements  $CO_3$  (1), et ce à partir d'une fluor-apatite simple. Les apatites cristallisent dans le système hexagonal, avec l'aide du fluor, nécessaire à la construction régulière des cristaux.

On évalue l'importance de la substitution par la mesure du rapport  $CaO/P_2O_5$ , rapport qui augmente avec la teneur du carbonate incorporée dans la maille de la fluorapatite :

- fluorapatite  $CaO/P_2O_5 < 1,2$
- carbonate-fluorapatite  $CaO/P_2O_5 > 1,2$

Cette capacité de substitution est contrôlée par l'alcalinité du milieu de formation de la roche mais aussi par la concentration en  $PO_4$  minéral dissous dans l'eau interstitielle, au moment de la nucléation et de la précipitation. Les phosphorites marines sont très substituées, ce qui témoigne d'une certaine variabilité de la teneur en phosphore interstitiel. En revanche, on pourrait s'étonner que les phosphorites insulaires soient assez peu substituées ( $CaO/P_2O_5 < 1,2$  pour le gisement sub-lagonaire de l'atoll de Mataiva) alors qu'elles sont logées dans un lit de carbonates coralliens. On peut en déduire que l'apport en phosphore a été saturant pour le milieu, avec précipitation d'une riche apatite "pristine" : certains nodules de Mataiva contiennent plus de 46 % de  $P_2O_5$  !

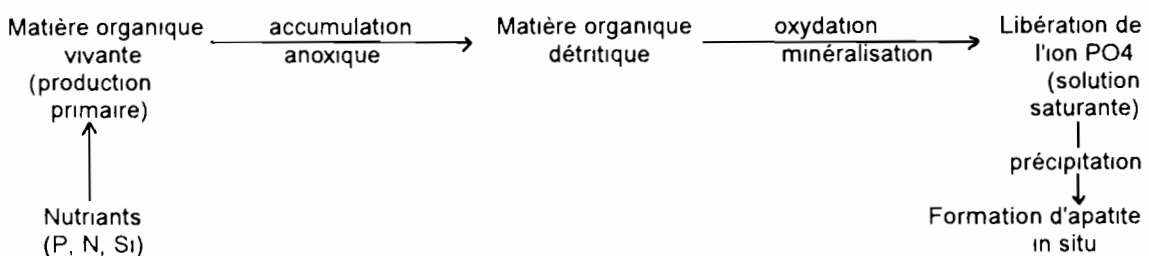
L'aspect du phosphate dans les gisements est très variable. De couleur générale plutôt beige, il en

existe aussi du blanc, noir, rose, verdâtre, jaune, rouge... Sa granulométrie couvre tout ce qui existe entre des sables fins jusqu'au banc de roche dense en passant par des graviers de toutes tailles : les grains fins sont enrobés, cimentés entre eux par une matrice phosphatée qui a pu être redétruite, érodée, puis recimentée... en passant par toutes les phases de dissolution imaginables. Dans les phosphorites continentales, on a souvent des alternances de bancs siliceux pauvres en  $P_2O_5$ , qui pourraient révéler des apports détritiques continentaux : toute dissolution de quartz libéré de la silice, favorable à la prolifération de diatomées, dont on retrouve les frustules siliceuses bien conservées dans les horizons phosphatés.

### Rôle des bactéries et de la matière organique

Une question importante concerne le rôle des bactéries dans la phosphatogénèse (13); contrôlent-elles seulement la forme de stockage du phosphore, ou participent-elles activement (ou passivement) à la nucléation des cristaux de CFA ? De nombreuses bactéries et mattes de cyanophycées (stromatolites (14) phosphatisées) sont présentes dans tous les gisements, quel que soit leur âge. Des expériences in vitro à Strasbourg (15) ont montré que de très nombreux types de bactéries et micro-organismes sont capables de faire précipiter de l'apatite à partir d'un substrat biologique, en l'espace de quelques semaines ! Des débris osseux et dents (d'hydroxyapatite) peuvent être épigénisés en CFA mais ne peuvent, pour des raisons quantitatives, fournir la matière première des grands gisements de phosphorites. On doit plutôt les considérer comme des fossiles d'accompagnement.

Le processus permettant de rendre compte du passage entre une matière organique (M.O.), riche en phosphore contenu, à une apatite issue de la précipitation de l'ion phosphate est le suivant :



La phase d'oxydation de la M.O. entraîne la transformation d'acide fulvique en acide humique, ce qui libère (sous forme dissoute) l'ion  $\text{PO}_4$  (16). Ce processus est poussé à son terme lors de la transformation ultime de l'acide humique en kérogène.

Ces oxydations/dissolutions et précipitations sont interactives avec l'encaissant calcaire, qui fournit l'ion carbonate et au sein duquel d'autres dissolutions et remaniements ioniques ont pu déjà avoir lieu.

La formation de CFA se fait donc par diagenèses multiples, dans une "soupe" très riche en phosphate dissous issu de la dégradation oxydative de matière organique accumulée pendant de longues périodes (du siècle à l'ère géologique) : l'importance quantitative de cette matière organique détritique dépend en définitive de la productivité et donc du flux de nutriments fourni au milieu biologique servant de précurseur puis d'incubateur au gisement. Quand on compare les fiches signalétiques et géochimiques des principaux gisements planétaires de CFA, on constate que malgré une certaine variabilité dans la nature et l'importance quantitative des éléments d'accompagnement du phosphore, les phosphorites présentent une forte unicité, au plan géochimique et diagénétique et ce depuis plus de 2 milliards d'années. Reste cependant la question fondamentale sur l'origine du phosphore qui entre au début du processus de phosphatogénèse : ce point a fait, et fait toujours, l'objet de vives controverses (18-17) centrées autour des 3 modèles "classiques" de phosphatogénèse.

### 3/ MODES DE FORMATION DE L'APATITE (PHOSPHATOGENESE)

#### 1°) Modèle général (Fig. 1)

Par des études de palynologie (fossiles de pollen), de géochimie (signature chimique des paléo-environnements enregistrée par les substitutions dans le réseau de la CFA), et géochimie organique (biomolécules fossilisées) (19), on a tenté de retrouver les anciennes conditions de dépôt ainsi que les différentes étapes de phosphatogénèse, qui présentent au plan planétaire, une certaine unicité. On constate que les dépôts se sont faits dans des faciès calcaires peu profonds en bordure d'un océan (20), et pouvant s'étendre jusque dans un arrière pays aride (pas d'apport de végétaux supérieurs mais quelques apports détritiques continentaux).

