

L'île de Rurutu (archipel des Australes, Polynésie française) : une édification complexe liée au fonctionnement de deux points chauds

Gérard GUILLE (1)
Hervé GUILLOU (2)
Catherine CHAUVEL (3)
René C. MAURY (4)
Sylvain BLAIS (3)
Robert BROUSSE (5)

*Rurutu (Austral Islands, French Polynesia):
a complex build-up linked to the activity of two hot spots*

Géologie de la France, n° 3, 1998, pp. 65-85, 12 fig., 3 tabl., 2 pl. photo.

Mots-clés : Volcanisme intraplaque, Basalte, Géochronologie, Géochimie, Polynésie française, Océan Pacifique.

Key words: Within-plate volcanism, Basalt, Geochronology, Geochemistry, French Polynesia, Pacific Ocean.

Résumé

L'île de Rurutu appartient à l'alignement volcanique des Australes, l'un des quatre archipels de la Polynésie française. Elle est caractérisée par la présence de plateaux carbonatés surélevés et par l'existence de deux phases majeures de volcanisme séparées par une longue période d'inactivité de près de 11 Ma.

La phase ancienne, d'âge Miocène moyen (12 Ma), correspond principalement à la mise en place de laves sous-marines constituant la base de l'édifice, à laquelle a succédé une période de volcanisme subaérien. Les laves anciennes sont des basaltes alcalins et parfois cumulatifs (océanites) et des hawaïites.

La phase récente, d'âge Pléistocène (1 Ma), est subaérienne ; ses produits constituent les principaux sommets de l'île. Il s'agit de coulées et de projections (stromboliennes et hydromagmatiques) qui recouvrent par endroits les plateaux carbonatés. Les laves correspondantes sont des basanites, qui caractérisent le

volcanisme émis dans la partie méridionale de l'île, ainsi que des hawaïites basanitiques situées principalement dans sa partie nord.

L'édification de l'île de Rurutu est complexe et résulte de l'activité de deux sources magmatiques séparées dans le temps et dans l'espace. Les laves miocènes ont été produites par l'activité du point chaud actuellement situé sous le seamount Macdonald au sud-est de l'archipel tandis que les laves quaternaires ont pour origine une reprise de l'activité volcanique alors que Rurutu se trouvait à plus de 1000 km au nord-ouest du Macdonald. Ces deux populations de laves présentent de nombreuses différences géochimiques :

- les laves anciennes ont une composition de type HIMU caractérisée par de fortes valeurs du rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (compris entre 20,82 et 21,08) et de faibles valeurs du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (compris entre 0,70281 et 0,70300) et sont proches de celles des îles voisines de Mangaia au nord-ouest et Tubuai au sud-est ;

- les laves récentes présentent des caractéristiques géochimiques différentes de celles des laves anciennes. Elles sont plus riches en alcalins et en éléments incompatibles, notamment en Rb, Ba, Th et Nb. Ces caractéristiques peuvent s'expliquer par la contamination des magmas ascendants issus du deuxième panache par un composant de type carbonatite qui serait resté piégé dans la lithosphère océanique sous-jacente à l'île durant le fonctionnement de la première source magmatique (Chauvel et al., 1997).

Abridged English version

Geology

Rurutu belongs to the Austral-Cook Islands, which form the most southerly island chain of French Polynesia; this lineament extends from the submarine Macdonald seamount in the southeast to the Palmerson atoll in the northwest and covers a distance of about 2000 km.

Rurutu is 10 km long and 5.5 km wide, covers 38.5 km² and culminates at 389 m. Its main originality consists in the

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

(2) Laboratoire des Sciences, du climat et de l'environnement, Unité mixte CEA/CNRS, Bât. 12, Domaine du CNRS, 91198 Gif-sur-Yvette.

(3) Géosciences Rennes, UPR 4661, Université Rennes I, 35042 Rennes Cedex.

(4) UMR N° 6538 « Domaines Océaniques », Université de Bretagne Occidentale, BP 809, 29285 Brest.

(5) Université de Paris Sud, Orsay, Laboratoire de Pétrologie-Volcanologie, Bât. 504, 91405 Orsay.

existence of carbonate platforms surrounding most of the island. These platforms define cliffs along the coastline, with two benches located at elevations of + 8/+ 10 m and +1.7 m that correspond to former sea levels dated at 120 000 years and 5 000 years BP, respectively.

Geochronology

Rurutu was built-up during two distinct magmatic episodes separated by a gap of about 11 Ma. The age of the older lavas (12 Ma) is consistent with a simple model in which the plume is already located under the Macdonald seamount while the Pacific lithospheric plate drifts at a speed of 11 cm/year. This plume has been active for at least 18 Ma and has led to the formation of the Mangaia, Rimatara, Rurutu, Tubuai, Raevavae and Rapa Iti islands as well as the Marotiri islets and the Macdonald seamount. The recent lavas (1 Ma) were produced by a renewal of magmatic activity in a zone that would appear to be currently located between the islands of Rurutu and Tubuai.

In the gap between these two eruptive phases, carbonate sediments were deposited on the flanks of the early volcanic massif. Doming of the lithosphere linked to the second magmatic event led to uplift of the island and the exposure of the sediments as rimming carbonate plateaus. The presence of *Lepidocyclines* in the sediments indicates an Upper Miocene age of deposition (older than 5 Ma).

Petrology

The older lavas were emplaced in a submarine environment followed by subaerial conditions. They consist of picritic basalt, alkali basalt and hawaiite. Recent subaerial lavas define the main island summits, which are composed of lava flows and volcanic ejecta. Their composition is basanitic in the southern part of the island and basanitic to hawaiitic in the northern and central parts.

The older and recent lavas can be distinguished by their trace-element and isotopic compositions. The older Rurutu volcanics are similar to the Mangaia and Tubuai lavas. They exhibit a HIMU composition with high $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios (20.82 to 21.08) and low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.70281 to 0.70300). The characteristics

of the recent lavas can be explained by contamination of the ascending magmas generated by the second plume source. The contaminant is probably a carbonatitic component produced during the first magmatic event and which had been trapped in the oceanic lithosphere (Chauvel et al., 1997).

Introduction

Découverte par le capitaine James Cook le 13 avril 1769, l'île de Rurutu (22° 28' de latitude sud et 151° 20' de longitude ouest), " la gerbe dressée " en polynésien, a une forme rappelant celle du continent africain. Elle appartient à la partie française de l'archipel des Australes-Cook (fig. 1). Cet archipel, situé entre 19° et 29° de latitude sud et entre 140° et 160° de longitude ouest, est le plus méridional et le plus étendu des alignements polynésiens. Il s'étend sur environ 2 200 km depuis le volcan sous-marin Macdonald situé à son extrémité sud-est jusqu'à l'île de Aitutaki au nord-ouest. Son orientation moyenne (N120-130° E) correspond à celle du mouvement de la plaque Pacifique en Polynésie depuis le Néogène.

A la différence des autres alignements polynésiens, celui des Australes-Cook est constitué d'îles dont l'âge d'édification n'augmente pas régulièrement en fonction de la distance au point chaud représenté par le volcan sous-marin Macdonald (Johnson, 1970). En effet, excepté l'île de Mangaia, toutes les îles Cook ont un âge jeune par rapport à leur position dans l'alignement et deux îles, Rurutu et Aitutaki, présentent deux phases d'activités volcaniques séparées respectivement par 11 Ma et 7 Ma. En outre, les laves de certaines îles présentent des particularités isotopiques (Tubuai, Rurutu, Mangaia), avec des signatures géochimiques inhabituelles caractérisées par de fortes valeurs du rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et de faibles valeurs du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Vidal et al., 1984 ; Vidal et al., 1989). Enfin, il y a, au sein de l'alignement des Australes, des îles hautes dont l'âge atteint voire dépasse 10 Ma (Tubuai, Rurutu, Mangaia) alors que dans tous les autres alignements volcaniques de Polynésie française, les îles dont le substratum basaltique à un âge supérieur à 7 Ma sont parvenues au stade atoll. Ainsi, certains âges mesurés à

Rurutu sont quasi identiques à ceux obtenus au niveau du soubassement volcanique des atolls de Mururoa et de Fangataufa, enfoui sous une épaisseur de dépôts carbonatés qui varie entre 200 et 400 m (Buigues et al., 1992 ; Guille et al., 1993).

Au sein de l'alignement des Australes-Cook, l'île de Rurutu est la seule qui présente toutes ces caractéristiques. Son étude permettra de mieux comprendre l'édification complexe d'une île intra-océanique mais aussi de discuter le modèle de fonctionnement des points chauds.

