

La couverture carbonatée d'un atoll : exemple de Mururoa et Fangataufa

Danièle C. BUIGUES (1)

The carbonate cover of an atoll: example of Mururoa and Fangataufa

Géologie de la France, n° 3, 1998, pp. 87-96, 8 fig.

Mots-clés : Mururoa, Fangataufa, Variations du niveau marin, Dolomitisation, Karst, Pentas récifales, Calcaires crayeux.

Key words: Mururoa, Fangataufa, Sea-level variations, Dolomitization, Karst, Reef slopes, Chalky limestone.

Résumé

La genèse des atolls de Mururoa et Fangataufa a fortement été conditionnée par les discontinuités structurales de la plaque océanique Pacifique, elles-mêmes à l'origine des zones d'alimentation magmatique des édifices. Ainsi, à Mururoa, les zones d'alimentation magmatique, d'orientation globalement E-W ont conditionné la forme allongée de l'atoll ; en revanche, à Fangataufa, ces zones ayant une distribution plus ou moins radiale ont donné à l'atoll une allure typique de mont sous-marin. La construction des atolls s'est faite de manière discontinue dès les premiers stades de son édification. Les plus anciennes discontinuités sont traduites par les horizons carbonatés présents dans les séries volcaniques des deux atolls. La morphologie terminale des volcans, comportant au moins deux culminations à Mururoa et un seul édifice tabulaire à Fangataufa, a conditionné la structure de la couverture sédimentaire. Ainsi, l'épaisseur de la série varie depuis la périphérie (330 à 570 m) jusqu'au centre des lagons (130 à 230 m), la plus importante se trouvant à la périphérie, à l'aplomb d'anciennes vallées creusées au sein de l'édifice volcanique. Cette couverture se compose d'une série basale volcano-sédimentaire recouverte par une série récifale de nature strictement carbo-

natée comprenant de bas en haut des dolomies puis des calcaires. Le corps dolomitique se trouve généralisé à l'ensemble du lagon à Fangataufa et est inexistant au centre du lagon à Mururoa. A la périphérie des deux atolls, la série est exclusivement calcaire et présente de spectaculaires phénomènes de cimentation (-200 à -450 m) ainsi qu'un corps à texture crayeuse (à partir de -450 /-500 m). A travers la masse récifale, des échanges thermiques se font principalement par convection.

La série sédimentaire a commencé de s'édifier avec l'arrêt de l'activité volcanique, vers 9,5 Ma à Mururoa et vers 9,6 Ma à Fangataufa. L'ensemble de la série présente des surfaces d'émersion et des horizons karstiques, généralement étendus à tout l'édifice. A Mururoa, les résultats de datations ainsi que les observations sous-marines des pentes récifales ont largement contribué à la connaissance de la structure de l'atoll notamment à la périphérie. L'anneau corallien apparaît ainsi constitué par une superposition de corps récifaux mis en place successivement l'un au-dessus de l'autre en fonction des variations du niveau marin. L'édification de la série a présenté des stades initiaux de récifs frangeants à la périphérie des îles volcaniques en cours de subsidence. Progressivement les for-

mations coralliennes se sont étendues vers le centre des édifices tout en recouvrant les pics volcaniques résiduels. A ce stade, les lagons étaient limités en superficie et peu profonds. Les émersons répétées des édifices ont largement modifié la morphologie des îles. Ainsi la forme actuelle de l'atoll a été atteinte progressivement par suite d'une différenciation entre le centre et la périphérie lors de périodes de baisse du niveau marin, et ce principalement au Pléistocène.

Abridged English version

Mururoa and Fangataufa atolls are the emerged parts of islands formed on the Pacific plate. Their build-up has been governed by the structural discontinuities of this oceanic plate. The rift-zones making up the framework of these massifs are elongate and parallel to the "Austral fracture zone" at Mururoa, but are nearly radial at Fangataufa, which is more typical of a classic seamount. The morphology of the volcanoes also differs; at least two classic cone-shaped volcanoes are observed at Mururoa, whereas a single flat one is seen at Fangataufa.

The numerous boreholes that have been cored in both atolls, vertically under the rims and the lagoons as well as with a seaward deviation through the rim of

(1) CEA/DASE, Laboratoire de Détection et de Géochronique, BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel. E-mail : buigues@ldg.bruyeres.cea.fr.

Mururoa, have revealed a discontinuous construction of the atolls ever since the initial stages. Within the volcanic basement of both atolls, beds of reef carbonate attest gaps in the volcanic activity. The distribution of these carbonates is related to the occurrence of the rift-zones, which controlled the sedimentation when they were active. With a greater abundance at Mururoa and occurring both under the rim and the lagoon, these beds are less extensive at Fangataufa. In both atolls, they occur at the same depths.

The sedimentary pile covering the volcanoes comprises a basal volcano-sedimentary succession and a carbonate cap composed of dolomite passing up into limestone. The total thickness of the succession is related to the topography of the volcanoes, the thickest deposits (570 to 330 m) being located at the periphery as well as above volcanic valleys, while the thinnest layers (130 to 230 m) are in the centre above the volcanic summits where the volcano-sedimentary layer is absent. The geometry of the dolomite body is conditioned by the volcanic topography. With its top currently situated at the same depth in both atolls (-190/-210 m), the dolomite layer does not exist at the centre of Mururoa, but at Fangataufa is spread out over the whole massif. At the periphery, the series is composed exclusively of limestone that shows well-formed marine cements (-200 to -450 m) and a chalky body beneath (-450/-500 m). Throughout the carbonate sequence, thermal exchanges occur by convection between oceanic waters and subsurface fluids.

The deposition of the sedimentary pile began concurrently with the cessation of volcanic activity, around 9.5 Ma at Mururoa and 9.6 Ma at Fangataufa. At both atolls, the sedimentary succession contains exposure surfaces and numerous karst horizons, the latter extending laterally under the whole atoll from the periphery to the centre.

At Mururoa, radiometric dating (^{14}C , U/Th and magnetostratigraphy) from the rim vertically down to a depth of 300 m and laterally behind the reef wall has been carried out along with submarine observations of the slopes down to 1200 m by a ROV. These interesting

results increase our knowledge about the structure of the atoll and support earlier ideas concerning the construction of the atoll. In particular, the upper rim (0 to -200 m) appears to be composed of successive reef bodies that have been deposited one above the other in step with the different Pleistocene sea-level variations. A vertical wall occurs between -100 m and -280/-300 m and exhibits some notches. At a depth of about -150 m, the notches appear to represent the sea-level stand during the last emersion of the atolls 18 Ka ago. Above -80/-100 m, some terraces are correlated with the exposure surfaces of the upper Pleistocene units.

All of these results, as well as the great similarities between the two atolls, clearly show that several emersions have occurred during the build-up of the atolls. The reef carbonates present in both volcanic massifs indicate that the earliest emersions occurred during the early stages of volcanic activity around 10 to 11 Ma. Karstification currently found at different depths within the sedimentary succession indicates several post-Miocene emersions, and not only of Pleistocene age. The build-up of the reef cap of the atoll began with reefs fringing the periphery of the subsiding volcanic islands. Progressively, the reef formations grew above the centre of the volcanic massifs covering over the highest residual volcanic summits. At this stage, the constructive reef areas extended over the whole massif, while the lagoonal areas were restricted and shallow. Successive emersions have modified the islands' morphology. The final atoll shape is the consequence of a gradual differentiation between the centre and the periphery that occurred during the Pleistocene in response to sea-level variations.

L'influence de la structure du soubassement volcanique

Parmi les 83 atolls de la Polynésie française, Mururoa (21° 50' S, 138° 53' W) et Fangataufa (22° 14' S, 138° 44' W) constituent deux sites particulièrement bien reconnus, tant dans le volcanisme que dans les carbonates (Guille *et al.*, 1995 ; Buigues, 1997). Ces deux atolls à la morphologie bien distincte

(fig. 1), illustrent parfaitement l'influence de la structure du soubassement volcanique sur la morphologie de la partie strictement corallienne de l'atoll. Les nombreuses études géologiques menées sur ces deux sites indiquent que la genèse de la « chape corallienne » des atolls a été également conditionnée par des discontinuités structurales de la Plaque Pacifique (Buigues *et al.*, 1992). En effet ces dernières, à l'origine des principales zones d'alimentation magmatique des édifices volcaniques, ont constitué l'ossature des atolls actuels ayant servi de base à l'installation des récifs. Ainsi à Mururoa, les zones d'alimentation magmatique, d'orientation globalement E-W, parallèle à la « Zone de Fracture des Australes », ont conditionné la forme allongée de l'atoll qui comportait au moins deux culminations volcaniques. A l'inverse, à Fangataufa, les zones d'alimentation magmatique ayant eu une distribution plus ou moins radiale, ont été à l'origine d'un édifice beaucoup plus typique d'un mont sous-marin représenté par un volcan globalement circulaire et tabulaire (fig. 2). De plus, à Mururoa, la présence de la passe interrompant la couronne corallienne au nord-ouest sur une largeur de 4,5 km et une profondeur de 1 à 9 m (Buigues *et al.*, 1993), aurait été conditionnée par l'existence d'une ancienne vallée entre les deux édifices principaux du volcan Mururoa. A l'inverse la forme quasi-circulaire, du volcan Fangataufa a été propice à la création d'un lagon unique et resté fermé.