Depuis l'hypothèse de KASAKOV (1937), upwelling et phosphorite ont souvent été associés (17) : ce modèle propose qu'en bordure de ces bassins, un intense upwelling induise une forte productivité primaire des eaux océaniques, dont une partie envahirait des lagunes côtières et bassins : la matière organique planctonique resterait piégée grâce à des conditions hydrodynamiques favorables, avec apport à marée haute, tempête etc... Sachant que la matière organique bactérienne ou algale contient 0,1 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , chaque  $\text{m}^3$  séquestré en condition anaérobie pourrait, in fine, fournir plusieurs kg d'apatite à 20 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ; d'énormes accumulations auront donc été nécessaires pour aboutir aux gisements actuels, par l'intermédiaire de matras cyanobactériennes stockant ces matières organiques, au sein de structures organisées en strates anoxiques. Une étape de fermeture par soulèvement tectonique, permettrait de remanier le phosphore organique et de le minéraliser par oxydation, jusqu'à atteindre le point de saturation de l'apatite (6) : Plusieurs étapes de réouverture sur l'océan, apport de matières organiques exogènes et reconcentrations pourraient intervenir, avec pour conséquence un enrichissement du dépôt initial en  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou en éléments de substitution. Ce modèle de phosphatogénèse rend compte de l'empreinte marine atténuée qu'évoquent les substituants de la CFA, mais l'étape de piégeage du phytoplancton issu de l'upwelling côtier et son accumulation en grande épaisseur, reste assez difficile à concevoir quantitativement et qualitativement. De plus, l'aridité du climat, consécutive à la présence d'un upwelling, conduit inévitablement des lagunes ouvertes sur l'océan, à avoir un fort taux d'évaporation/sursalure, et donc à fonctionner comme des marais salants : on obtient des évaporites salées, pauvres en matières organiques et donc peu de phosphore séquestré.

#### 2°) Les phosphorites marines

La relation entre les zones d'upwelling et les phosphates sous-marins est en revanche incontestable le long des talus continentaux des côtes du Chili, Pérou, Maroc, Mauritanie, Namibie etc... (7). Ces phosphorites marines sont de faible épaisseur (quelques cm) et sont localisées vers 200-400 mètres de profondeur, là où les eaux marines sont peu oxygénées, suboxiques ( $\text{O}_2 < 0,5 \text{ ml/l}$ ), voire anoxiques. Cette déficience en oxygène dissous est

une conséquence inéluctable de la forte productivité marine des eaux superficielles dopées par l'apport de nutriments upwellés : La fraction détritique du plancton formée en zone éclairée s'enfonce et s'accumule sur la pente, sa dégradation par les bactéries s'accompagnant d'une forte consommation en oxygène dissous : ainsi se forment les couches subsuperficielles à minimum d'oxygène de l'océan mondial. Ces conditions d'accumulation organique détritique et donc de suboxie favorisent la séquestration de l'ion phosphate et sa précipitation ultime sous forme de CFA insoluble (Fig. 1). Du fait de leur faible épaisseur et de leur profondeur ces gisements ne sont pas exploitables : Ils ont cependant l'énorme mérite de révéler les caractéristiques génériques et les contraintes d'une phosphatogénèse actuelle, étroitement limitées aux zones enrichies par upwelling côtier...

### 3°) Modèles insulaires "classiques"

Confrontés au problème de l'origine des phosphates insulaires ou d'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 consommés par des prédateurs, dont les oiseaux. Les zones d'upwelling ne constituent que quelques % de la superficie de l'océan mondial, mais produisent les 3/4 de sa richesse biologique : les upwellings les plus remarquables longent les côtes Ouest de l'Amérique (Chili, Pérou, Californie), de l'Afrique (Benguela, Mauritanie, Maroc) où de l'Antarctique, où s'étirent le long des bandes équatoriales. 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 azotés 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 fameuse cohorte d'éléments accompagnant le phosphore des CFA et fluor-apatite : 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 CFA datés du Cambrien et au-delà, et leur similitude géochimique avec les gisements plus récents, il est évident que le modèle classique oiseau-guano est très sérieusement battu en brèche. En corollaire, s'il est vrai que les gisements des îles et atolls du Pacifique sont généralement datés à quelques milliers ou millions d'années, la similitude de leur composition géochimique et diagénétique avec des gisements très anciens est un argument très fort en faveur d'un processus de formation similaire. Ces gisements ne contiennent d'ailleurs aucune trace ou fossiles d'oiseaux alors que les guanos, même anciens, sont riches en restes aviaires (griffes, becs etc...); les phosphorites sont pourtant des milieux de fossilisation exceptionnels (21) puisqu'on y identifie facilement des faciès cyanobactériens (14) et microbiens (13). 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 (22) 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.

Par rapport au guano et aux pierres ponce, la matière organique est un moyen bien plus efficace quantitativement pour entreposer et séquestrer du phosphore, le temps d'accumuler les quantités gigantesques qui seront nécessaires pour, une fois l'étape de destruction oxydative déclenchée, obtenir un dépôt de CFA substantiel. On est donc amené à conclure que si le guano ou l'altération des basaltes peuvent fournir un peu de phosphate, ils ne sauraient représenter la source principale. Quant aux phosphorites marines, leur processus de formation semble constituer une réponse convaincante, mais partielle (17), au problème de la phosphatogénèse en général : le continuum upwelling-prolifération planctonique-sédimentation/ séquestration du phosphore paraît être une condition suffisante, illustrée par la présence et la formation actuelle de phosphorites sur les pentes continentales soumises aux upwellings. Mais outre que ces phosphorites marines sont peu épaisses, ce modèle ne saurait être considéré comme nécessaire : rien n'indique que les gros gisements d'atolls et de marges continentales aient pu être formés en zone d'upwellings, ces zones étant particulièrement restreintes ou éliminées en périodes chaudes et de transgression marine ; de plus, il faudrait identifier le processus dynamique grâce auquel un gisement marin formé sur une pente profonde, peut se retrouver en position sommitale de plateformes continentales ou d'atolls. Quant à la formation en bassin d'évaporation et lagunes côtières sursalées, on obtient peu de phosphates et beaucoup de sels et d'évaporites.

#### 4/ VERS UN NOUVEAU MODELE PAR ENDO-UPWELLING

Pour combler le vide conceptuel découlant des limites des modèles classiques, un nouveau candidat est apparu récemment (1986) et ne semble pas buter sur les difficultés précédentes. Le modèle d'endo-upwelling géothermique, conçu et proposé par des océanographes de l'ORSTOM Tahiti (23-24), se propose de rendre compte du fonctionnement des structures récifales, récif barrière et atolls (Fig. 2). Il est basé sur l'existence d'une ascension par thermo-convection, à l'intérieur des structures calcaires poreuses, d'une eau riche en sels nutritifs et oligo-éléments car originaire de l'océan profond (500

mètres et plus). Cette eau interstitielle riche débouche pour l'essentiel au niveau de l'écosystème algocorallien externe, là où l'énergie des vagues assure un nettoyage efficace et empêche le colmatage du récif poreux. Une fraction de cette richesse en nutriments dissous (nitrates et phosphates notamment) peut cependant sourdre lentement dans les lagons et atteindre les nappes phréatiques situées sous les motu 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 lagunaires 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 fluoro-apatite peut alors commencer au sein de l'horizon détritique de ces algues cyanobactériennes (appelé kopara en Paumotu), comme c'est le cas actuellement dans le lagon de Niau (Tuamotu). 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 maintenue ; on a donc un gisement se développant au sein de sédiments organiques lagunaires, gisement qui pourra éventuellement se trouver à l'air libre dans le cas d'une surrection totale de l'atoll comme à Makatea, Nauru, etc... (Fig. 3).