Géologie sous-marine

L'île de Rurutu repose sur une croûte océanique dont l'âge a été estimé à environ 80 Ma (Crétacé supérieur) et située vers - 4500 m (fig. 1). L'ensemble du massif sous-marin de Rurutu (carte GEBCO de Monti et Pautot, 1974) est complexe (fig. 2). Il comprend en effet cinq édifices dont l'île de Rurutu située en position NW et seamounts dont les sommets se situent à des profondeurs comprises entre - 2000 m et - 500 m. L'ensemble de la structure a un diamètre de 100 km à la profondeur de - 4000 m.

Géologie générale

L'île de Rurutu s'étend sur 10 km du nord au sud pour une largeur maximale de 5,5 km, couvre une superficie d'environ 38,5 km² et culmine à 389 m (mont Taatioe). Son originalité tient à la présence de plateaux calcaires dominant la mer par des falaises qui forment une ceinture et à l'absence de lagon. Seul est présent un récif frangeant dont la largeur ne dépasse pas une centaine de mètres.

La première carte de Rurutu a été publiée par L.J. Chubb (1927). En 1955, J.M. Obellianne dresse une carte géologique sur laquelle il distingue les roches volcaniques des roches sédimentaires. Différents séjours sur le terrain (GG, RM, SB et RB) ont permis de distinguer, outre les plateaux carbonatés, quatre formations volcaniques (fig. 3) :

- une série inférieure ancienne, sous-marine, constituée de pillow lavas et de hyaloclastites ;

- une série également ancienne mais de mise en place subaérienne ;

- une série supérieure récente affleurant largement dans la partie nord de l'île, et comprenant coulées et projections qui recouvrent souvent les plateaux carbonatés surélevés ;

- l'ensemble volcanique de Naairoa au sud, constitué d'une brèche de maar qui repose soit sur les coulées récentes soit directement sur les plateaux carbonatés.

Les formations volcaniques

Le volcanisme ancien

Les produits volcaniques émis durant la première phase d'activité de Rurutu (12,7 à 12,1 Ma) constituent une part importante des formations affleurantes de l'île. Ils se sont mis en place d'abord en milieu marin, sous une faible tranche d'eau puis à l'air libre.

Coulées et brèches sous-marines

Ces formations constituent la base observable de l'édifice volcanique ancien de Rurutu. Elles sont recoupées par un dense réseau de dykes, souvent anastom-

sés (Planche Ia). Ces dykes de basaltes picritiques, de basaltes alcalins et d'hawaïites étant moins courants dans les coulées et les brèches subaériennes anciennes, on peut supposer qu'ils représentent les conduits d'alimentation du volcanisme subaérien ancien. Les coulées

et brèches sous-marines présentent trois faciès principaux :

1) Les coulées de laves en coussins (pillow-lavas) sont bien représentées dans la partie nord-est de l'île [Planche Ib]. Les coussins, empilés de façon subhorizontale,

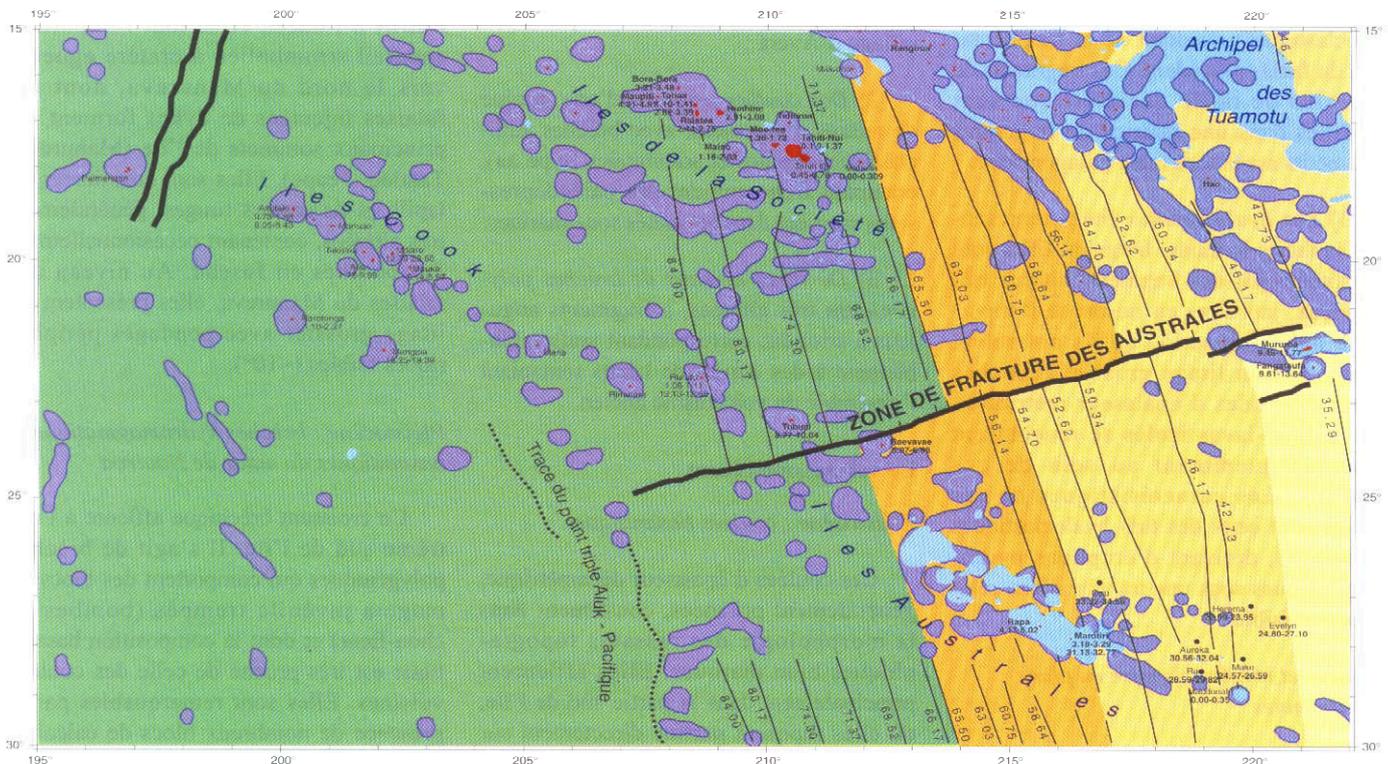
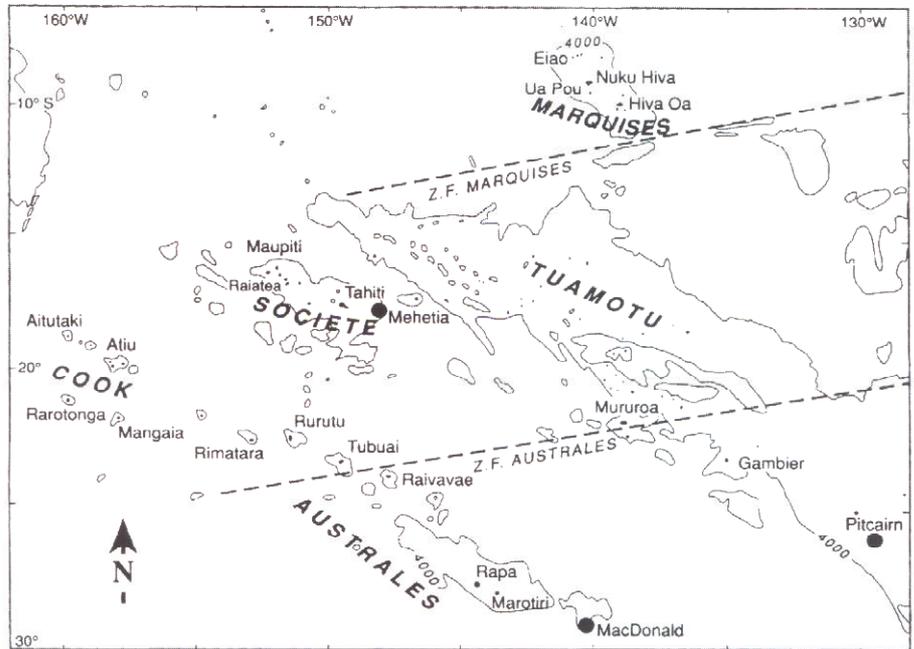


Fig. 1 - Position de l'archipel des Australes dans le Pacifique Sud avec la localisation des différentes îles (légende : voir carte morphostructurale en fin d'ouvrage), linéation magnétique et âge en Ma.