Édification discontinue dès les premiers stades

Les nombreux forages recoupant l'ensemble des formations sous la couronne et sous le lagon des deux atolls, ainsi qu'une partie des flancs de Mururoa, ont montré que la construction des atolls s'est en grande partie faite de manière discontinue (Gachon et Buigues, 1985 ; Berbey, 1986). Ainsi les horizons carbonatés d'origine récifale présents au sein de la série volcanique des deux atolls témoignent de plusieurs interruptions dans l'édification (fig. 3, Buigues, 1996 et 1997). Toutefois ces horizons sont absents à l'aplomb des principales zones d'alimentation magmatique. Fréquents à Mururoa, sous la couronne et sous le

lagon, ces horizons carbonatés sont moins bien individualisés et moins étendus à Fangataufa où on ne les trouve que sous les flancs. Dans les deux atolls, on les rencontre cependant à des profondeurs équivalentes.

La couverture sédimentaire

L'épaisseur de la couverture sédimentaire dépend de la topographie des édifices volcaniques. Ainsi elle varie du simple au double (Fangataufa) voire au triple (Mururoa) du centre du lagon (130 à 230 m) vers la périphérie à l'aplomb de la couronne actuelle (entre 330 à 570 m). L'épaisseur la plus importante se trouve à l'aplomb d'anciennes vallées creusées dans le volcan. En approchant l'océan, l'épaisseur de la série augmente (fig. 4).

La couverture sédimentaire est composée d'une série basale volcano-sédimentaire recouverte par une série récifale strictement carbonatée.

La série volcano-sédimentaire correspond aux premiers stades d'installation des récifs sur un substratum volcanique plus ou moins altéré. Inexistante sur les points hauts des volcans, cette série présente son épaisseur maximale, d'environ une centaine de mètres, à l'aplomb des plus importantes vallées (Berbey, 1989).

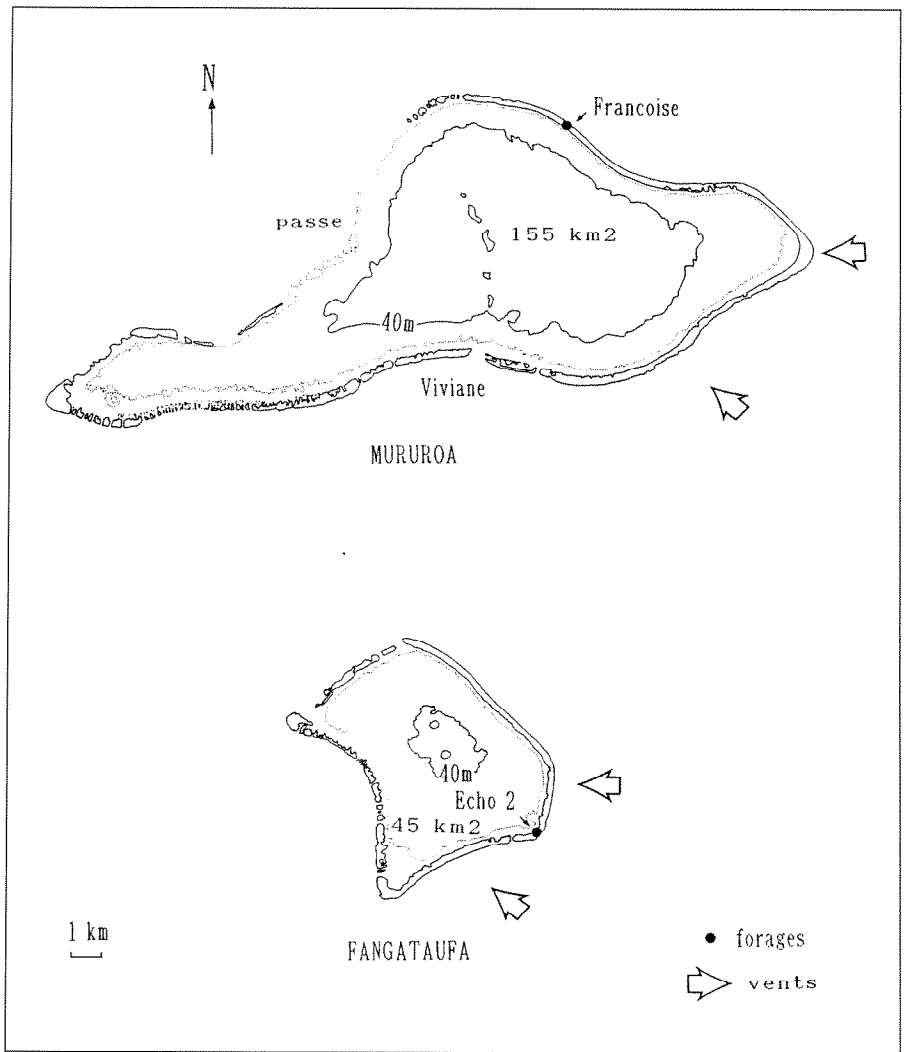


Fig. 1 - Les atolls de Mururoa et Fangataufa ; morphologie de la couronne corallienne et bathymétrie simplifiée du lagon.
 Fig. 1 - The Mururoa and Fangataufa atolls; morphology of the coral rim and simplified bathymetry of the lagoon.

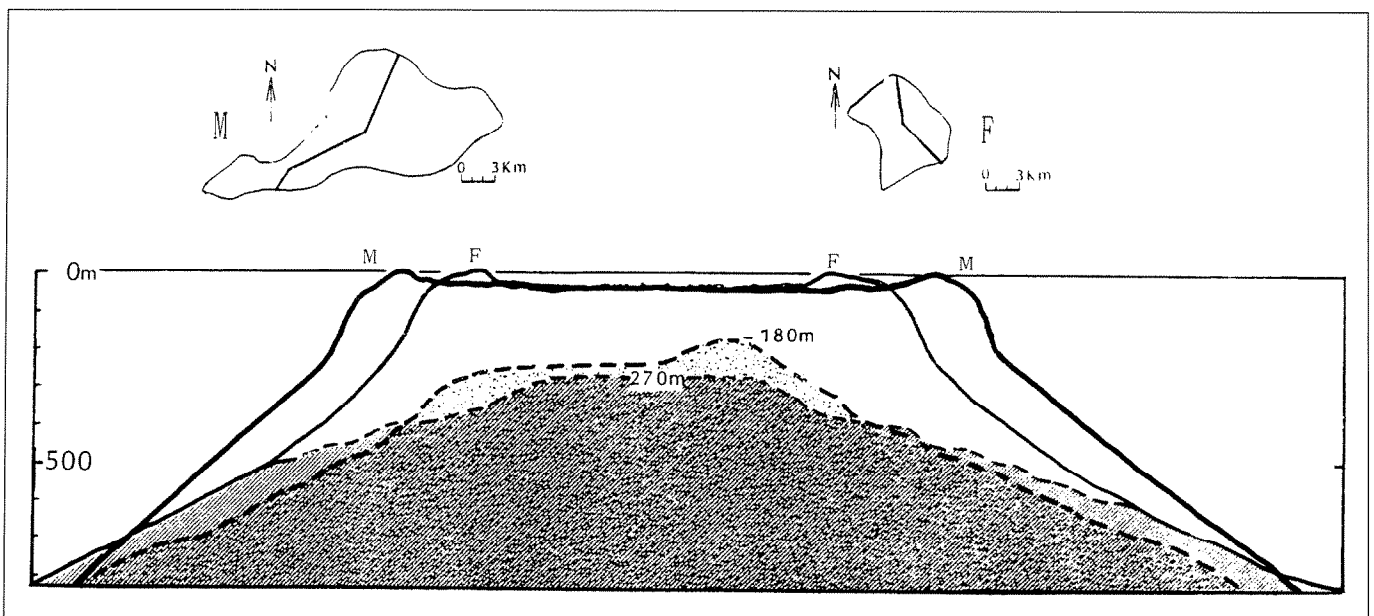


Fig. 2 - Les atolls de Mururoa (M) et Fangataufa (F) ; morphologie comparative du toit du soubassement volcanique.
 Fig. 2 - The Mururoa (M) and Fangataufa (F) atolls; comparative morphology of the top of the volcanic basement.

La série récifale *sensu-stricto* comporte des calcaires et des dolomies. Ces dernières, qui représentent un tiers de la

masse récifale, se situent à la base de la série et sont absentes à la périphérie des édifices. Sous les deux atolls, le toit du

corps dolomitique se situe entre -120 m et -150 /-170 m à l'aplomb de la couronne, et entre -190 et -210 m sous les lagons. Ainsi à Mururoa, le corps dolomitique forme une unité lenticulaire disparaissant au centre sur le sommet du volcan situé vers -170 /-180 m (fig. 3, Buigues 1982, Buigues *et al.*, 1992), alors qu'à Fangataufa il s'étend sous tout le lagon où le soubassement volcanique se trouve en moyenne aux environs de -270 /-280 m (fig. 2).