Les avantages phénoménologiques de ce nouveau modèle sont évidentes aussi bien au plan qualitatif que quantitatif (l'océan profond constitue un réservoir énorme de phosphore et fluor et possède la totalité de la cohorte géochimique) et chronologique (25). 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 (26).

Un des points forts de l'application du processus d'endo-upwelling à la phosphatogénèse est que l'océan profond est froid (< 5°C) et saturé en phosphate dissous ( $PO_4^{3-} = 3 \mu M$ ). Lorsque les eaux

endo-upwellées, riches en phosphate dissous, atteignent le haut des structures récifales et lagunaires, l'augmentation de température accroît le degré de sursaturation, ce qui est un facteur physique favorisant la précipitation. Cette précipitation passe cependant par une boucle biologique, par l'intermédiaire des algues cyanophycées (kopara), processus actuellement étudié en détail dans les petites mares saumâtres présentes sur les motu des atolls.

### MARES A KOPARA ET PHOSPHATOGENESE

Ces mares à kopara représentent à une échelle réduite ce que peut devenir un lagon fermé : tapissage des fonds par des mattes de cyanophycées utilisant les nutriments fournis par le système interstitiel (Fig. 4). Des analyses d'eaux : **a**) extraites du kopara par centrifugation, **b**) d'eau de surface des mares et **c**) d'eau interstitielle sous les mares, montrent que le milieu aqueux dans lequel les cyanophycées baignent est si riche que leur productivité n'est limitée que par la dimension et le volume de la mare. Les variations importantes de salinité, température, oxygène dissous interdisent la vie d'algues supérieures et limitent les compétiteurs des cyanophycées et leurs prédateurs (poissons). Ces tapis de cyanophycées sont chlorophylliens et vivants en surface (couche verte), leurs restes détritiques, colorés en rouge par des pigments caroténoïdes, sont conservés en l'état par des conditions anaérobies intenses : profitant des dernières radiations lumineuses ayant réussi à percer les mucilages, des bactéries pourpres sulfoxydantes élisent domicile sous les premiers millimètres, accompagnées par les bactéries sulfatoreductrices et méthanogènes (27). Des laminations de calcite magnésienne, précipitée in situ par nucléation sur des sites des gaines cyanobactériennes réarrangées, confèrent à ce milieu des propriétés stromatolitiques. Ces organismes sont donc capables d'initier la croissance d'un minéral et de la favoriser. Même si ce processus n'a pas encore été démontré in situ pour la cristallisation de CFA, ces cyanophycées ont néanmoins un rôle favorisant la phosphatogénèse, puisqu'elles capturent le magnésium en excès qui n'a pas été utilisé lors de la dolomitisation du sous-bassement calcaire.

Quand ce kopara commence à s'installer sur les rives

même d'un lagon confiné et en voie de dessalement comme à Mataiva ou Niau, il agit comme une éponge à nutriments de par ses propriétés physiques (le kopara est une matière très gélatineuse à cause des mucilages cyanobactériens):

- la couche de surface est imperméable au P04 organique particulaire, qui pourra être seulement libéré par oxydation ultérieure dans les strates profondes.

- cette couche est aussi imperméable à l'oxygène de l'air qui ne peut venir exercer son action destructrice sur la matière organique, en décrochant et minéralisant les groupements P04.

- cette couche protectrice est extrêmement difficile à dissocier par des actions mécaniques ou chimiques et donc résistante à l'action des houles, qui libèreraient dans l'océan le P04 organique séquestré.

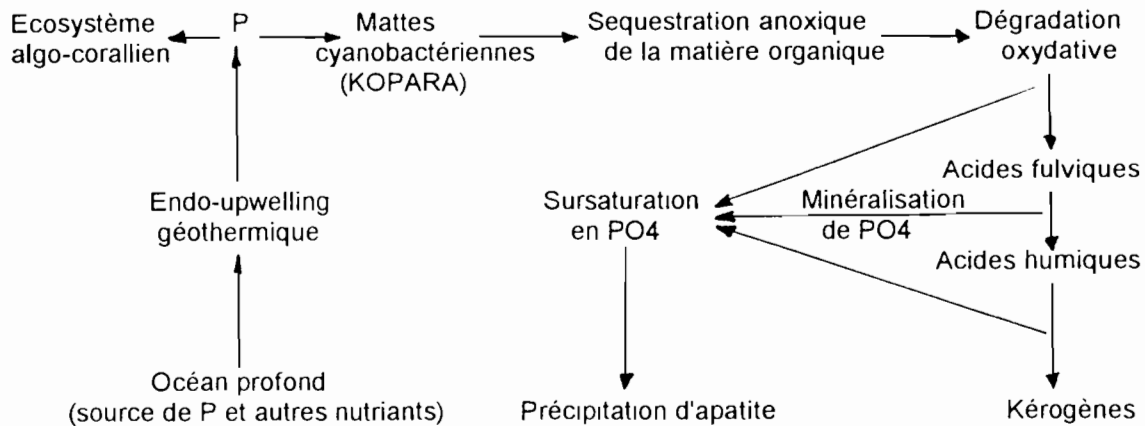
Les lagons fermés et dessalés et/ou saumâtres (NOTA) forment donc un piège et un réservoir tout à fait adapté à la croissance du kopara, comme on le constate dans l'atoll légèrement surélevé de Niau où il atteint plusieurs mètres d'épaisseur : le phosphore organique séquestré dans ce lagon de 80 km<sup>2</sup> est d'ores et déjà de l'ordre du million de tonnes ! Tout au fond de l'atoll de Niau ainsi que dans le fond de lacs à kopara à Palau (îles Carolines), on a effectivement trouvé des strates de CFA. Cette précipitation est authigène et le résidu d'une première étape "partielle" de phosphatogénèse par dégradation oxydative des premières couches de KOPARA formées immédiatement après la fermeture du lagon. Quoi qu'il en soit, les inévitables mouvements tectoniques des îles (isostasie) ainsi que les variations du niveau marin (eustasie) permettent facilement l'étape de surrection/émersion qui met le kopara (vivant et détritique) exposé à l'érosion climatologique, à la bioturbation par les crabes (innombrables à Mataiva, Clipperton, Christmas) et donc à la fameuse dégradation oxydative : cette oxydation-minéralisation libère les ions phosphates qui vont saturer le milieu interstitiel et déclencher la précipitation de fluoro-apatite insoluble. Celle-ci ne sortira plus du système même si l'atoll se transforme en atoll ennoyé ou guyot. Par contre, le gisement peut s'enrichir plusieurs fois si les conditions topographiques, climatologiques et océaniques permettent de nouvelles mises en eau des lagons et donc de nouvelles accumulations de kopara. C'est ce qui semble s'être passé dans le lagon de l'atoll de Mataiva au cours de la dernière transgression marine (+ 125 mètres entre -20.000 et -5.000 ans) (Fig. 5).



## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ

Ainsi, chaque cycle de transgression/regression marine, qui d'après le modèle astronomique de Milankovich aurait une période de l'ordre de 120.000 ans, correspondrait à la formation d'une couche de fluor-apatite insoluble. Chaque m<sup>3</sup> de kopara dégradé pouvant fournir 5 kg d'apatite à 20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, un lagon de 100 km<sup>2</sup> pourrait ainsi fournir plus d'1 million de tonnes d'apatite par cycle. Les lagons

d'atolls pouvant atteindre 1.000 km<sup>2</sup>, on conçoit que des gisements dépassant des dizaines ou centaines de millions de tonnes d'apatite (atoll Christmas, océan Indien) aient pu se former en plusieurs millions d'années. Ce raisonnement est évidemment applicable aux bassins et lagunes continentales. On peut en définitive proposer un modèle de phosphatogénèse liant les différents processus :



**Nota :** on constate que même dans la zone de très grande aridité des Tuamotu ( $E-P > 1\text{m/an}$ ) des lagons fermés peuvent être moins salés que l'océan. Ce paradoxe est dû au fait que la couronne émergée de l'atoll est alors suffisamment importante pour avoir une capacité de stockage d'eau de pluie, sous forme de nappe phréatique, égale ou supérieure au volume du lagon. L'eau douce de la nappe phréatique se déchargeant dans le lagon compense et au-delà l'évaporation, et le lagon devient saumâtre (et propice au développement du kopara).

On constate en corollaire la liaison étroite entre la phosphatogénèse et la kérogénèse. La présence de gisements de pétrole et de naphtes en milieux carbonatés, dolomités et phosphatisés ne serait donc pas le résultat d'un hasard heureux et trivial, mais la conséquence logique d'un processus bio-géo-chimique commun, dont les étapes sont particulièrement bien conservées et apparentes dans certaines îles, atolls et guyots du Pacifique.

### Perspectives

La filiation phosphore endo-upwellé/kopara/fluor-apatite présente le gros avantage de pouvoir être étudiée sur des faciès actuels et en particulier sur les atolls des Tuamotu. Ce modèle de phosphatogénèse ne bute pas sur les problèmes qualitatifs, (variabilité de la cohorte des éléments de co-précipitation du phosphate) et quantitatifs relevés dans les modèles traditionnels (28). On peut donc envisager son application aux nombreuses îles et atolls du Pacifique possédant des lagons et lagunes saumâtres à kopara et/ou des gisements de fluor-apatite déjà individualisés (si ce n'est exploités). L'extension de ce modèle à certaines bordures continentales carbonatées comme la Floride ne devrait pas rencontrer de

difficultés particulières. En ce qui concerne les gisements géants de bordures continentales et ceux d'époque très anciennes y compris Précambrienne, 2 points sont à considérer pour une généralisation globale :

- la nécessité d'avoir un endo-upwelling alimentant les bassins et lagunes continentales, implique que le substrat soit poreux (calcaires, grès etc...) et le flux géothermique suffisant. Ce flux est de fait plus élevé au niveau des marges continentales actives et limites de plaques tectoniques. Il était globalement plus élevé avant le Cambrien ;

- la nécessaire phase d'accumulation/ séquestration du phosphore par des mattes algaires implique que leur présence soit antérieure à celle de la formation des plus anciens gisements de phosphate (- 2,2 milliards d'années). Le fait que les algues stromatolitiques, dont les descendants actuels les plus remarquables sont justement les cyanophycées à kopara, soient apparus au tout début de l'organisation de la vie marine il y a 3,5 milliards d'années, rend ce préalable tout à fait plausible.

On pourra cependant continuer à opposer les 2 alternatives : soit une origine phosphorite marine par dégradation des planctons d'upwelling, précipitation sous-marine, puis émergence ; soit endo-

## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ

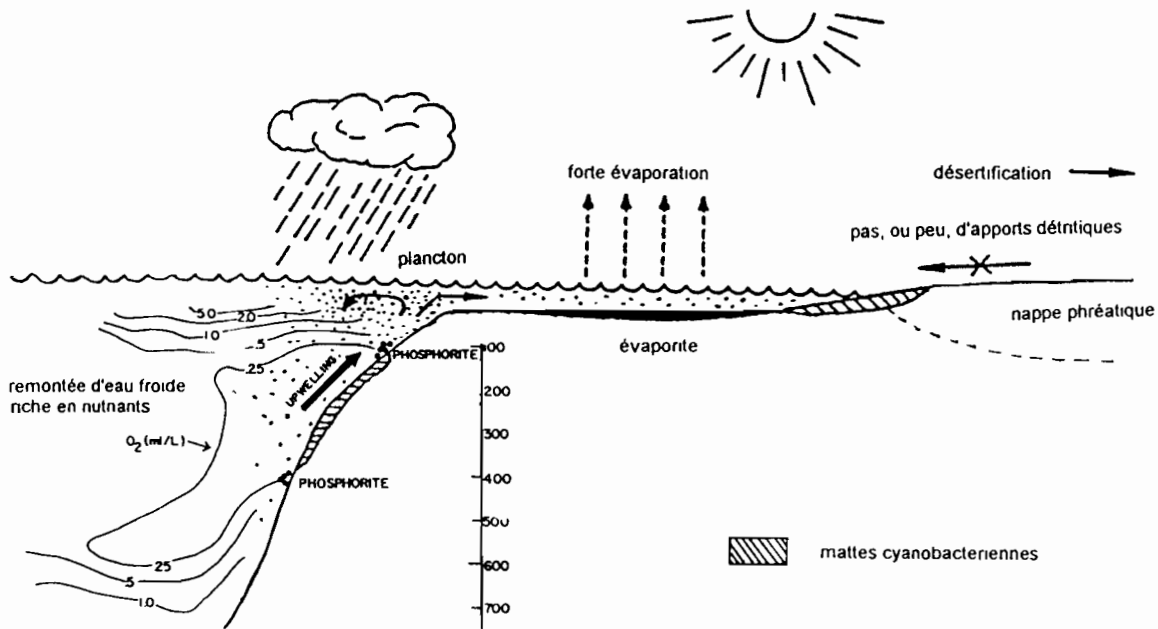
upwelling au sein de massifs poreux et récifs, alimentation en nutriments de bassin confinés et lagons fermés, accumulation de mattes algaires et précipitation in situ. Le débat reste ouvert, et aux traditionnelles controverses s'ajoutent la prise en compte de ce nouveau modèle, comme cela a été le cas pour les phosphates de l'atoll de Nauru (25) et d'autres atolls du Pacifique (29).