Fig. 1 - General map of the Austral Islands (with its continuation northwest to the Cook islands) in the South Pacific showing the location of the various islands along the chain (legend: refer to morphostructural map).

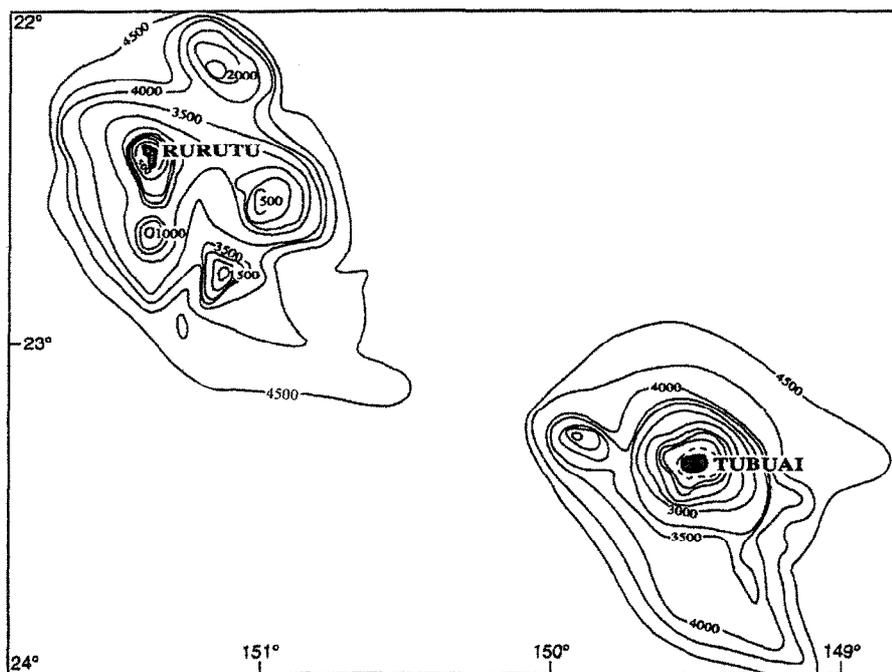


Fig. 2 - Carte bathymétrique des environs de l'île de Rurutu, d'après Monti et Pautot (1974).
Fig. 2 - Bathymetric map around Rurutu island: (after Monti and Pautot, 1974).

sont de dimensions décimétriques à métriques ; leurs bordures vitreuses sont en général bien visibles, de même que leur prismation radiale et leur cavité centrale.

2) *Les brèches de coussins* (brèches autoclastiques) résultant de la fragmentation du faciès précédent. Ces fragments de coussins de taille décimétrique sont emballés dans une matrice de fragments plus petits assez fortement palagonitisée.

3) *Les hyaloclastites* litées représentent le faciès le moins fréquent. Elles sont constituées par des fragments vitreux très anguleux, jaunâtres en raison de l'importante palagonitisation qu'ils ont subie, présentant un litage grossier (couches subhorizontales d'épaisseur métrique). Des pillow-lavas isolés se rencontrent assez fréquemment au sein de ces niveaux. Les caractéristiques de ces dépôts sont ceux des tufs hyaloclastiques surtseyens, dérivant d'éruptions hydro-magmatiques sous une tranche d'eau relativement faible.

Coulées et brèches de mise en place subaériennes

Trois faciès principaux peuvent être distingués dans ces formations qui représentent la partie sommitale de l'édifice volcanique :

1) *Des coulées fluides* à surface pahoehoe de faible épaisseur (métrique à inframétrique), rarement prismées, se présentant souvent sous forme d'orteils et de lobes pahoehoe empilés les uns sur les autres ; ce faciès est observable au sud du village d'Avera ;

2) *Des coulées prismées* d'une dizaine de mètres d'épaisseur, avec brèches autoclastiques basales et sommitales (type aa), occupant fréquemment des paléodépans creusés dans les unités sous-marines.

3) *De rares niveaux de brèches polygéniques* très altérées, à fragments anguleux à arrondis, correspondant vraisemblablement à des dépôts de lahars remaniant l'ensemble du volcanisme ancien.

Le volcanisme récent

Pléistocène : coulées basanitiques

Ces coulées d'épaisseur décimétrique, généralement prismées, constituent dans la morphologie des ressauts topographiques bien marqués. Elles affleurent principalement dans la partie sud de l'île, où elles reposent parfois directement sur les plateaux carbonatés surélevés, mais se retrouvent également au nord où elles constituent une semelle sous les coulées d'hawaïites basanitiques terminales.

Pléistocène : coulées d'hawaïites basanitiques

Ces coulées, également prismées, constituent l'ensemble du volcanisme récent de la partie nord de l'île (massif du Manureva), ainsi qu'un axe nord-sud au centre de l'île et des massifs périphériques au sud des villages d'Avera et de Hauti. Elles sont pour la plupart d'épaisseur décimétrique ; cependant, au nord-ouest d'Avera, l'une d'entre elle atteint 30 m d'épaisseur. Il s'agit d'une coulée de vallée reposant, par l'intermédiaire d'une brèche scoriacée basale, sur les volcanites anciennes très altérées où l'on distingue par endroits quelques coussins (Planche Ic).

Ces coulées récentes débordent fréquemment sur les plateaux carbonatés. En plusieurs endroits, elles descendent jusqu'au niveau de la mer et on les retrouve en blocs prismés remaniés dans le récif frangeant holocène.

Pléistocène : brèches stromboliennes hawaïtiques

Ces brèches s'observent au niveau des deux centres d'émission principaux du volcanisme récent : la zone sommitale du Rairiri à l'ouest, et surtout l'important appareil strombolien à cratère égueulé vers le nord du Manureva, dont les falaises injectées de dykes forment les principaux sommets de l'île (Manureva, Taatioe, Teape). Elles sont constituées de lapilli et de scories rouges, généralement très altérées, contenant occasionnellement des bombes en fuseau. Au niveau des falaises du Manureva, elles présentent un litage grossier avec pendages périphériques faibles (<10°).

Pléistocène : brèches hydromagmatiques basanitiques du maar de Naairoa

Ce croissant bréchiq ue affleure à l'extrême sud de l'île. Il s'agit de brèches polygéniques qui comportent des blocs de magma juvénile trempés (bombes en chou-fleur) et dont la composition basanitique est très proche de celle des coulées voisines. Elles sont remarquables par la présence de nombreux blocs de calcaires anguleux de taille centimétrique à décimétrique, ainsi que par le litage très fin de certains affleurements, caractérisés par des figures de déferlantes (granoclassements

obliques, dunes, antidunes). Ces dépôts présentent des pendages périphériques peu marqués ($< 10^\circ$). Leur contact avec les coulées basanitiques ou le plateau calcaire sous-jacent est remarquablement plan. L'épaisseur préservée de ces brèches de maar croît du sud vers le nord et varie de quelques centimètres à plus de 30 mètres (Planche Id et Ie).

Les plateaux carbonatés surélevés

L'existence de calcaires soulevés à Rurutu a été signalée au début du 19^{ème} siècle, peu après la découverte de l'île par Cook. J.M. Obelliane (1955) interprète ces reliefs comme des restes d'un ancien récif frangeant alors que Aubert de la Rue (1959) précise que ces falaises ne sont pas de véritables récifs mais représentent des formations sédimentaires stratifiées.

Les formations calcaires qui entourent de manière discontinue le cœur volcanique de l'île, ne reposent pas directement sur le substratum volcanique mais présentent à leur base un niveau d'altération argileux associé à de nombreux galets et blocs de lave très altérés. Ces plateaux périphériques culminent à 114 m dans la partie est de l'île (altitude moyenne de 100 m), atteignent jusqu'à 800 m de large et se terminent brusquement, côté océan, par de hautes falaises verticales (Planche IIb) qui surplombent le platier frangeant Holocène.

Il s'agit de calcaires bioclastiques à abondantes *Lepidocyclines* trouvées dans le plateaux de Peva et de Matonaa (Bourrouilh-Le Jan, 1984) dont la présence est symptomatique d'un âge Miocène supérieur (antérieur à 5 Ma). Ces calcaires, très riches en débris coralliens, sont grossièrement lités avec des bancs de 30 cm à 1 m d'épaisseur. Ils présentent des pendages périphériques de 15 à 20°, indiquant leur caractère transgressif sur l'édifice volcanique ancien.