L'ensemble de la série sédimentaire présente des surfaces d'émergence et de très nombreux horizons karstiques. Communs aux deux atolls (fig. 5), ces horizons sont généralement étendus sous les édifices depuis la périphérie jusqu'au centre (fig. 3, Buigues 1996 et 1997).

D'un point de vue sédimentologique, la couronne dans sa partie sommitale (i.e. les calcaires) est constituée de formations coralliennes construites (boundstone) alternant avec des débris biodétritiques grossiers (rudstones) ; à l'inverse, au centre du lagon, sables fins à débris

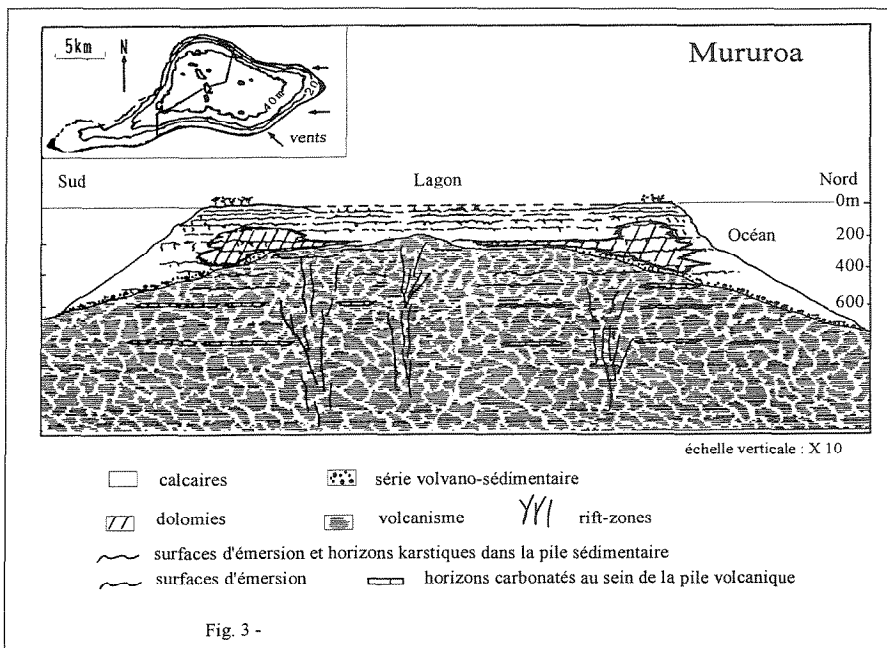


Fig. 3 - Principales discontinuités à travers l'atoll de Mururoa.
Fig. 3 - The main discontinuities within Mururoa atoll.

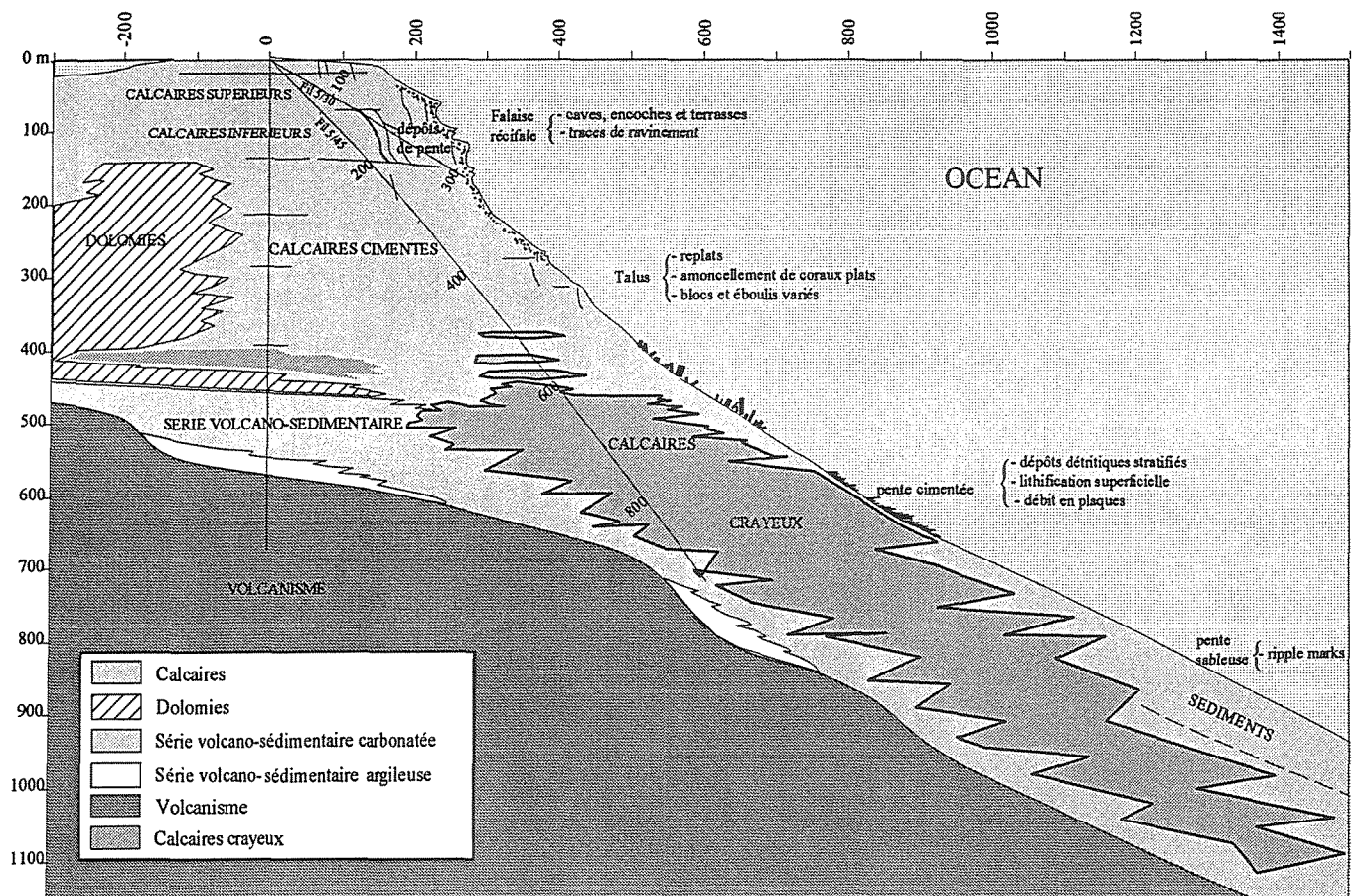


Fig. 4 - Géologie et observations sous-marines (ROV) des flancs nord de Mururoa.
Fig. 4 - Geology and submarine observations (ROV) of the northern flanks of Mururoa.

(packstones et wackestones) et boues carbonatées (mudstones) prédominant. Toutefois sous les deux lagons, on rencontre, notamment à partir d'une profondeur comprise entre -80 et -100 m, des horizons construits semblant s'étendre jusque sous la couronne actuelle (Buigues, 1985). Malgré les transformations minéralogiques dues au phénomène de dolomitisation, la texture des roches est souvent reconnaissable. Ainsi, les types de faciès rencontrés dans les dolomies sont pour partie analogues à ceux de la série calcaire. En particulier, il apparaît, qu'à certaines époques les récifs actuellement dolomitisés constituaient de larges bancs coralliens (i.e. « plates-formes » peu profondes) étendus depuis la couronne jusqu'au centre du lagon (Buigues, 1985).

La dolomitisation présente plusieurs types de phases minéralogiques correspondant à différents types de transformation comme la dissolution, la précipitation et la recristallisation (Buigues, 1982 ; Aïssaoui *et al.*, 1986). Le phénomène attribué aux mélanges eaux douces/eaux salées s'est produit à plusieurs reprises à chaque émergence des atolls (Buigues, 1982). L'existence de ciments zonés (calcitiques et dolomitiques), ainsi que la présence de lentilles dolomitiques insérées au sein de la masse calcaire à l'extrême périphérie des atolls et dans la série volcano-sédimentaire, étayent l'hypothèse de phases multiples de dolomitisation.

Structure de la périphérie de l'atoll

La géologie des flancs de l'atoll de Mururoa a été révélée grâce à de nombreux forages inclinés en direction de l'océan, de 30° à 45° par rapport à l'horizontale. Certains forages à 30° ont percé la falaise récifale vers -170 m de profondeur (fig. 4 et 6).

Trois grandes unités caractérisent les flancs.