Ceci est une contribution au projet IGCP 325 : PHOSPHORITES.

### PISTES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Schuffert J.D., Kastner M., Emanuelle G., Jahnke R.A., 1990.- Carbonate ion substitution in francolite : A new equation. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, vol. 54, pp. 2323-2328.
- (2) Sheldon R., 1982.- Les phosphates. *Pour la Science*, août 1982, pp. 34-41.
- (3) McArthur J.M., Benmore R.A., Coleman M.L., Soldi C., Yeh H.W., O'Brien G.W., 1986.- Stable isotopic characterisation of francolite formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 77, pp. 20-34.
- (4) Starinsky A., Katz A., Kolodny Y., 1982.- The incorporation of uranium into diagenetic phosphorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, pp. 1365-1374.
- (5) Cook P.J., McElhinny M.W., 1979.- A reevaluation of the spatial and temporal distribution of sedimentary phosphate deposits in the light of plate tectonics. *Economic Geology*, vol. 74, pp. 315-330.
- (6) Lucas J., 1992.- Les dépôts de phosphate sur le continent africain. *In : Phosphorus Cycles in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. SCOPE-UNEP Workshop, Nairobi, 1991*, pp. 157-168.
- (7) Baturin G.N., Bezrukov P.L., 1979.- Phosphorites on the sea floor and their origin. *Marine Geology* 31, pp. 317-332.
- (8) Lucas J., Prevot L., 1975.- Les marges continentales pièges géochimiques ; l'exemple de la marge atlantique de l'Afrique à la limite Crétacé-Tertiaire. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7, XVII, n° 4, pp. 496-501.
- (9) Filippelli G.M., Delaney M.L., 1992.- Similar phosphorus fluxes in ancient phosphorite deposits and a modern phosphogenic environment. *Geology* 20, p. 709-712.
- (10) Martens C.S., Harris R.C., 1970.- Inhibition of apatite precipitation in the marine environment by magnesium ions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, pp. 621-625.
- (11) Roe K.K., Burnett W.C., 1985.- Uranium geochemistry and dating of Pacific island apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, pp. 1581-1592.
- (12) McArthur J.M., Sahami A.R., Thirlwall M., Hamilton P.J., Osborn A.O., 1990.- Dating phosphogenesis with strontium isotopes.
- (13) Cayeux L., 1936.- Existence de nombreuses bactéries dans les phosphates sédimentaires de tout âge. Conséquences. *C.R. Acad. Sc. Paris* (7 dec. 1936), pp. 1198-1200.
- (14) Southgate P.N., 1986.- Proterozoic and Cambrian phosphorites-specialist studies : Middle Cambrian phosphatic hard-grounds, phosphorite profiles and stromatolites and their implications for phosphogenesis. *In : Phosphate Deposits of the world, vol. 1, Proterozoic and Cambrian Phosphorites*. Cook M.J. and Shergold J.M. eds. Cambridge University Press, pp. 327-351.
- (15) Hirschler A., Lucas J., Hubert J.C., 1990.- Bacterial involvement in apatite genesis. *FEMS Microbiology Ecology*, 73, pp. 211-220.
- (16) Nissenbaum A., 1979.- Phosphorus in marine and non marine humic substances. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, vol. 43, p. 1973-1978.
- (17) O'Brien G.W., Veeh H.M., 1983.- Are phosphorites reliable indicators of upwelling ? From : Coastal Upwelling, E. Suess and J. Thiede eds., Plenum, pp. 399-419.
- (18) Bentor Y.K., 1980.- Phosphorites. The unsolved problems. *SEPM Special Publication* n° 29, pp. 3-18.
- (19) Belayouni H., Slansky M., Trichet J., 1990.- A study of the organic matter in Tunisian phosphates series : relevance to phosphorite genesis in the Gafsa Basin (Tunisie). *Organic Geochemistry*, vol. 15, n° 1, pp. 47-72.
- (20) Froelich P.N., Bender M.L., Luedtke N.A., Heath G.R., De Vries T., 1982.- The marine phosphorus cycle. *American Journal of Science* 282, pp. 474-511.
- (21) Lucas J., Prevot L., 1991.- Phosphates and fossils preservation. *In : Topics in Geobiology, vol. 9 : Releasing the Data locked in the Fossil Record*. P.A. Allison and D.E.G. Briggs eds. Plenum Press, New York, pp. 389-405.
- (22) Bourrouilh Le-Jan F., 1992.- Evolution des karsts océaniques (karsts, bauxites et phosphates). *Karstologia*, n° 19, pp. 31-50.
- (23) Rougerie F. et Wauthy B., 1989.- Une nouvelle hypothèse sur la genèse des phosphates d'atolls : le rôle du processus d'endo-upwelling. *C.R. Acad. Sc., Paris*, t. 308, Série II, p. 1043-1047.
- (24) Rougerie F. et Wauthy B., 1993.- The endo-upwelling concept : from geothermal convection to reef construction. *Coral Reefs*, 12, p. 19-30.
- (25) Bernat M., Loubet M., Baumer A., 1991.- Sur l'origine des phosphates de l'atoll corallien de Nauru. *Oceanologica Acta*, vol. 14, n° 4, pp. 325-330.
- (26) Kohout F.A., 1965.- A hypothesis concerning cyclic flow of salt water related to geothermal heating in the Floridan aquifer. *Trans New York Acad. Sci.*, 28, p. 249-271.
- (27) Defarge, Trichet J., Siu, 1985.- Premières données sur la biogéochimie des dépôts de kopara de l'atoll de Rangiroa. *Proc. of the 5th. Inter. Coral Reefs Congress, Tahiti*, vol. 3, p. 365-370.
- (28) Cullen D.J., Burnett W.C., 1986.- Phosphorite associations on seamounts in the tropical southwest Pacific Ocean. *Marine Geology* 71, pp. 215-236.
- (29) Trichet J. and Fikri A., 1993.- Information given by organic matter on the origin of insular phosphorites. Concepts and controversies in phosphogenesis. *International Symposium Interlaken*. Abstract.

## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ



d'après LUCAS et PREVOT (1993), modifié.