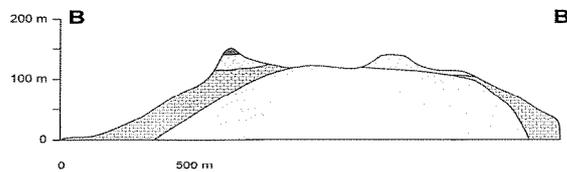
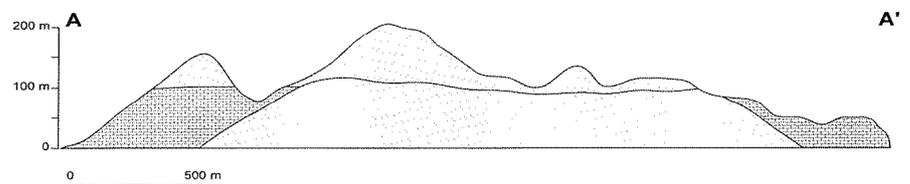
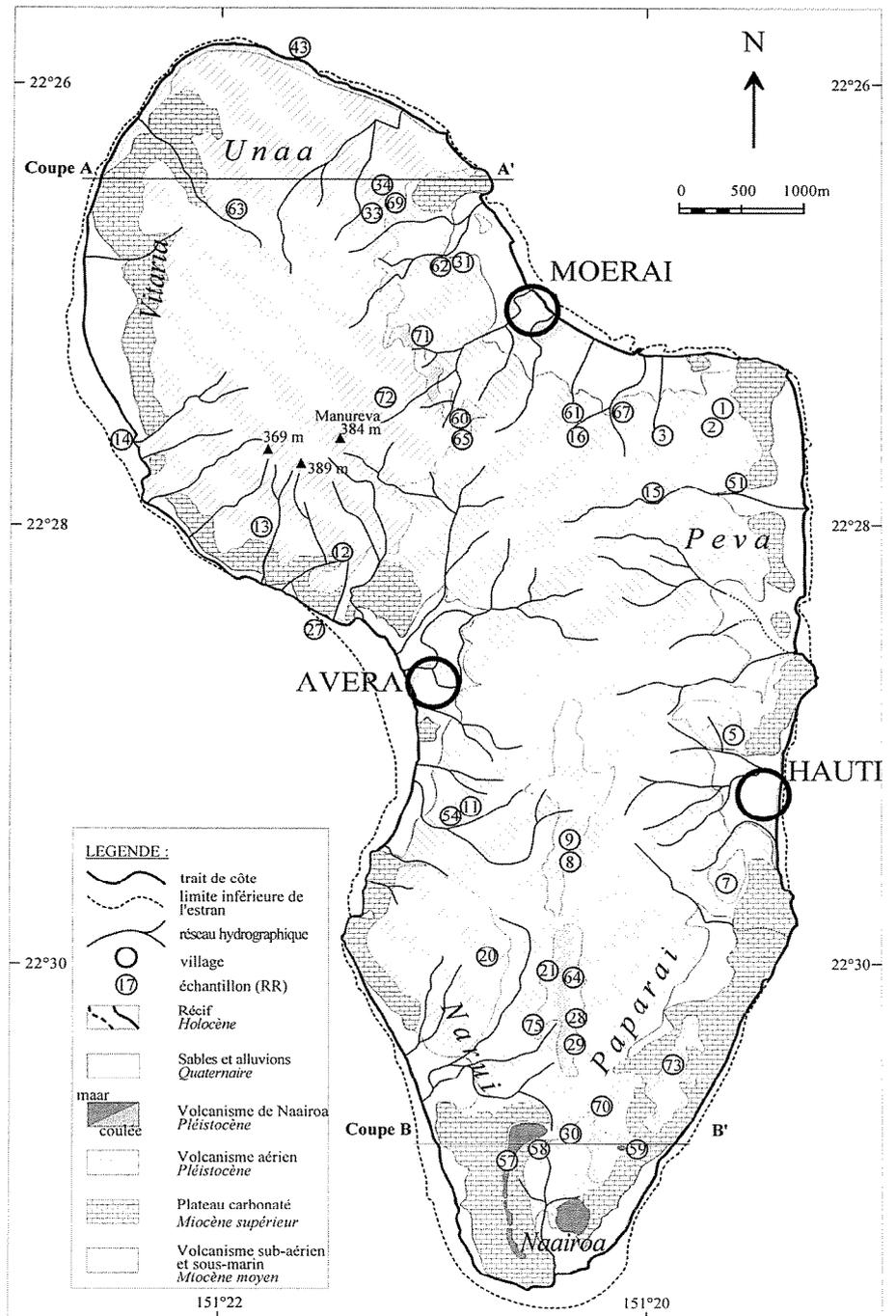


Fig. 3 - a) Carte géologique schématisée de l'île de Rurutu. Les numéros se réfèrent aux échantillons analysés du tableau 2. b) Coupes schématiques selon les profils AA' et BB'.

Fig. 3 - a) Geological sketch map of Rurutu. Numbers refer to analyses in Table 2. b) AA' and BB' schematic cross sections.

Ces falaises se retrouvent parfois également du côté de l'intérieur de l'île (Planche IIc). Leur origine a été expliquée par Stoddart et Spencer (1987) par l'action des eaux de drainage des roches volcaniques, qui tendent à s'accumuler derrière l'endiguement constitué par des blocs, ce qui empêche leur écoulement. Ces eaux ont provoqué des phénomènes de dissolution karstique dans le calcaire, entaillant la base des falaises.

En plusieurs endroits, les falaises sont creusées par des systèmes de grottes situées à des altitudes différentes et qui correspondent à des anciens niveaux de l'océan. Dans la partie inférieure des falaises, du côté de l'océan, deux alignements d'encoches relativement continus sont observables, le premier vers + 8/+ 10 m d'altitude et le second légèrement au-dessus du platier actuel. Les encoches supérieures présentent un toit encombré par des enduits calcitiques et de nombreuses stalactites dues à des circulations karstiques. La profondeur est de l'ordre de 4 à 5 mètres et le plancher comporte des fragments de conglomérat biodétritique récifaux où l'on peut reconnaître des mollusques dont le milieu de vie actuel est le récif frangeant et notamment la zone frontale de celui-ci face à l'océan. L'état des coquilles (fragmentation et degré d'usure) et la composition même de l'assemblage attestent qu'il s'agit d'un conglomérat bioclastique de remplissage. Des datations au $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ sur des échantillons aragonitiques de madréporaires prélevés près de la base de cette encoche (Pirazzoli et Veeh, 1987) ont donné un âge moyen de 122 000 ans qui correspond à la dernière période interglaciaire (Emiliani 1978 ; Gaven et Bourouilh-Le-Jan 1981 ; Pirazzoli et Salvat, 1992). D'après ses dimensions et la forme de son profil, le niveau semble correspondre à un niveau de l'océan n'ayant subi de fluctuation de plus de 2 m au cours d'une période de durée au moins égale à 5 ou 6 millénaires. Cette situation rappelle l'atoll soulevé de Makatea (archipel des Tuamotu), où une encoche taillée dans la falaise à + 5/+ 8 m, a été datée également à 120 000 ans (Veeh, 1966 ; Montaggioni, 1985). Le niveau inférieur situé entre + 1,2 et + 1,7 m, ne présente pas de stalactites et sa base est parfois masquée par des dépôts de plage récents. Le plus souvent, la hauteur des encoches est de 2 à 3 mètres et leur profondeur, d'ordinaire de 3 à 6 mètres, peut atteindre localement jus-

qu'à 8 mètres. Il a été daté de l'Holocène (5000-4000 ans) et indique un niveau marin légèrement plus élevé que dans les autres îles de la Polynésie française.

Les plateaux carbonatés sont le siège d'une karstification intense car les précipitations tropicales occasionnent le transfert de quantités d'eau très importantes. On y retrouve tous les éléments classiques du relief karstique dont les manifestations les plus caractéristiques sont les nombreuses grottes et cavernes avec concrétions stalactitiques et stalacmitiques, dolines, gouffres et reculées avec perte et résurgence de rivière souterraine. Leur surface est ciselée par un réseau de lapiez très dense sauf dans les endroits où les émissions récentes (coulees ou projections hydromagmatiques) qui la recouvrent ont assuré leur protection.

Au pied des falaises, le récif frangeant holocène est, en général, peu étendu. Le platier, large d'une centaine de mètres en moyenne, est inexistant devant certains caps, mais peut atteindre jusqu'à 500 m de largeur dans la baie d'Avera. Il découvre rarement, restant le plus souvent sous quelques décimètres d'eau, même à marée basse.

Les concentrations manganifères

Signalés par L.J. Chubb (1927) et par J.M. Obellianne (1955), ces concentrations sont localisées à l'interface du calcaire et de son substrat volcanique et sont visibles dans la partie sud de l'île, à Naairoa.