L'anneau corallien proprement dit, 0 à -200 m (fig. 6)

Deux grands ensembles séparés par une limite d'ordre diagénétique et sédimentologique, voire structural ont été mis

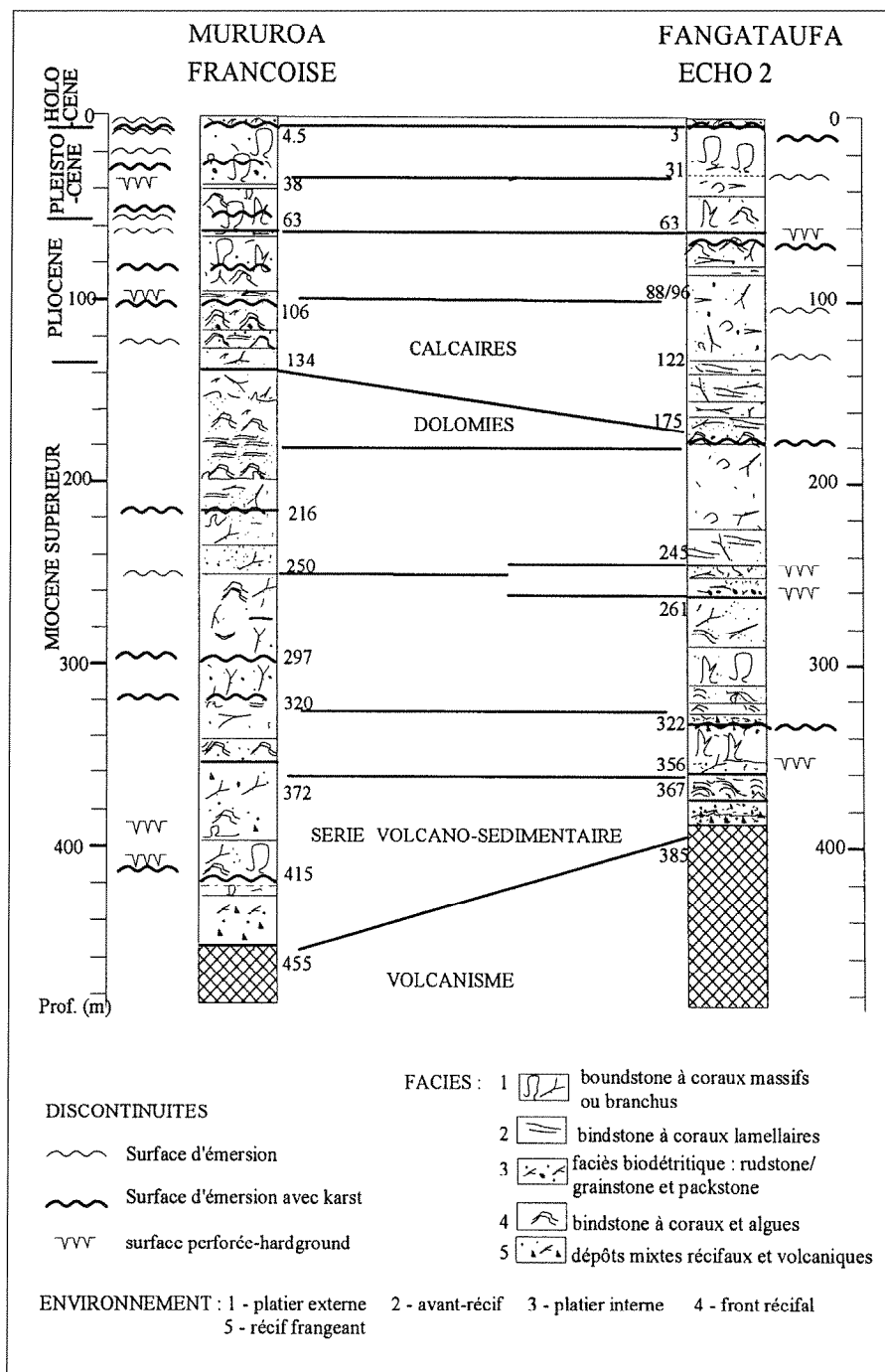


Fig. 5 - Lithologie comparative avec les principales discontinuités des atolls de Mururoa et Fangataufa (d'après Guyomard, 1990, modifié).

Fig. 5 - Comparative lithology with the main discontinuities of the atolls of Mururoa and Fangataufa (after Guyomard, 1990, modified).

en évidence principalement grâce aux forages à 30°. Cette limite, située à environ -80 m, sépare les calcaires « supérieurs » (0 à -80 m), des calcaires « inférieurs » (-80 à -200 m) dont le toit correspond aussi à une rupture de pente majeure au niveau de la falaise récifale. L'ensemble est traversé par des discontinuités d'ordre principalement diagénétique, qui se prolongent parfois vers l'in-

térieur sous le lagon, et qui correspondent à la périphérie de des terrasses.

D'un point de vue sédimentologie, les calcaires supérieurs sont à la fois bioconstruits et biodétritiques, et présentent des faciès récifaux externes. Les calcaires inférieurs sont principalement biodétritiques : éboulis, faciès typiques de pentes, dépôts fronto-récifaux, voire remplissages de karst

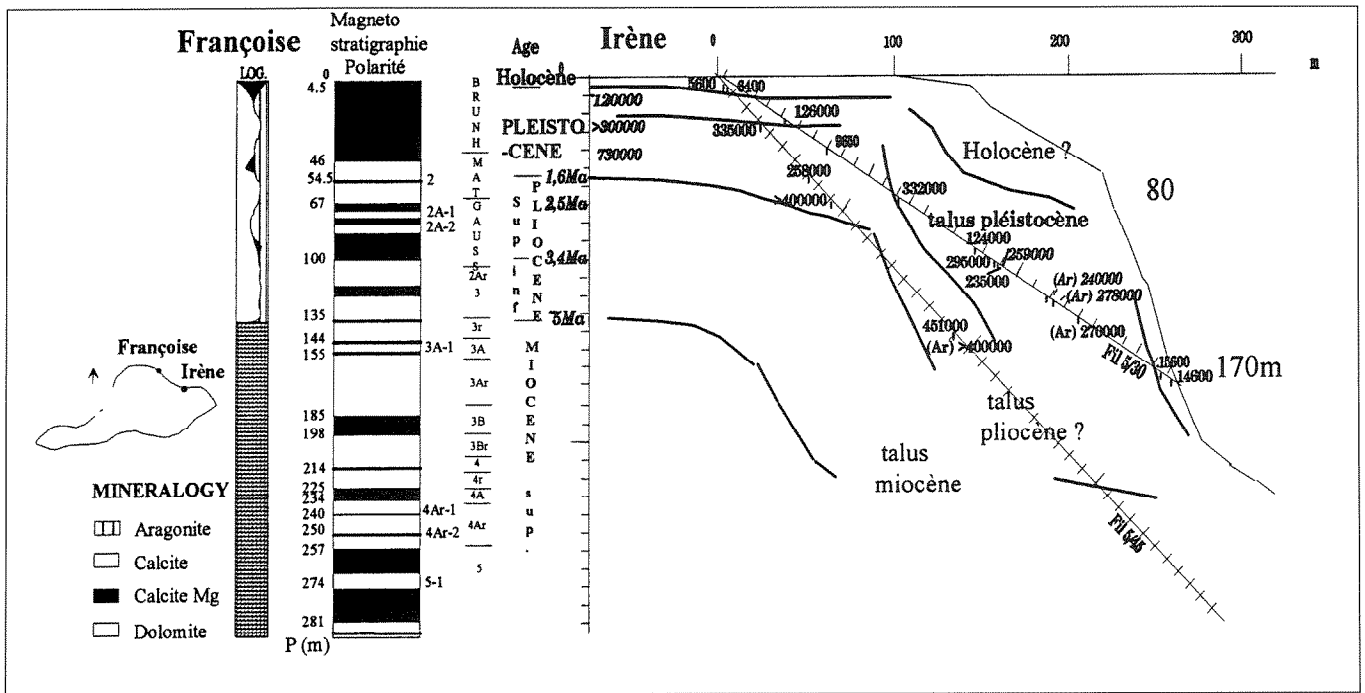


Fig. 6 - Géométrie de la couronne corallienne (entre 0 et -200 m) à Mururoa à partir de forages inclinés (Perrin, 1989, modifié). Les datations dans les forages déviés sont de Hoang, 1986 (inédit), Bard *et al.*, 1991a, Blamard, 1996 (inédit) et Eisenhauer, 1996 (dans Ebrén, 1996). Ar = ciments aragonitiques ; magnétostratigraphie dans le forage vertical Françoise : modifié d'après Aïssaoui, 1991 et Aïssaoui (inédit).
 Fig. 6 - Geometry of the coral rim (0 to -200 m) at Mururoa from deviated boreholes (modified after Perrin, 1989). Datings in the deviated wells from: Hoang (oral com.), Bard *et al.*, 1991a, Blamard, 1996 (oral com.) and Eisenhauer (in Ebrén, 1996, unpublished).
 Ar = aragonitic cements: magnetostratigraphy in the Françoise vertical borehole: modified after Aïssaoui, 1991 and oral com.

ou de caves (-80 à -120 /-140 m), et dépôts détritiques fins typiques du milieu fronto-récifal (à partir de -120 / 140 m).

Des cavités plus ou moins colmatées à la fois par des sédiments, et d'épais ciments (entre -80 et -120 /-140 m) sont attribuées à d'anciennes encoches marines, analogues à celles que l'on peut observer sur le pourtour d'édifices surélevés comme l'atoll de Makatea (Montagioni, 1985) ou l'île de Rurutu (Guille *et al.*, 1998).