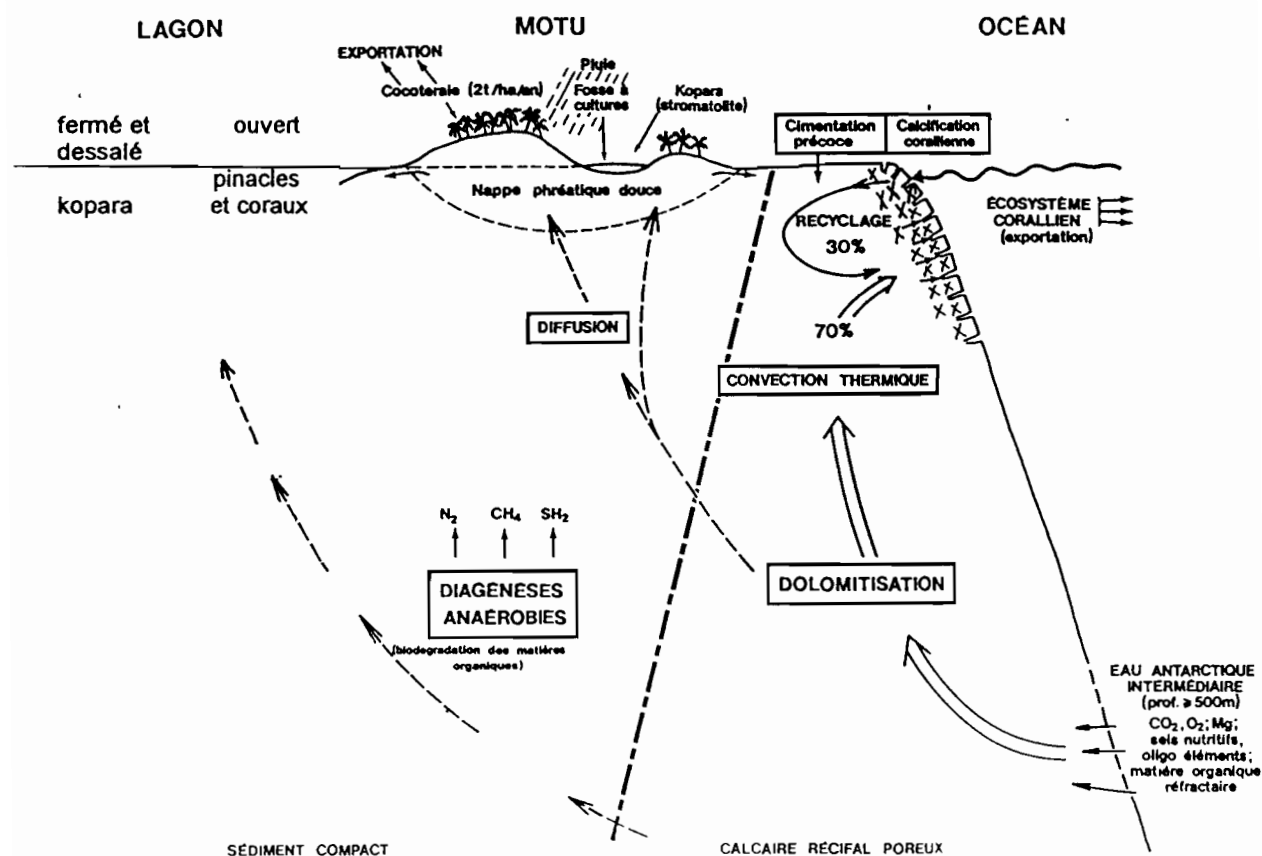
**Fig. 1 : Upwellings côtiers et phosphatogénèse**

L'upwelling côtier fait remonter les nutriments de l'océan profond, ce qui provoque une forte productivité primaire au sein de la couche éclairée. La mort des organismes planctoniques entraîne un taux de sédimentation important ; le recyclage de ces matières organiques détritiques par des cyanobactéries tend à enrichir l'eau interstitielle en phosphore. L'apatite précipite dans la zone d'interface oxié-anoxie, à quelques centimètres à l'intérieur du sédiment marin. Ainsi se forment les phosphorites marines sur les pentes continentales soumises aux upwellings (Pérou, Namibie, Ouest du continent Indien...).

Pour les phosphorites continentales, le modèle pourrait être identique dans la première phase, la pente externe étant remplacée par un bassin côtier peu profond sensé avoir une grande capacité d'accumulation de mattes organiques. Cependant, du fait de l'aridité du climat consécutive à la présence d'un upwelling, cette configuration va surtout aboutir à la formation d'une évaporite hypersalée avec précipitation de chlorures et de sulfates, plutôt que d'apatite.

Le modèle de phosphatogénèse par upwelling côtier rend bien compte des phosphorites marines, dont l'épaisseur est cependant toujours faible et l'intérêt économique restreint. Pour les phosphorites des marges continentales, îles tropicales et atolls, dont les gisements (dizaines de millions à milliards de tonnes) se trouvent en position somitale, ni la relation systématique avec des upwellings côtiers, ni la nature du mécanisme de transfert du phosphore upwelling n'ont pu être établis, ce qui limite d'autant la portée de ce modèle.

## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ



**Fig. 2 : Implications du concept d'endo-upwelling géothermique**

Le flux endo-upwellé permet de rendre compte de :

1°) Au niveau de la barrière récifale

- la calcification corallienne et le développement de l'aproduction organique autotrophe.
- la cimentation précoce des débris coralliens jusqu'au stade barrière récifale lithifiée.
- la dolomitisation du calcaire récifal profond, ce qui accroît la solidité et la porosité du récif.

2°) Au niveau de l'anneau émergé

- l'enrichissement de la nappe phréatique par diffusion des nutriments, base de la richesse végétale de l'atoll et la production de la cocoterai.
- le développement, dans des mares dessalées, d'algues stromatolitiques (kopara).

3°) En lagon ouvert

- la construction des pinacles, au débouché de fissures du sédiment compact.