Des études géochimiques récentes (J. Trichet, comm. pers. 1995) permettent de penser que ces enrichissements manganifères ne résultent ni d'apports hydrothermaux, du fait de la quasi-absence d'éléments incompatibles normalement concentrés dans les fluides magmatiques alcalins (terres rares légères, Th, Nb, Zr, etc.), ni de l'accumulation de matériaux pédologiques, en raison de leur pauvreté en éléments mobiles résiduels normalement concentrés dans les sols (Fe, Al, P, Ti, Co, Cr, terres rares, Th, Nb, Zr, etc.). Ils pourraient provenir de la précipitation d'éléments (Mn, Ba, V, Co, Cr, ...) transportés en solution hors des matériaux d'altération au sein desquels a lieu la concentration notamment Mn, Co et Cr par rapport aux roches mères.

Age et pétrologie des formations volcaniques

Techniques analytiques

Chronologie

Afin d'assurer clairement la signification géologique des résultats, l'étude géochronologique des formations volcaniques n'a porté que sur des échantillons parfaitement localisés sur le terrain dont les pertes au feu sont inférieures à 2 % et ne présentant pas ou peu de traces d'altération aussi bien macroscopiquement que microscopiquement. Les mesures ont été effectuées sur les pâtes microcristallines des échantillons. Pour isoler cette méso-stase, les phases d'altération ont été éliminées par lavage acide sous ultrasons ; les phénocristaux (olivines, pyroxènes et feldspaths plagioclases) ont été écartés de la fraction broyée et tamisée (0,200 mm à 0,100 mm) en utilisant des liqueurs de densités adaptées. Ces phases de cristallisation précoces sont en effet susceptibles de contenir de l'argon 40 en excès pouvant entraîner une erreur systématique par excès sur les âges, supérieure à la marge de l'erreur analytique.

Géochimie

Les teneurs en éléments majeurs ont été obtenues par ICP-AES à l'université de Bretagne Occidentale à Brest, celles en éléments en traces par différentes méthodes analytiques : ICP-AES à l'université de Bretagne Occidentale, ICP-MS à l'université de Montpellier et les valeurs des isotopes du Sr, Nd et Pb par dilution isotopique à l'Institut Max Planck de Mayence et à l'université de Rennes.

ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry)

Les caractéristiques de la technique et la préparation des échantillons sont décrits dans J. Cotten *et al.* (1995). Les coefficients de variation sont inférieurs à 2 % pour les éléments majeurs excepté MnO ($\pm 0,01$ % en écart type) et à 5 % pour les éléments en traces quand les teneurs sont supérieures à 8 fois la détection limite. Celle-ci est de 2 ppm pour Cr, Ni, Co, V, Ba, Ce, Zn et Nd ; 1 ppm pour Rb, Nb, La et Er ; 0,5 ppm pour Sr, Sc et de 0,2 ppm pour Eu, Dy et Yb.

ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry)

Les analyses ont été réalisées en utilisant un VG Plasma Quad (PQ Turbo Plus) standard avec les conditions opératoires suivantes : Puissance incidente 1,3 kW ; Puissance réfléchie <10 W ; Gaz de nébulisation 0,87 l/mn ; Gaz de refroidissement 13,5 l/mn ; Gaz auxiliaire 0,5 l/mn ; la chambre de nébulisation est refroidie à 9° C.

Dilution isotopique

Les mesures isotopiques du Sr, du Nd et du Pb ont été réalisées sur des gravillons fortement lessivés en HCl concentré après attaque et en suivant essentiellement les techniques analytiques décrites par W.M. White et P.J. Patchett (1984). Les blancs sont inférieurs à 500 picogrammes pour le strontium et le plomb et à 100 picogrammes pour le néodyme. Ces valeurs sont négligeables par rapport aux teneurs des échantillons. Les valeurs isotopiques mesurées pour les standards Sr, Nd et Pb sont données dans le tableau 3.

Analyses minéralogiques

Les analyses minéralogiques ont été réalisées par microsonde électronique Cameca SX 50 (Microsonde Ouest, Brest). Les conditions analytiques sont les suivantes : 15 kV, 15 nA et temps de comptage de 6 s pour les majeurs et 10 s pour les éléments en traces. Les standards utilisés pour les terres rares et Y sont LaB7, CeB6, Nd3Ga5O12, Y (métal) et Dy (métal). Les limites de détection sont destinées à 0,5 % pour les terres rares, Y et 0,2 % pour les éléments majeurs.

Géochronologie

Historique

Les premières datations réalisées sur les laves de Rurutu (Krummenacher et Noetzelin, 1966) donnèrent un âge de 0,5 Ma, âge récent confirmé en 1975 par G.B. Dalrymple *et al.* avec quatre datations comprises entre 1,09 et 1,02 Ma sur des échantillons non localisés. En 1976, R.A. Duncan et I. McDougall furent les premiers à différencier un volcanisme ancien compris entre 12,21 et 11,98 Ma et un volcanisme récent daté à 1,05 Ma. De nouvelles datations réalisées par I. McDougall et R.A. Duncan

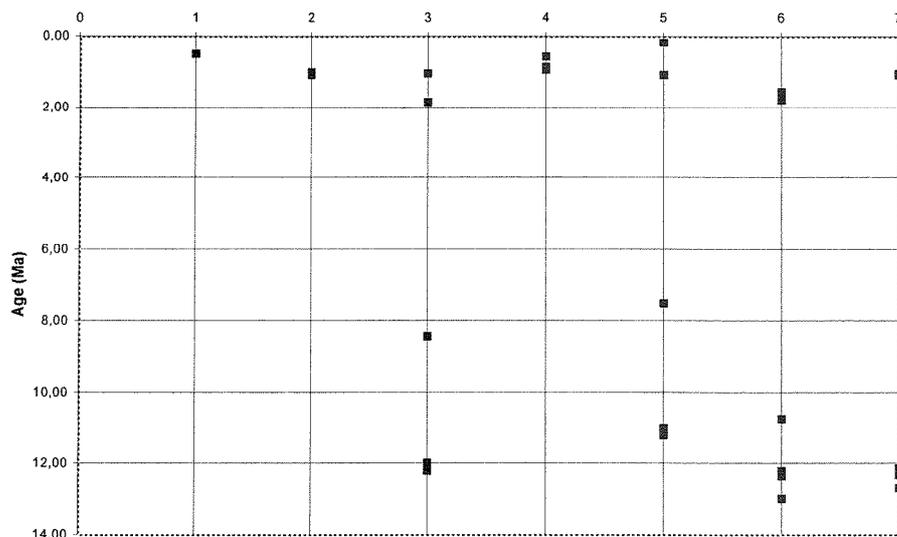


Fig. 4 - Synthèse des données chronologiques concernant les laves de Rurutu : 1 - Krummenacher et Noetzelin (1966) ; 2 - Dalrymple *et al.* (1975) ; 3 - Duncan et McDougall (1976) ; 4 - Turner et Jarrard (1982) ; 5 - Matsuda *et al.* (1984) ; 6 - Diraison (1991) ; 7 - Ce travail.
Fig. 4 - Compilation of age data for Rurutu lavas, based on different sources: 1 - Krummenacher and Noetzelin (1966); 2 - Dalrymple *et al.* (1975); 3 - Duncan and McDougall (1976); 4 - Turner and Jarrard (1982); 5 - Matsuda *et al.* (1984); 6 - Diraison (1991); 7 - this study.

Echantillon	Type	K %	⁴⁰ Ar* %	⁴⁰ Ar* (atg ⁻¹ x10 ¹²)	Age (±2 σ) Ma
Volcanisme ancien					
RR 03	Coulée	0,913±0,009	67,96	1,935	12,19±0,13
RR 16	Coulée	0,694±0,007	51,81	1,465	12,13±0,13
RR 50	Coulée	0,693±0,007	20,36	1,529	12,68±0,14
RR 67	Coulée	0,370±0,004	45,66	0,792	12,31±0,13
Volcanisme récent					
RR 05	Coulée	1,098±0,011	26,69	2,106	1,11±0,01
RR 07	Intrusion	1,171±0,012	22,65	2,218	1,09±0,02
RR 13	Coulée	1,257±0,013	20,31	2,311	1,06±0,04
RR 29	Coulée	1,225±0,012	32,99	2,362	1,11±0,01
RR 33	Coulée	1,141±0,014	16,74	2,156	1,09±0,01

Tabl. 1 - Nouveaux âges ⁴⁰K/⁴⁰Ar des laves de Rurutu. Pour chaque échantillon, une moyenne d'au moins deux analyses indépendantes pour la mesure du potassium et de ⁴⁰Ar radiogénique. Les âges sont calculés en utilisant les constantes conventionnelles (Steiger et Jäger, 1977). La méthode analytique est décrite dans le texte.