Des calcaires très indurés, entre 200 et 450 m (fig. 4)

Les forages inclinés à 45°, 40° et 30°, ont mis en évidence une superposition « latérale » de corps récifaux (Perrin, 1989), chacun d'entre eux étant constitué d'une partie bioconstruite et d'un talus avec des faciès de pente correspondant aux baisses du niveau marin (fig. 4 et 6). Dans cet ensemble, les dépôts calcaires sont très indurés en raison d'une cimentation marine intense d'aragonite et de calcite magnésienne (Aïssaoui *et al.*, 1988) et contiennent des horizons karstiques se

prolongeant parfois horizontalement vers l'intérieur sous le lagon.

Des calcaires à texture « crayeuse », au-delà de 450 m (fig. 4)

L'aspect « crayeux » est associé à une texture fine des sédiments qui correspondent pour la plupart à des dépôts profonds d'avant-récif. La texture crayeuse est le résultat d'une dissolution (Aïssaoui, 1988), qui s'accompagne en profondeur d'une disparition de deux phases minérales, la calcite magnésienne à partir de -620 m, et l'aragonite à partir de -655 m. Cette dissolution résulte d'une interaction avec les eaux marines profondes qui, partant de l'océan, remontent à travers les calcaires crayeux le long du substratum volcanique sous l'effet des gradients thermiques induits par le flux géothermique terrestre (fig.7, Guille *et al.*, 1995 ; Buigues, 1997). Le processus de remontée des eaux (upwelling) a déjà été évoqué pour les atolls (Samaden *et al.*, 1985 ; Rougerie et Wauthy, 1993).

Au-dessous de -450 m, les ciments de calcite magnésienne (HMC) sont progres-

sivement remplacés par des ciments de calcite faiblement magnésienne (LMC) contenant moins de 3,9 moles % de MgCO₃ et présentant une signature géochimique marine et froide (de l'ordre de 8°C à 12°C), avec des contenus en strontium allant jusqu'à 1470 ppm et des rapports isotopiques d13C = 1,1% PDB et d18O = 3,1% PDB (Aïssaoui, 1988).

Les pentes récifales

A Mururoa, des observations sous-marines avec un ROV (Remote Operated Vehicle) ont été effectuées jusqu'à 1200 m de profondeur (fig. 4). Cinq types de fonds ont été distingués :

De -1000 à -650/-600 m

Il s'agit de fonds réguliers constitués de sables calcaires ; la pente est de 10° en moyenne et les sables ont une granulométrie moyenne à fine. Par endroits, ces fonds présentent de nettes figures de courants (ripple-marks).

Entre -650/-600 et -500 m

Equivalent des calcaires crayeux, il s'agit de sédiments calcaires partiellement lithifiés en surface dont la pente est de

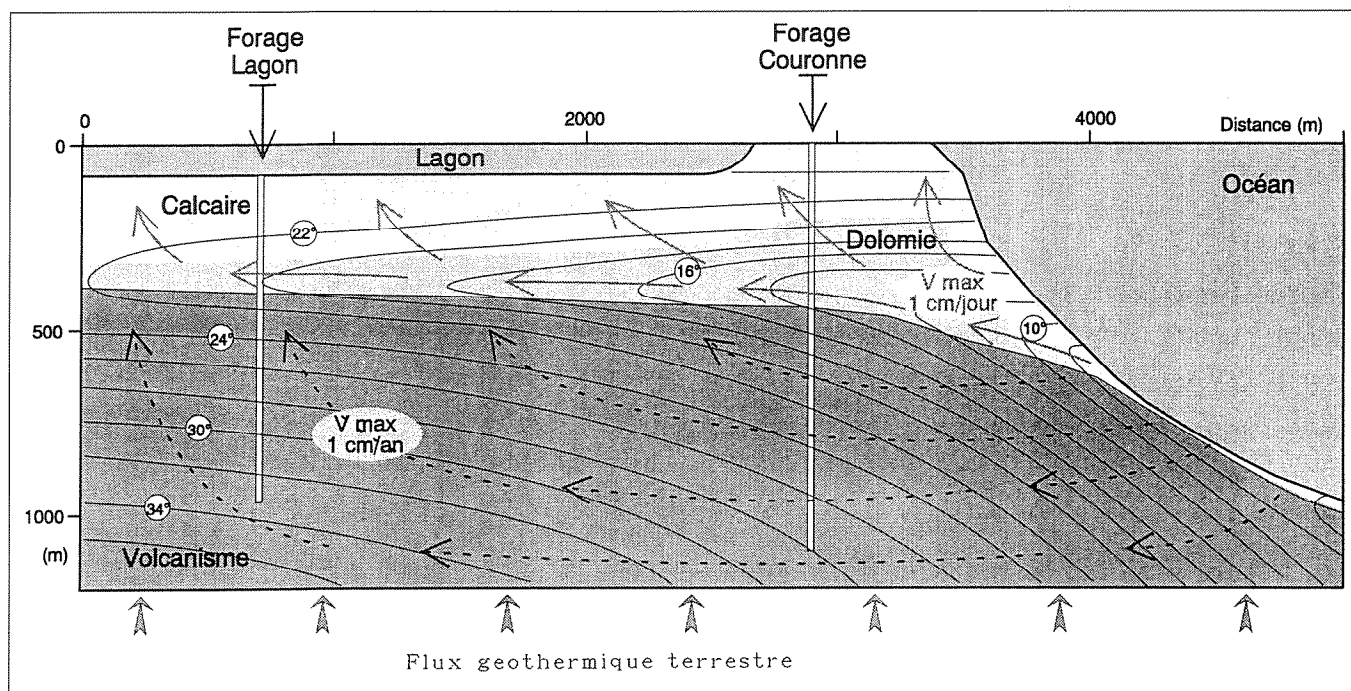


Fig. 7 - Circulations naturelles dans l'atoll de Mururoa. Schéma de principe.

Fig. 7 - Natural flow within Mururoa atoll. Simplified diagram.

l'ordre de 10° à 20° . La cimentation concerne les premiers décimètres du fond et les surfaces cimentées constituent de véritables petites dalles. Les sables sont moyens à grossiers (type rudstone ou « conglomérat récifal »). Ce type de lithification, a été observé ailleurs, et en particulier, en Nouvelle-Calédonie (Pascal *et al.*, 1992). Dans ce cas, les surfaces, rencontrées entre -400 et -900 m, sont lithifiées superficiellement sur quelques centimètres à quelques décimètres, les sédiments sous-jacents restant meubles. La lithification serait récente ($< 30\ 000$ ans) et affecte des dépôts d'âges très variés (Oligocène à Quaternaire). Aux Bahamas, les phénomènes de lithification s'observent sur une pente de 60° à 30° à partir de 300 m de profondeur (Grammer et Ginsburg, 1992).

Entre -500 et -350/-300 m

Sur ces fonds où la pente moyenne est de l'ordre de 20° à 30° , on observe des épandages d'éboulis calcaires de taille variée (décimétrique, avec quelques blocs métriques) et de toutes formes. Certains présentent une forme plate caractéristique (dalles à faciès conglomératique et/ou coraux plats typiques du milieu fronto-récifal).

Entre -350/-300 et -120/-100 m (la falaise récifale et son talus)

Au pied de la falaise récifale se trouve un talus (-350 à -300 / -290 m) avec une pente de l'ordre de 45° . Ce talus est constitué par des chenaux et des cônes d'éboulis avec prédominance de plaques coralliennes ; en outre il comporte vers -300 m, une plate-forme supportant des formations caractéristiques d'une érosion par dissolution, analogues aux « têtes de nègres » du platier actuel.

La falaise à parois subverticales s'élève sur une hauteur de 150 m environ. Elle est interrompue par des replats, (aux environs -180 m), ainsi que par des encoches, (-120 / -150 m, -200/-230 m). L'existence d'une falaise récifale a été évoquée pour de nombreuses autres formations récifales notamment à Eniwetok (Colin *et al.*, 1986), aux Bahamas (Hine et Mullins, 1983 ; Grammer et Ginsburg, 1992), à Belize (James et Ginsburg, 1979), en Mer Rouge (Dullo *et al.*, 1990), à Mayotte (Thomassin, com. pers.) et à Tahiti, (Ifremer com. Pers. ; Salvat, 1986).

Au-dessus de -100 m

On observe vers -80/-90 m des caves et des irrégularités de la paroi. La partie

sommitale de l'atoll (-80 à 0 m) comporte des terrasses (vers 10 m, 20/25 m, 40 m et 55/65 m) principalement révélées par bathymétrie.

Chronologie

A Mururoa, les mesures de datations des carbonates (^{14}C , U/Th et magnétostratigraphie) ont été réalisées sur une profondeur d'une vingtaine de mètres sous le lagon, et sous la couronne, jusqu'à 300 mètres verticalement et latéralement à partir des forages inclinés. L'ensemble des résultats ainsi que les observations sous-marines des pentes récifales ont largement contribué à la connaissance de la structure de l'atoll (fig. 6, Labeyrie *et al.*, 1969 ; Buigues 1982 ; Hoang, com. pers., Aïssaoui et Kirschwink 1991 et com. pers. ; Buigues, 1996 et 1997).