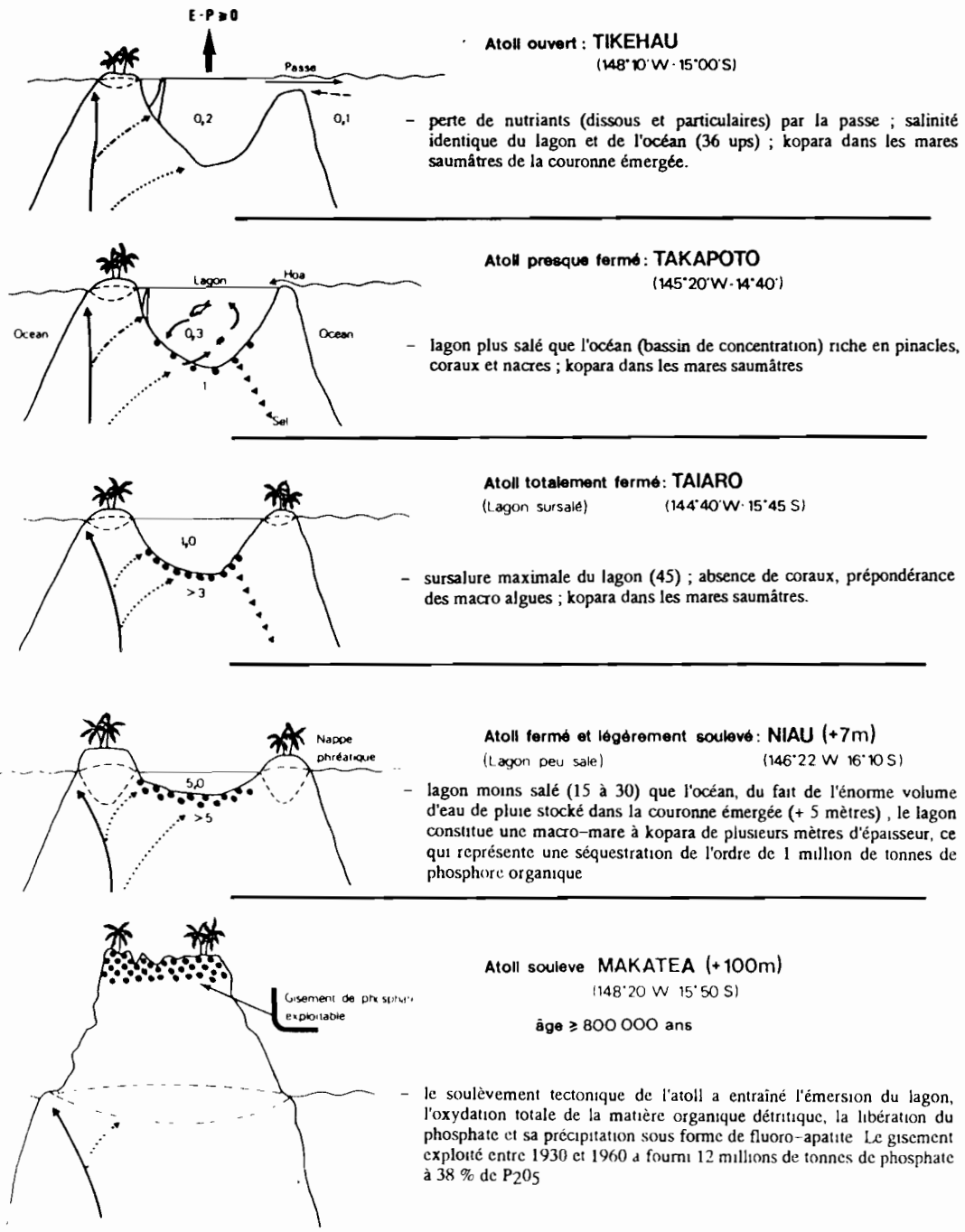
En lagon fermé

- colonisation exclusive par le kopara (stockage de matière organique riche en phosphore)

4°) Sous le lagon

- les transformations minéralogiques en milieu sans oxygène (diagénèses anaérobies), conduisant à des dégagements de méthane, anhydride sulfureux, azote...

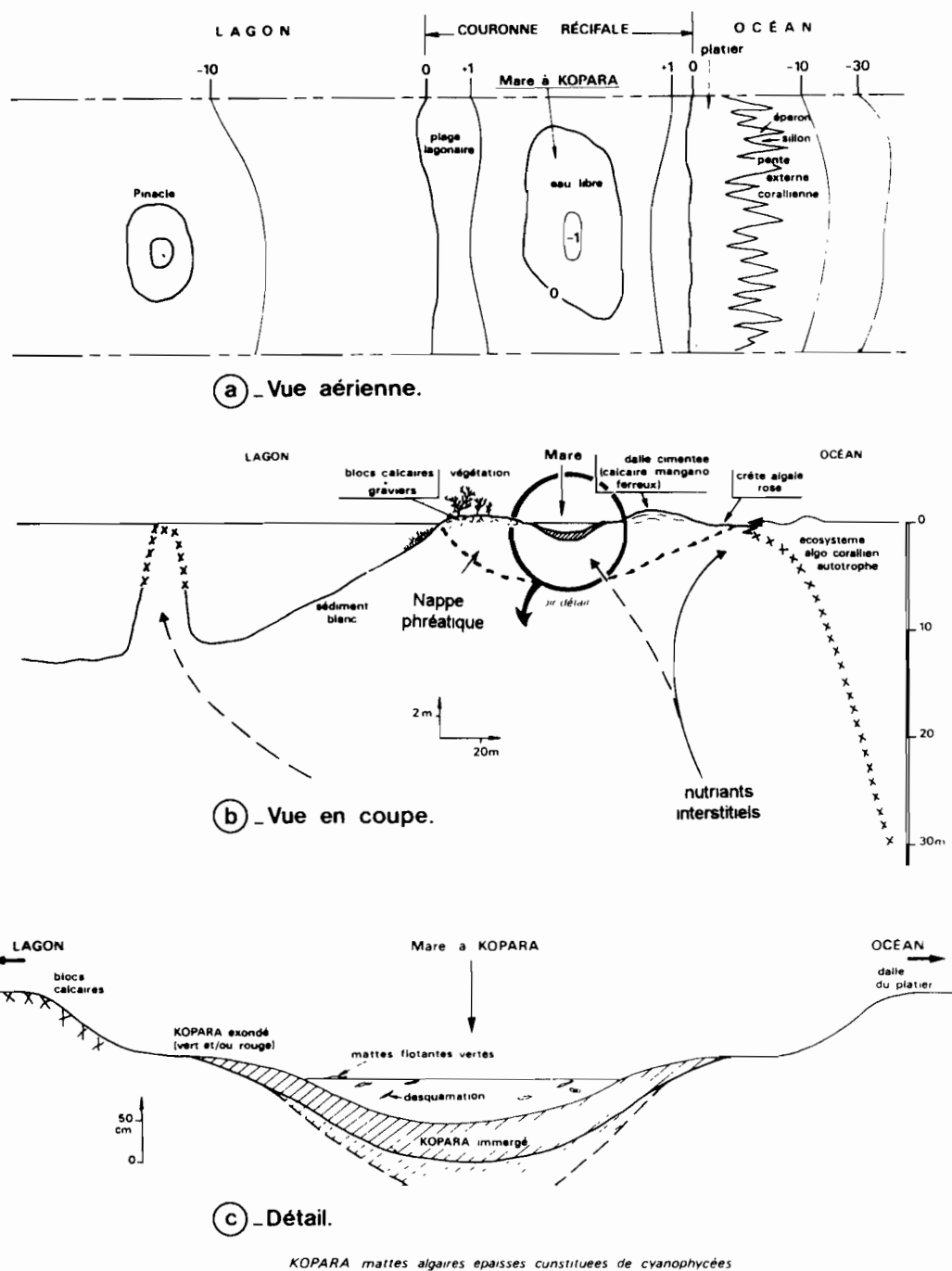
## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ



**Fig. 3 :** Phosphatogénèse selon le modèle phosphore endo-upwellé mottes algaires (KOPARA) précipitation de fluoro-apatite. La phosphatogénèse est rendue possible par la conjonction de plusieurs facteurs :

- apport de phosphore océanique profond par endo-upwelling.
- existence de mares ou de lagons peu salés à saumâtres, favorables au développement de mottes algaires (KOPARA) dont la partie détritique anoxique peut séquestrer d'énormes quantités de phosphore organique.
- assèchement du lagon (régression marine) ou émergence de l'atoll (soulèvement tectonique) permettant l'oxydation de la matière organique issue du kopara détritique, le relâchement du phosphore sous forme d'ion phosphate et sa précipitation sous forme de fluoro-apatite (ou CFA) insoluble. Ce modèle est aisément applicable aux systèmes insulaires et marges continentales comme la Floride. Sa généralisation aux gisements très anciens implique une antériorité et une universalité du processus d'endo-upwelling.

## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ



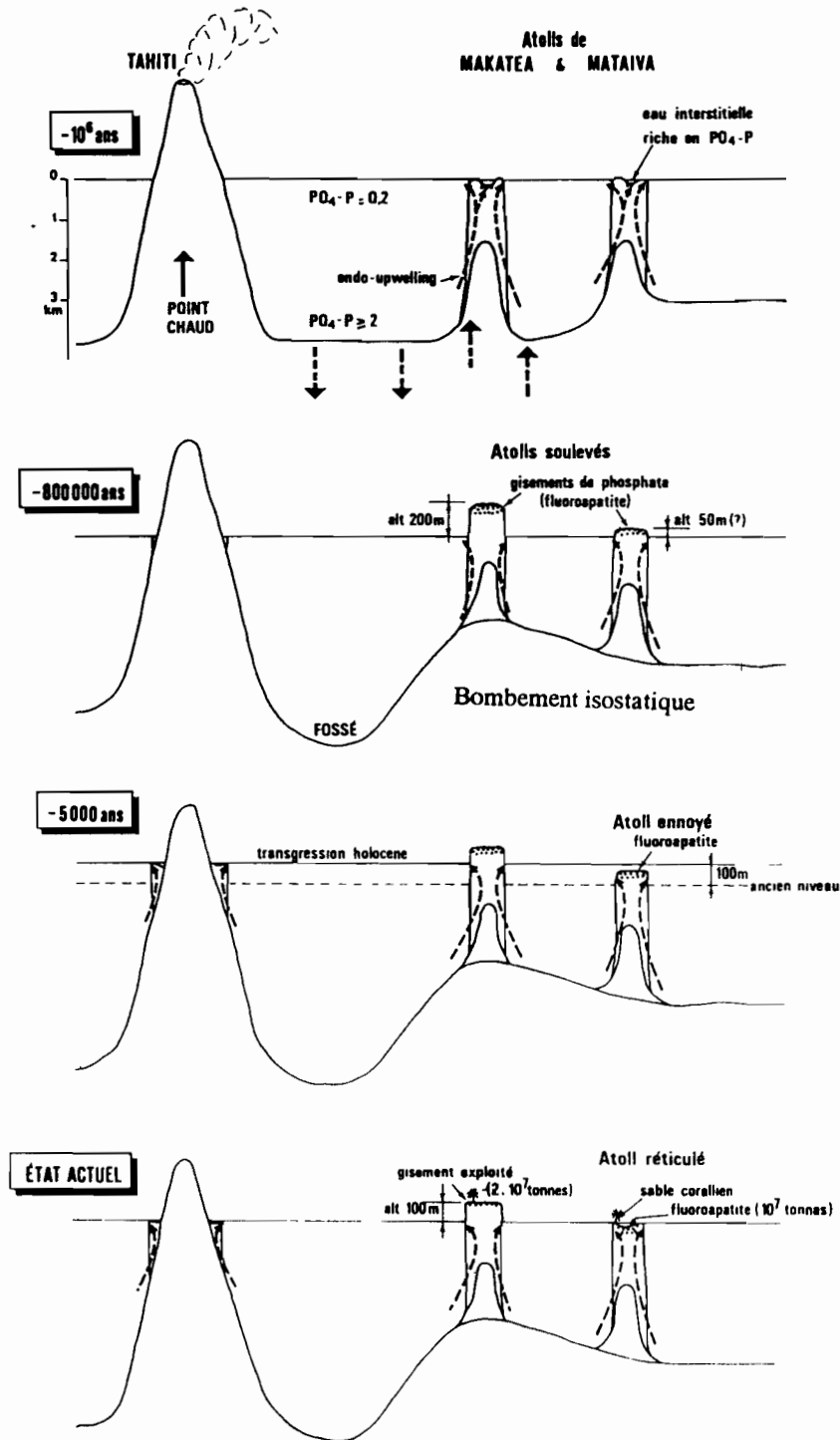
**Fig. 4 : Localisation et fonctionnement d'une mare à KOPARA**

Les mares à KOPARA ne peuvent persister que dans les zones protégées des houles océaniques et lagonaires. Elles occupent donc les déclivités relatives (- 1 mètre) des zones émergées et îlots (motu) des couronnes d'atoll. Les mares sont saumâtres, de couleur verte (pigments chlorophylliens) et/ou rouges (pigments caraténoides) et constituent des "fenêtres" ouvertes sur le milieu interstitiel et phréatique récifal. Leur colonisation par les mottes algaires cyanophycées (KOPARA) peut être totale et remonter à plus de 1 000 ans ; l'épaisseur du KOPARA (vivant et détritique) peut alors dépasser le mètre.

Les lagons dessalés comme Niau ou Mataiva fonctionnent (ou ont fonctionné) comme de gigantesques mares à KOPARA, dont l'accumulation (en condition anoxique) peut représenter des millions de tonnes de matière organique. Des plattiers exondés d'île haute peuvent également être riches en bassins à KOPARA (Îles de Maïao, Tahaa, Moorea, ...).



## LE DOSSIER PHOSPHATE REVISITÉ



**Fig. 5 : Scénario d'évolution des deux atolls à phosphate de Makatea et Mataiva depuis 1 million d'années**

Le bombement tectonique engendré par le poids du volcan Tahiti entraîne la fermeture des lagons, leur dessalure puis l'émergence complète ces deux atolls, qui possèdent alors une certaine masse d'apatite insoluble, formée selon les schémas précédents. L'émergence de Makatea, supérieure à 200 mètres, est telle que le plateau de l'atoll soulevé est resté hors de portée des fluctuations eustatique du niveau océanique. A Mataiva en revanche, le haut niveau (+ 120 mètres) atteint il y a 5 000 ans a permis à l'océan de rattraper à nouveau la couronne de l'atoll : le gisement d'apatite, formé il y a 0,5 à 1 million d'années, s'est alors recouvert des quelques mètres de sables coralliens issus de la calcification récente de la couronne corallienne externe.

*A*ctes des Troisièmes Journées  
de la Recherche en Polynésie Française

**LES ÉCOSYSTÈMES**



Institut Mathilde Frébault  
27 et 28 Octobre 1993