Table 1 - New ⁴⁰K/⁴⁰Ar age data for Rurutu lavas. For each sample, mean values are calculated from at least two separate analyses for potassium and radiogenic ⁴⁰Ar (Ar*) measurements. Ages are calculated using international conventional constants (Steiger and Jäger, 1977). See text for description of analytical methods.

(1980), D.L. Turner et R.D. Jarrard (1982), J.I. Matsuda *et al.* (1984) et C. Diraison (1991) confirmèrent, dans l'édification de l'île de Rurutu, l'existence de deux phases majeures d'émissions volcaniques séparées par une longue période d'inactivité de près de 11 Ma (fig. 4).

Résultats

Les nouvelles analyses obtenues (tabl. 1) montrent que la phase ancienne, d'âge mio-cène moyen (12,68 Ma à 12,13 Ma), corres-

pond principalement à la mise en place des laves sous-marines constituant la base de l'édifice, à laquelle a succédé une période de volcanisme subaérien. La phase récente du volcanisme, d'âge pléistocène (1,11 Ma à 1,06 Ma) est subaérienne et constitue les principaux sommets de l'île.

Les âges anciens s'intègrent parfaitement dans un modèle simple de point chaud situé actuellement au niveau du volcan sous-marin Macdonald (Johnson et Malahoff, 1971) qui aurait fonctionné

depuis 20 Ma environ et qui aurait construit successivement, outre l'édifice ancien de Rurutu, les îles de Mangaia, Tubuai, Raevavae, Rapa et les îlots de Marotiri (fig. 5). Par contre, ce modèle ne permet pas d'expliquer la présence des laves récentes. En effet, si l'on prend en

compte la vitesse de dérive de la lithosphère océanique dans cette région du Pacifique (11 cm/an), l'île de Rurutu s'est éloignée de la source magmatique d'environ 1 000 km vers le nord-ouest entre les émissions volcaniques miocènes et la reprise de l'activité quaternaire. On doit

donc imaginer la présence d'une deuxième source magmatique qui serait génératrice des laves récentes et que l'on pourrait situer actuellement à environ 100 km au sud-est de Rurutu.

Pétrologie

Sélection des échantillons

Des prélèvements ont été réalisés sur l'ensemble des formations volcaniques de l'île. Après examen des lames minces, les analyses ont été réalisées sur les échantillons présentant peu ou pas de traces d'altération. Dans l'étude géochimique, seuls ont été conservés les résultats obtenus sur des échantillons qui présentaient une perte au feu inférieure à 3 %.

Nomenclatures des laves

L'île de Rurutu est caractérisée par l'existence de deux séries magmatiques peu différenciées avec des valeurs de SiO_2 inférieures à 48 % (fig. 6) : l'une, ancienne, est constituée par des basaltes picritiques ($\text{MgO} > 12\%$), des basaltes alcalins ($\text{DI} < 35$ et $\text{ne} < 7\%$) et des hawaïites ($35 < \text{DI} < 45$ et $\text{ne} < 5\%$) ; l'autre, récente, comprend des basanites ($\text{SiO}_2 < 42\%$ et $8\% < \text{ne} < 15\%$) et des hawaïites basanitiques ($\text{SiO}_2 > 43$ et $7\% < \text{ne} < 14\%$).

Les différentes séries magmatiques

La série ancienne

De mise en place initialement sous-marine, elle comprend des basaltes faiblement alcalins, des hawaïites et des basaltes picritiques, laves cumulatives riches en phénocristaux d'olivine. Les basaltes alcalins sont les termes prépondérants.

Succédant à cette phase sous-marine, les laves subaériennes sont des basaltes faiblement alcalins ($\text{ne} < 7\%$) et des hawaïites. Ces laves, généralement aphyriques, sont, pour une teneur en silice donnée, légèrement plus riches en alcalins que les laves anciennes sous-marines.

La série récente

Elle se caractérise par des laves fortement alcalines qui présentent des différences géochimiques en fonction de leur localisation géographique.

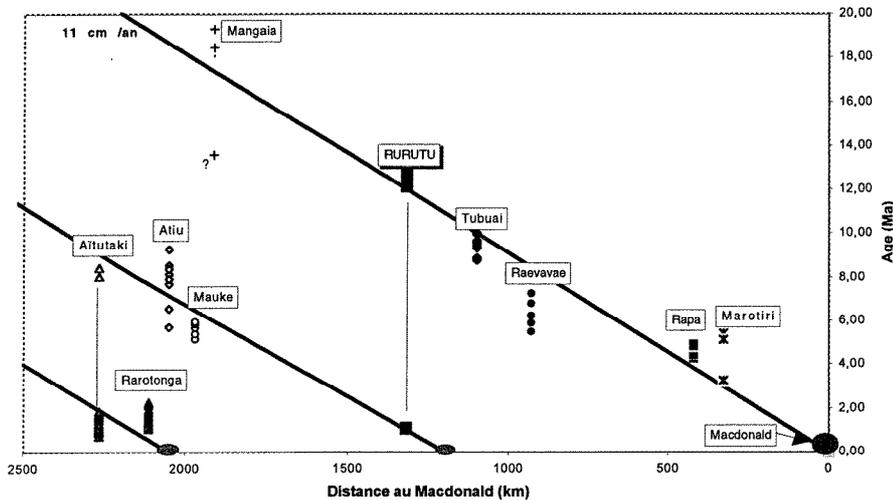


Fig. 5 - Diagramme âge, distance au Macdonald des différentes îles de l'archipel des Australes-Cook. Les données proviennent de : Turner et Jarrard, 1982 (Mangaia, Mauke, Atiu, Rarotonga, Aitutaki), Duncan et McDougall, 1976 (Raevavae), Diraison, 1991 (Rapa), Maury *et al.*, 1994 (Tubuai) et ce travail.

Fig. 5 - Diagram showing age of volcanoes belonging to the Austral-Cook chain in relation to their distance from the Macdonald seamount. The pattern of ages requires the presence of more than one plume conduit.

Data taken from different sources: Turner and Jarrard, 1982 (Mangaia, Mauke, Atiu, Rarotonga, Aitutaki), Duncan and McDougall, 1976 (Raevavae), Diraison, 1991 (Rapa), Maury *et al.*, 1994 (Tubuai) and this study.

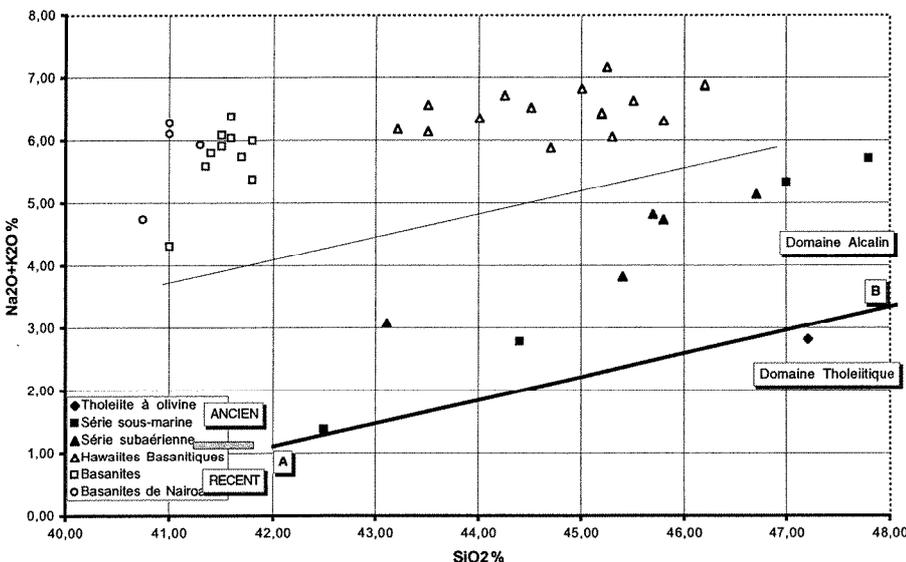


Fig. 6 - Diagramme alcalins-silice des laves de Rurutu. La ligne AB sépare les domaines tholeiitiques et alcalins pour les laves d'Hawaï d'après Macdonald et Katsura (1964). Les laves anciennes sont représentées par les symboles pleins (carrés pour les laves sous-marines et triangles pour les laves subaériennes) ; les laves récentes par les symboles vides (carrés pour les basanites, cercles pour les laves de Naïroa et triangles pour les hawaïites basanitiques). Les données sont reproduites dans le tableau 2.