La série basale (volcano-sédimentaire) a commencé de s'édifier parallèlement à la fin de l'activité volcanique, vers 9,45 Ma (Guillou *et al.*, 1994) à Mururoa, et vers 9,64 Ma à Fangataufa (Guillou, 1990).

L'ensemble de la série dolomitique serait d'âge miocène, le toit de l'unité ayant été daté à 5-6 Ma par magnétostratigraphie. Cette série comporte les horizons

karstiques les plus étendus de l'atoll (depuis la périphérie jusqu'au centre du lagon, vers -230/250 m et -270/280 m) et les niveaux karstiques les plus spectaculaires de toute la pile sédimentaire (-300/-350 m sous la couronne et -180/-200 m sous le lagon).

Au-dessus de la série dolomitique, les dépôts pliocènes (5 à 1,6 Ma), se situent entre -50/-70 m et -120/-150 m sous la couronne et entre -70/-90 m et -190/-210 m sous le lagon. La série est relativement bien cimentée et comporte une topographie karstifiée, principalement à la périphérie. La karstification est particulièrement intense au-dessous de -140/-150 m. Les surfaces d'émersions, comme les horizons karstiques, sont développés sous tout l'atoll.

La série pléistocène (1,6 à 0,12 Ma) se trouve dans l'ensemble moins consolidée que la précédente et de plus elle est en grande partie karstifiée. Sous la couronne la série, avec 50 m d'épaisseur, est interrompue par des surfaces d'émersions et des horizons karstiques. Sous le lagon, les dépôts ayant également une épaisseur de

l'ordre de 50 m (fig. 8), sont moins lithifiés que sous la couronne. De plus, ils contiennent des discontinuités sédimentaires qui correspondent aux surfaces d'émersion et aux niveaux karstiques de la couronne. Ainsi on a pu distinguer huit séquences régressives au-dessus d'une surface marquant un arrêt majeur dans l'édification, située aux alentours de -120 m (fig. 8). Les dépôts correspondant au stade 5e (120/150 ka) sont absents du lagon. A la périphérie, derrière la falaise récifale, l'épaisseur latérale des dépôts pléistocènes atteint au moins 150 m. Ces dépôts, généralement, détritiques et typiques de pente, constituent la chape des séries pliocènes et miocènes sous-jacentes.

D'une manière générale, les discontinuités de cette série sont relatives à des émersion. Ainsi ce sont soit d'anciennes surfaces d'émersion, soit des horizons karstiques traduisant la trace d'anciens niveaux phréatiques (limite eau douce/eau de mer) lorsque les atolls étaient émergés. A la périphérie de l'atoll, les terrasses seraient aussi d'anciennes surfaces d'émersion et les encoches traduiraient

les positions de stagnation du niveau marin lors des émersion des atolls. Et notamment le niveau entre 120 et 150 m correspondrait à la marque de la dernière grande émersion des atolls il y a 18 000 ans (fig. 6).

L'épaisseur de la série Holocène (0 - 8000 ans à l'aplomb de la couronne, et 0 - 14 000 ans au pied de la falaise récifale) varie de quelques mètres à 10 m, voire 20 m, le maximum se trouvant sous le lagon où les dépôts holocènes sont plus épais dans la région centrale.

Édification

Les premières traces d'activité corallienne se matérialisent par la présence de bancs carbonatés insérés dans la pile volcanique. A ce stade, des récifs frangeants se sont développés autour du volcan. La transition entre les formations volcaniques et récifales *stricto-sensu* se matérialise par des dépôts mixtes, de nature argileuse et/ou carbonatée, à la fois conglomératique, sableux et récifaux. Les premiers bancs récifaux insérés dans le volcanisme, comme dans la série de transition, ont été

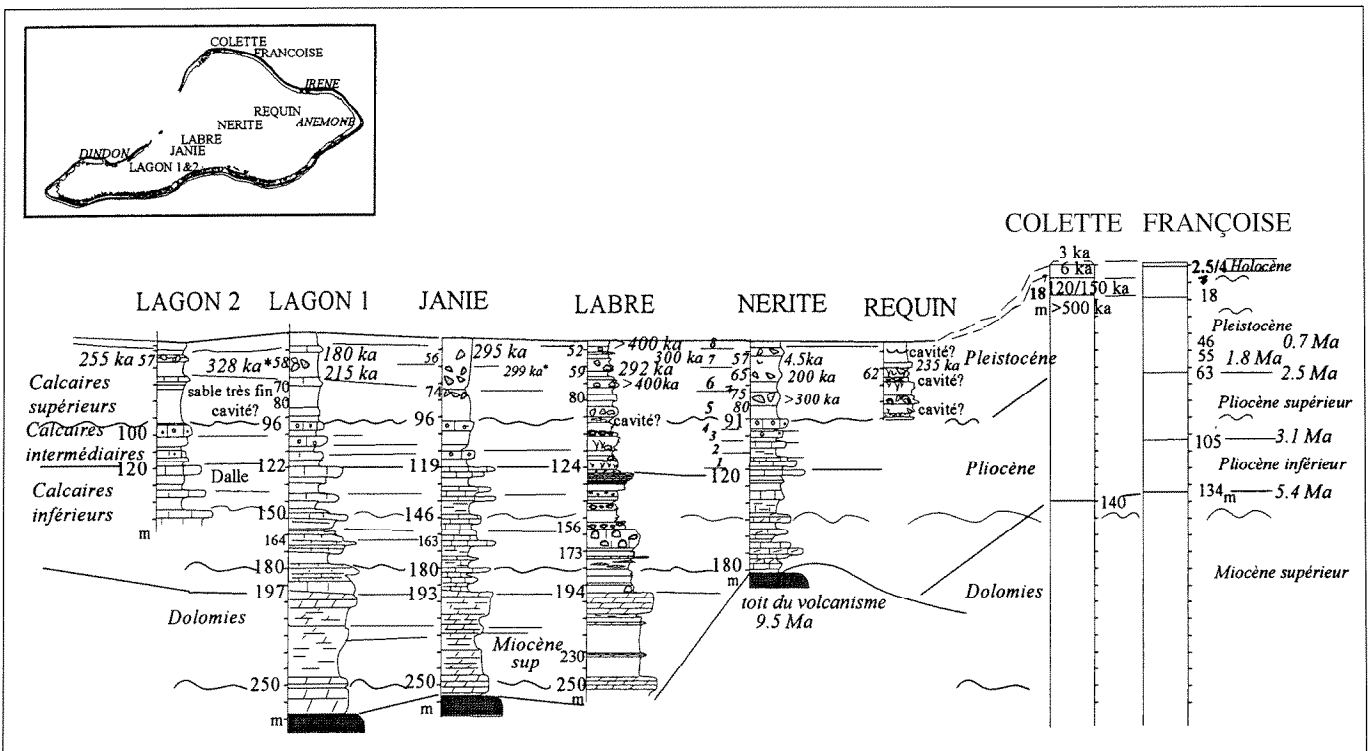


Fig. 8 - Lithologie et datations dans le lagon de l'atoll de Mururoa. On notera la présence de séquences sédimentaires régressives (8) au-dessus de la surface à -120 m. Datations ¹⁴C et U/Th : Labeyrie *et al.* (1969, Forage Colette), Buigues (1982), Hoang (1986, inédit, Forages du lagon), Bard *et al.* (1991b, Forage Lagon) ; datations par magnétostratigraphie : Aïssaoui et Kirschwinck (1991 et inédit, Forage Française).
 Fig. 8 - Lithology and datings in the lagoon of Mururoa atoll. Note the occurrence of regressive sedimentary sequences (8) above the -120 m surface. ¹⁴C and U/Th datings: Labeyrie *et al.* (1969, Colette borehole), Buigues (1982), Hoang (1986, unpub., Lagon borehole), Bard *et al.* (1991b, Lagon borehole); Magnetostratigraphic datings from Aïssaoui and Kirschwinck (1991 and unpub., Française borehole).

émergés peu après leur dépôt, et donc aux alentours de 12 à 10 Ma. Progressivement les apports volcaniques cessent avec la subsidence du volcan et la série récifale proprement dite s'installe.

La série sédimentaire déposée à la périphérie des îles volcaniques encore subsidentes s'est étendue vers le centre des édifices en recouvrant les pitons volcaniques résiduels. Dans les stades initiaux l'édification de la série a été contrôlée par la morphologie volcanique terminale et

par les phénomènes de tectonique locale. Ainsi il n'existait pas de récif face aux principales vallées volcaniques. Les aires de « lagons » (très peu profonds) étaient limités en surface et en profondeur.

Durant le Pliocène, une vaste « plate-forme » avec des zones de « lagons » réduites recouvraient l'ensemble de l'île. Des périodes d'émersions successives ont favorisé la karstification de l'édifice.

La forme finale d'atoll aurait été atteinte au cours du Pléistocène par suite

d'une différenciation entre le centre et la périphérie de l'édifice. Ainsi la couronne se serait développée par accroissement latéral consécutivement aux différentes variations du niveau marin. Quant au lagon unique actuel, il résulterait d'un approfondissement et d'un élargissement progressifs consécutifs aux variations du niveau marin (restriction des surfaces potentielles de construction par dissolution lors des régressions et ensablement au cours des transgressions).