Fig. 6 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 plot (units in wt %) for Rurutu lavas. The solid line AB separates the alkali basalt field from the tholeiitic basalt field, as observed on Hawaii according to Macdonald and Katsura (1964). The older lavas are indicated as solid symbols with squares (submarine lavas) or triangles (subaerial lavas). The younger lavas are indicated as open symbols with squares (basanites), circles (Naïroa basanites) or triangles (basanitic hawaïites). Data from Table 2.

On distinguera (fig. 3) :

- dans toute la partie méridionale de l'île mais aussi à la base des épanchements récents du nord, des basanites qui sont les laves les plus pauvres en silice ($\text{SiO}_2 < 42\%$) de Rurutu avec des teneurs en néphéline normative qui varient entre 8 % et 15 % ;

- au nord et au centre de l'île ainsi que sur les massifs périphériques, des laves peu différenciées ($28,3 < \text{DI} < 47,4$). Il s'agit essentiellement d'hawaïites basanitiques avec des teneurs en SiO_2 comprises entre 43,20 % et 46,20 % et des teneurs en néphéline normative qui varient entre 7 % et 14 %.

Minéralogie

Le volcanisme ancien

Les coulées basaltiques sous-marines qui affleurent largement dans la partie nord-est de l'île, sont constituées de laves à phénocristaux d'olivines magnésiennes (Fo_{82-76}), de clinopyroxènes calciques ($\text{Wo}_{49-45} \text{En}_{45-36} \text{Fs}_{9-14}$) et de plagioclases de type bytownite (An_{71}). La mésostase contient des cristaux d'olivine (Fo_{73}), de clinopyroxène calcique ($\text{Wo}_{48-45} \text{En}_{40-41} \text{Fs}_{12-14}$), de labrador (An_{60-68}) et de titanomagnétite. Signalons également la présence de cristaux de chromite en inclusions dans les phénocristaux d'olivine.

Les hawaïites sont abondantes et différent des basaltes alcalins par la présence de phénocristaux de bytownite millimétriques ainsi que de titanomagnétite. La mésostase comprend des microlites d'andésine (An_{36-50}), des olivines peu magnésiennes (Fo_{45}) et des titanomagnétites.

Les basaltes picritiques très enrichis en phénocristaux d'olivine (océanites) et de clinopyroxènes calciques (ankaramites) sont également présents, notamment sous forme de dykes recoupant les unités volcaniques sous-marines.

Quelques échantillons de basaltes tholeïtiques (tholeïite à olivine) ont été prélevés à la base de la série ancienne ; le moins altéré d'entre eux, un dyke recoupant les coulées de la cascade de Te Oaa près de Moerai, contient des clinopyroxènes augitiques moins calciques que ceux des basaltes alcalins.

Le volcanisme récent

Les laves pléistocènes se sont mises en place sur les unités volcaniques miocènes fortement altérées ou bien sur les plateaux carbonatés qu'elles ont protégées de l'action de l'érosion. Elles présentent toutes des textures aphyriques ou subaphyriques. On distinguera :

- des basanites qui sont des laves très fraîches (perte au feu $< 1\%$) contenant 8 à 15 % de néphéline normative. Les rares phénocristaux sont des olivines (Fo_{77-74}) et des clinopyroxènes très calciques ($\text{Wo}_{49} \text{En}_{37} \text{Fs}_{14}$). La mésostase comprend des olivines (Fo_{45}), des pyroxènes calciques, des microlites d'andésine (An_{50-36}), de la néphéline et des titanomagnétites.

- des hawaïites basanitiques également peu altérées et légèrement plus claires que les basanites. Les phénocristaux sont rares et comprennent des olivines magnésiennes (Fo_{82-70}), des pyroxènes calciques ($\text{Wo}_{46} \text{En}_{41} \text{Fs}_{13}$) et des titanomagnétites. La mésostase est composée d'olivine (Fo_{67-64}), de clinopyroxènes calciques ($\text{Wo}_{48} \text{En}_{40} \text{Fs}_{12}$), de microlites d'andésine ou de labrador, des feldspaths alcalins (anorthose et sanidine sodique) et des titanomagnétites.

Des enclaves de péridotites magnésiennes ont été découvertes par l'un de nous (RB) dans une coulée d'hawaïite sur la côte ouest de l'île (gisement de Pararai) et décrites par E. Berger (1985). Il s'agit notamment d'une harzburgite à structure à gros grain et à légère tendance porphyroclastique. Elle est constituée d'olivine (52,6 %), d'orthopyroxène (42,9 %), de clinopyroxène (0,3 %) et de spinelle relativement abondants (4,2 %) et parfois bien développés, pouvant atteindre 1,5 mm.

Géochimie

Géochimie des éléments majeurs

Les résultats des analyses nouvelles sont reportés dans le tableau 2. Sur le diagramme ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)/ SiO_2 (fig. 6), tous les échantillons sauf un (RR 69) se situent dans le domaine alcalin et on peut discriminer facilement le volcanisme ancien du volcanisme récent ; les laves récentes sont systématiquement plus enrichies en alcalins que les laves anciennes.

Le volcanisme ancien ne comprend que des termes basiques (basaltes et hawaïites avec $\text{DI}_{\text{max}}=45$) auxquels s'ajoutent des termes cumulatifs (basaltes picritiques avec $\text{DI}_{\text{min}}=11$). Dans cet ensemble magmatique, les basaltes alcalins, avec des teneurs en néphéline normative qui varient de 0,79% à 6,57%, sont les termes prépondérants. Dans cette gamme, la série évolue principalement par fractionnement d'olivine et de pyroxène entraînant la baisse des teneurs en MgO et de CaO. Les oxydes opaques ne précipitent pas à ce stade et TiO_2 augmente régulièrement (fig. 7). Les plagioclases ne font pas partie des phases qui précipitent et les alcalins Na_2O et K_2O augmentent régulièrement. Les laves cumulatives, enrichies en pyroxène (ankaramite) et olivine (océanites) sont relativement bien représentées.

Le volcanisme récent diffère du volcanisme ancien (fig. 6) par une teneur en alcalins supérieures pour une valeur de SiO_2 donnée. En fonction de critères géochimiques, on peut distinguer le volcanisme localisé essentiellement dans la partie méridionale de l'île, du volcanisme septentrional.

Le volcanisme méridional a émis des basanites qui ont des teneurs en SiO_2 comprises entre 41,0 % et 41,8 % et des taux de néphéline normative compris entre 8 % et 13 %. Les basanites qui caractérisent le volcanisme de Naairoa ont des teneurs en SiO_2 similaires et présentent des valeurs en néphéline normative pouvant être supérieures à 14 %. Le passage d'un type à l'autre s'accompagne d'une baisse des teneurs en MgO, CaO et TiO_2 alors que la teneur en Fe_2O_3 croît régulièrement (fig. 7).

Le volcanisme septentrional est constitué principalement par des hawaïites basanitiques dont les teneurs en SiO_2 varient entre 43,2 % et 46,2 %, les indices de différenciation entre 28,3 et 47,4 et les teneurs en néphéline normative entre 7 % et 14 %. Par rapport aux basanites du volcanisme méridional, ces laves sont légèrement plus évoluées et ont des teneurs en MgO, CaO, TiO_2 et Fe_2O_3 légèrement inférieures (fig. 7).