Références

- Aïssaoui D.M., Buigues D., Purser B.H. (1986) - Model of Reef Diagenesis: Mururoa Atoll French Polynesia. *In: Reef Diagenesis* Springer-Verlag, Editions Schroeder and Purser, Berlin, 27-52.
- Aïssaoui D.M., Buigues D., Purser B.H. (1988) - Marine lithification and dissolution in the periphery of Mururoa Atoll, French Polynesia. *Proc. 6th Int. Reef Congress.*, Townsville, Australia, **3**, 541.
- Aïssaoui D.M. (1988) - Magnesium Calcite Cements and their Diagenesis: dissolution and dolomitisation, Mururoa atoll. *Sedimentology*, **1**, 35, 821-841
- Aïssaoui D.M., Kirschwink J. L. (1991) - Atoll magnetostratigraphy: calibration of their eustatic records. *Terra nova*, **3**, n° 1, 35-40
- Bard E., Hamelin B., Arnold M., Buigues D. (1991a) - $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{14}C ages obtained by mass spectrometry on corals from Mururoa atoll, French Polynesia, *Radiocarbon*, **33**, n° 2, 173.
- Bard E., Fairbanks R.G., Hamelin B., Zindler A., Hoang C.T. (1991b) - Uranium-234 anomalies in corals older than 150 000 years. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 2385-2390.
- Berbey H. (1986) - Les épisodes carbonatés miocènes dans le volcanisme de Mururoa. D.E.A. Univ. Bourgogne, Centre des Sciences de la Terre, 35 p.
- Berbey H. (1989) - Sédimentologie et géochimie de la transition substrat volcanique-couverture sédimentaire de l'atoll de Mururoa (Polynésie française). Doctorat Université de Paris Sud, Orsay, 275 p.
- Buigues D. (1982) - Sédimentation et diagenèse des formations carbonatées de l'atoll de Mururoa (Polynésie Française). Thèse Doctorat 3^{ème} cycle Université de Paris Sud, Orsay, 309 p.
- Buigues D. (1985) - Principal facies and their distribution at Mururoa atoll (French Polynesia). *Proc. 5th Intern. Coral Reef Congress, Tahiti*, **3**, 249-255.
- Buigues D., Gachon A., Guille G. (1992) - L'atoll de Mururoa (Polynésie française). I. - Structure et évolution géologique. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **163**, n° 5, 645-657.
- Buigues D., Bablet J.P., Gachon A. (1993) - Le lagon de Mururoa. *Atlas de la Polynésie française, ORSTOM*, Pl. 33.
- Buigues D. (1996) - Mururoa and Fangataufa: sea-level changes, karstification and the atoll morphology. *Mém. Soc. géol. Fr.*, **169**, 373-382.
- Buigues D. (1997) - Geology and Hydrogeology of Mururoa and Fangataufa, French Polynesia *in: Vacher H.L. & Quinn T.M. Eds. Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Development in Sedimentology* 54, Elsevier, Amsterdam, 433-451.
- Colin P.L., Devaney D.M., Hillis-Colinvaux L., Suchanek T. H., Harrison J.T. (1986) - Geology and biological zonation of the reef slopes, 50-360 m depth at Eniwetak atoll, Marshall islands. *Bull. marine science*, **38**, 1, 111-128.
- Dullo W.C., Moussavian E., Brachert T.C. (1990) - The foralgal crust facies of the deeper fore-reefs in the Red Sea: a deep diving survey by submersible. *Geobios*, **23**, 3, 261-281.
- Ebren P. (1996) - Impact des variations rapides du niveau marin sur le développement des atolls au Quaternaire : Mururoa (Polynésie française). Dynamique récifale et diagenèse des carbonates. Doctorat Université de Provence Aix-Marseille I, 310 p. Non publié.
- Gachon A., Buigues D. (1985) - Phases d'arasion d'un volcan et installation corallienne. Contribution de la morphologie du soubassement volcanique (atoll de Mururoa, Polynésie Française). *Proc. 5th Inter. Coral Reef Congress, Tahiti*, **3**, 185-191.

- Grammer G.M., Ginsburg R.N. (1992) - Highstands versus lowstand deposition on carbonate platform margins : insight from quaternary foreslopes in the Bahamas. *Marine geology*, **103**, 125-136.
- Guille G., Goutière G., Sornéin J.F., Buigues D., Guy C., Gachon A. (1995) - The atolls of Mururoa and Fangataufa (French Polynesia) : I Geology-Petrology-Hydrogeology. From volcano to atoll. *Masson Eds.* 175 p.
- Guille G., Guillou H., Chauvel C., Maury R.C., Blais S., Brousse R. (1998) - L'île de Rurutu (archipel des Australes, Polynésie française) : une édification complexe liée au fonctionnement de deux points chauds. *Géologie de la France*, n° 3 (ce volume), 65-85.
- Guillou G. (1990) - Le soubassement volcanique de l'atoll de Fangataufa (Polynésie française). Doctorat Université de Paris Sud, Orsay, 308 p.
- Guillou G., Gillot P.Y., Guille G. (1994) - Age (K/Ar) et position des îles Gambier dans l'alignement volcanique du point chaud de Pitcairn (Pacifique Sud). *C.R. Acad. Sci. Paris*, **318**, (2), 1341-1347.
- Guyomard T. (1990) - Sédimentation et diagenèse du sondage Echo II de l'atoll de Fangataufa (Polynésie française) ; corrélations avec Mururoa. D.E.A. Université de Paris Sud, Orsay, 65 p.
- Hine A.C., Mullins H.T. (1983) - Modern carbonate shelf-slope breaks. *SEPM Special Publication*, **33**, 169-188.
- James N.P., Ginsburg R.N. (1979) - The seaward margin of Belize barrier and atolls reefs. *Special publ. intern. assoc. sedimentologists*, **3**. Blackwell scientific publication.
- Labeyrie J., Lalou C., Delebrias G. (1969) - Etudes des transgressions marines sur l'atoll de Mururoa par la datation des différents niveaux de corail. *Cah. Pac.*, **13**, 59-68.
- Montaggioni L.F. (1985) - Makatea island, Tuamotu archipelago. *Proc. 5th intern. Coral Reef Congress, Tahiti*, **1**, 105-157.
- Pascal A., Rio M., Vanney J.R. (1992) - Les surfaces durcies des pentes bathyales de Nouvelle-Calédonie (Pacifique du SW). Morphologies et diagenèse. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **163**, n° 3, 271-280.
- Perrin C. (1989) - Rôle des organismes dans l'édification et l'évolution de l'atoll de Mururoa (Polynésie française). Doctorat Université de Paris Sud, Orsay, 301 p.
- Rougerie F., Wauthy B. (1993) - The endo-upwelling concept : from geothermal convection to reef construction. *Coral Reefs*, **12**, 19-30.
- Samaden G., Dallot P., Roche R. (1985) - Atoll d'Eniwetak. Système géothermique insulaire à l'état naturel. *Houille blanche*, **2**, 143-151.
- Salvat B. (1986) - Le littoral corallien. In: C. Gleizal/Multipress Eds. *Encyclopédie de la Polynésie*, **3**, 9-24.

LES SECRETS DE LA TERRE



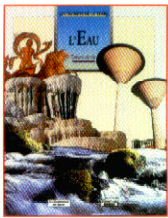
A la fois redoutés pour leurs imprévisibles colères destructrices et fascinants par le spectacle grandiose de leurs éruptions, les volcans dispensent aussi des bienfaits grâce à l'extraordinaire fertilité de leurs sols, aux matériaux qu'ils rejettent et aux eaux thermales qu'ils réchauffent en leur sein. Jadis, sièges des dieux ou de l'enfer, les volcans font maintenant l'objet d'études scientifiques de plus en plus sophistiquées visant à reconstituer leur histoire individuelle, à comprendre leur fonctionnement et à diminuer les risques qu'ils font encourir. Les volcans seront encore pour quelques milliards d'années les fidèles et dangereux compagnons des hôtes de notre planète.

64 pages en couleurs, format 28 x 21 cm, relié.
Référence 000204 - Prix : 96 FF.



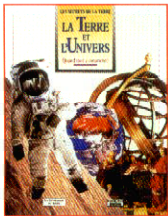
Bien que toute naturelle la perfection des cristaux répond à des règles physiques et chimiques ordonnées. Naître, grandir et vieillir telle est la destinée du cristal à l'intérieur des roches qui composent la croûte terrestre. La minéralogie est la science qui permet de découvrir cette merveilleuse organisation où se mêlent, en toute modestie, les simples cristaux aux extraordinaires joyaux. Dès la préhistoire, l'Homme s'intéresse au minéral, depuis, une large place lui est consacrée dans l'évolution du savoir, des sciences et des techniques les plus modernes. Avec cet ouvrage nous vous invitons à découvrir une extraordinaire saga du règne minéral.

64 pages en couleurs, format 28 x 21 cm, relié.
Référence 000205 - Prix 96 FF.



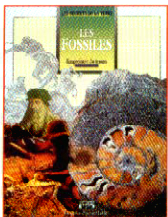
L'eau, source de vie, à l'origine de la formation de la terre, est une substance extraordinaire aux propriétés multiples, c'est aussi un des éléments clés avec le ciel et la terre. La molécule d'eau "H₂O" est présente dans notre quotidien sous trois formes : l'eau, la glace et la vapeur. La valeur de l'eau est inestimable, première ressource minérale du monde, sa protection et sa gestion sont indispensables à la survie de l'humanité, du règne animal et végétal. Alors, partons à la découverte de ce formidable élément indispensable à notre vie.

64 pages en couleurs, format 28 x 21 cm, relié.
Référence 000206 - Prix : 96 FF.



Il y a quinze milliards d'années, le commencement de notre univers a été marqué par une colossale explosion, le big bang. Il est le coup d'envoi simultané de l'énergie, du temps, de l'espace et de la matière, c'est-à-dire de tout ce qu'il faut pour faire un monde. Dix milliards d'années plus tard, dans un système stellaire en formation, une petite planète, qui deviendra bleue, connaît une évolution géologique et biologique étonnante. L'Homme d'aujourd'hui, qui en est un des extraordinaires aboutissements, a su reconstituer cette histoire inouïe.

64 pages en couleurs, format 28 x 21 cm, relié.
Référence 000201 - Prix : 96 FF.



Des mythiques dinosaures, aux plus petites coquilles marines, c'est un voyage dans le monde de la paléontologie qui nous invite à la découverte de l'histoire de notre planète à travers sa fantastique évolution biologique.

Les fossiles, rouage d'une fabuleuse machine à remonter le temps, nous entraînent si près des frontières de l'étrange, que vous ne pouvez l'imaginer.

64 pages en couleurs, format 28 x 21 cm, relié.
Référence 000203 - Prix : 96 FF.



Les phénomènes présentés sont naturels, certes, mais ils étonnent soit par leur soudaineté, soit par leurs conséquences catastrophiques, soit par leur beauté ...

Des cyclones aux marées, de l'orage à l'arc-en-ciel, des geysers aux aurores boréales, une promenade à travers la météorologie, la géologie, l'océanographie et aussi l'histoire des Sciences.

64 pages en couleurs, format 28 x 21 cm, relié.
Référence 000202 - Prix : 96 FF.

BON DE COMMANDE à remettre à votre librairie ou à défaut, à retourner aux Editions BRGM - BP 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2, France

A EXPÉDIER :

Nom

Prénom

Adresse

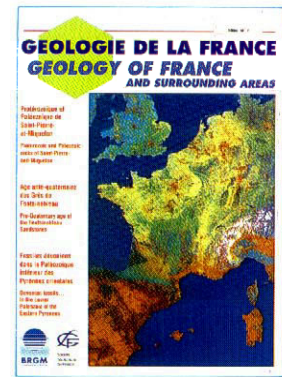
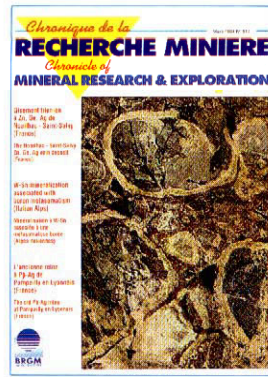
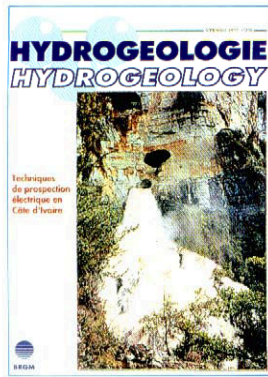
.....

.....

Date

Signature

	PRIX UNITAIRE	TOTAL
<input type="checkbox"/> LA TERRE ET L'UNIVERS	.....exemplaire(s) 96 FF	.....FF
<input type="checkbox"/> LES FOSSILES	.....exemplaire(s) 96 FF	.....FF
<input type="checkbox"/> LES PHÉNOMÈNES NATURELS	.....exemplaire(s) 96 FF	.....FF
<input type="checkbox"/> LES CRISTAUX ET MINÉRAUX	.....exemplaire(s) 96 FF	.....FF
<input type="checkbox"/> L'EAU	.....exemplaire(s) 96 FF	.....FF
<input type="checkbox"/> LES VOLCANS	.....exemplaire(s) 96 FF	.....FF
FRAIS DE PORT		15 F par exemplaire
TOTAL GÉNÉRAL		



Revue scientifique et technique, Hydrogéologie est destinée aux spécialistes de l'eau souterraine : chercheurs conduisant des travaux sur les processus hydrodynamiques et géochimistes, modélisateurs, ingénieurs et praticiens de la prospection, de l'exploitation et de la gestion des nappes. Dédiée à un seul objet, l'eau souterraine et ses interfaces, Hydrogéologie publie des travaux concernant aussi bien les milieux de climat tempéré que les zones tropicales et arides.

Les articles peuvent porter sur des avancées dans la connaissance fondamentale et son application, des présentations de nouveaux outils, des études de cas ou encore des synthèses thématiques ou régionales. Régulièrement, la revue publie des numéros thématiques. Elle procède également à des analyses d'ouvrages et à des présentations de séminaires et colloques.

Hydrogeology is a scientific and technical journal aiming at ground water specialists, including researchers studying hydrodynamic processes, and geochemists, modellers, engineers and technicians prospecting for, exploiting or managing ground water. Entirely devoted to ground water and related subjects, Hydrogeology publishes papers on topics in temperate as well as in tropical and arid zones.

Papers may cover advances made in fundamental knowledge and their applications, introduce new tools, discuss case histories or review particular themes or regions. The journal publishes entire issues devoted to specific themes on a regular basis. It also presents book reviews and covers seminars and conferences.

Prix de vente au numéro :

Année en cours et année précédente : 190 F

Année antérieure (réduction de 50 %) : 95 F

Règlement par chèque bancaire libellé au nom des Éditions BRGM - B.P. 6009 45060 Orléans cedex 2

La Chronique de la recherche minière s'adresse aussi bien aux scientifiques qui font progresser les connaissances fondamentales sur la géologie des gîtes minéraux qu'aux géologues d'exploration.

Les contributions proposées à la revue doivent être inédites et traiter de sujets relatifs aux gisements de métaux et de minéraux industriels (descriptions de gisements, synthèses régionales ou thématiques, case histories de découvertes) et à leur prospection (méthodes et outils d'exploration) ; elles peuvent également concerner les méthodes de traitement et l'économie minière.

A côté des articles scientifiques, les communications scientifiques et techniques sont destinées à favoriser la publication rapide de résultats nouveaux sur des sujets qui n'ont pas encore fait l'objet d'études scientifiques détaillées (par exemple une découverte de gisement), ou pour présenter de courtes contributions sur des sujets techniques d'intérêt général.

Chronicle of Mineral Research and Exploration is a journal aiming both at researchers studying the fundamental geology of mineral deposits and at exploration geologists.

Contributions to the journal must not have been previously published and should cover topics relating to metalliferous and industrial mineral deposits (descriptions of deposits, regional and thematic reviews, case histories of discoveries) and their exploration (methods and tools used); contributions will also be welcome on methods of processing and on mining economics.

In addition to scientific papers, the journal publishes the scientific and technical communications aimed at enabling rapid publication of new results relating to work which has not yet been the subject of detailed scientific study (for example, the discovery of a deposit), or at providing short contributions on technical subjects of general interest.

Destiné aux chercheurs, enseignants, praticiens, tout public français ou étranger, Géologie de la France a pour vocation de diffuser les résultats de travaux relevant de toutes les disciplines des Sciences de la Terre et concernant le territoire français et les régions voisines.

Ces travaux peuvent relever de la connaissance géologique de base, correspondre à des actions de recherche ou être liés à des opérations de géologie appliquée.

L'objectif est d'appréhender tous les aspects de la géologie du substrat comme ceux de la surface. La prise en compte des régions voisines traduit le souci de ne pas être lié à des limites administratives mais de favoriser la compréhension d'ensembles géologiques cohérents.

Géologie de la France est ouvert à tous, auteurs français et étrangers. La revue accueille tout à la fois des articles importants et des notes brèves.

Geology of France is a journal aiming at researchers, teachers, those to whom the knowledge of geology is essential to their work and the general interested public in France and elsewhere. It is devoted to the publication of results of projects related to all disciplines of the Earth Sciences, both in France and in the surrounding regions.

Papers may cover fundamental geological knowledge, or be related to specific research or applied geology programmes.

The aim is to cover all aspects of both sub-surface and surface geology. By including surrounding regions, studies need can take into account entire geological entities, without the restriction of national boundaries.

The journal welcomes publications from both French and other authors, both full-length papers and short notes.

Abonnement 1999 :

Abonnement par revue :

France : 650 F Étranger : 700 F

Abonnement aux 3 revues, 12 numéros

France : 1800 F Étranger : 1900 F

Chèque à établir à l'ordre de : Éditions BRGM, 3, avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

ISSN 0246-0874 © Éditions BRGM - BP 6009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Directeur de la publication : Gérard Sustrac
Commission paritaire : N° 627 ADEP
Dépôt légal : 4^e trimestre 1998
Imprimerie : Centr'Imprim, 36100 Issoudun