Géochimie des éléments en traces

La teneur des éléments de transition (Co, Cr, Ni) est, à $\text{mg}\#$ équivalent ($\text{mg}\# = 100 \text{ Mg/Mg} + \text{Fe}^{2+}$), tout à fait compa-

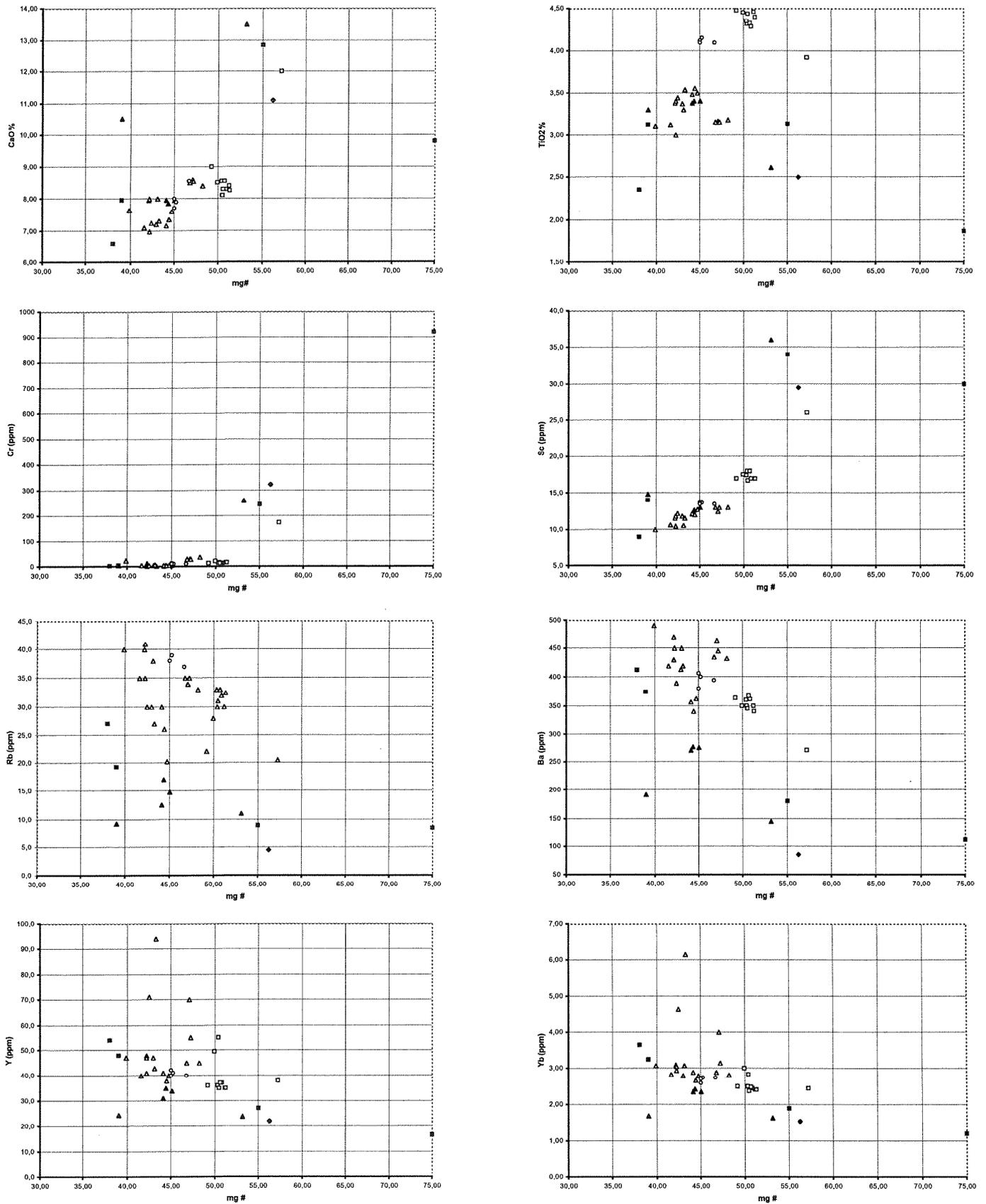


Fig. 7 - Variations des éléments majeurs (CaO, TiO₂) et en traces (Cr, Sc, Rb, Ba, Y, Yb) en fonction de mg# (mg# = 100 Mg/Mg + Fe²⁺) pour les laves anciennes et récentes de Rurutu. Les données sont reproduites dans le tableau 2. ♦ : Tholeiite à olivine ; ■ : Sous-marin ancien ; ▲ : Sub-aérien ancien ; □ : Basanites récentes ; △ : Hawaïites basanitiques récentes ; o : Basanites de Naairoa.

Fig. 7 - Variation of major elements (CaO, TiO₂) and trace elements (Cr, Sc, Rb, Ba, Y, Yb) for old and young Rurutu lavas as a function of mg# (mg# = 100 Mg/Mg+Fe²⁺). Data from Table 2. ♦ : Olivine tholeiite; ■ : Old submarine lavas; ▲ : Old subaerial lavas; □ : Recent basanites; △ : Recent basanitic hawaïites; o : Naairoa basanites.

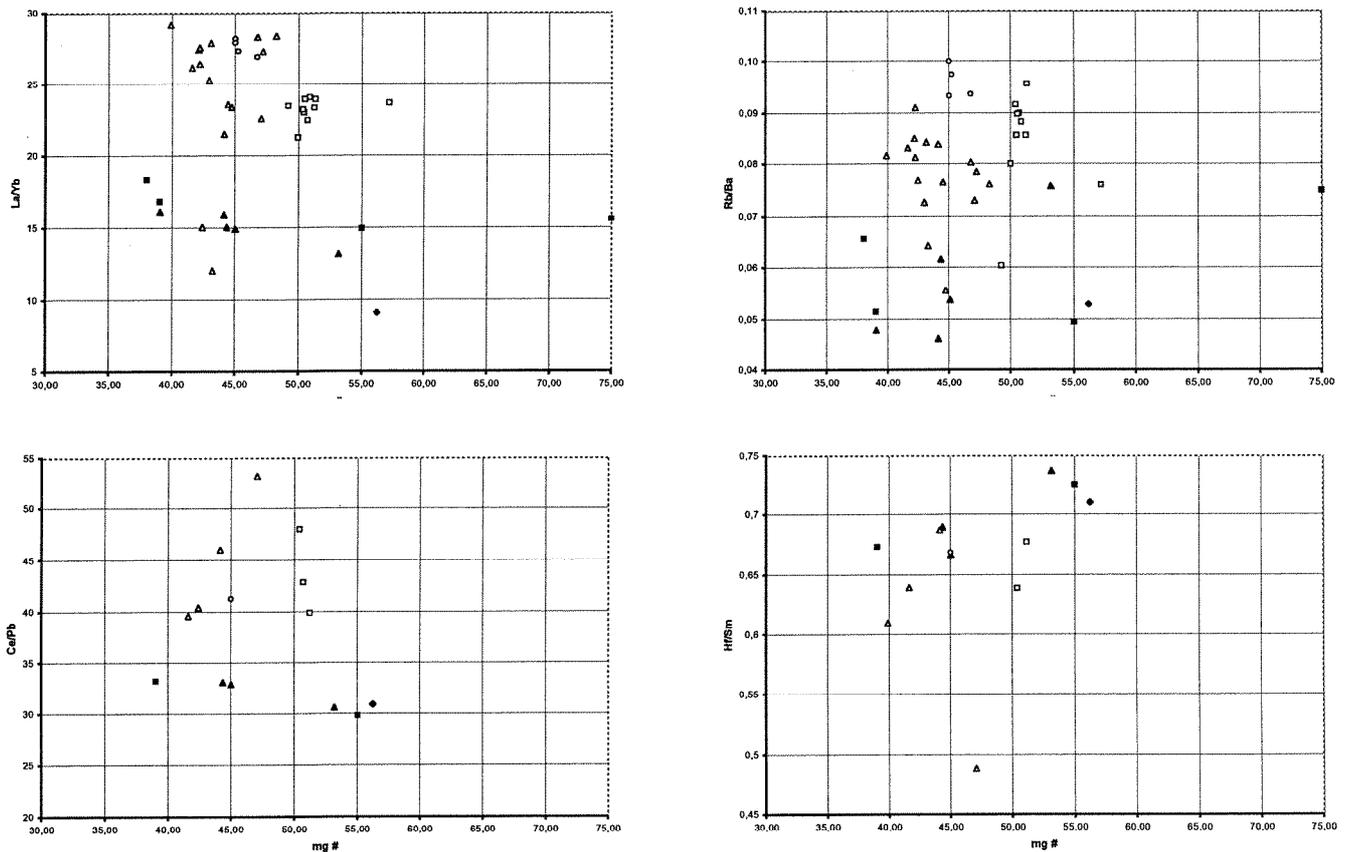


Fig. 8 - Variation des rapports d'éléments en traces (La/Yb, Rb/Ba, Ce/Pb, Hf/Sm) en fonction de mg#. Les symboles sont identiques à ceux de la figure 7. Les données sont reproduites dans le tableau 2.

Fig. 8 - Plots of several trace-element ratios (La/Yb, Rb/Ba, Ce/Pb, Hf/Sm) as a function of mg# showing the systematic difference between the old Rurutu lavas and the young volcanics. Same symbols as in Fig. 7. Data are given in Table 2.

table entre les laves anciennes et les laves récentes, exception faite du Sc qui présente des valeurs plus faibles dans les laves récentes (fig. 7). Par contre, les teneurs en éléments incompatibles sont

généralement plus fortes dans les laves récentes. Cette différence est surtout marquée au niveau des éléments fortement incompatibles comme Rb, Ba, Th et Nb et moindre au niveau de Y et Yb (fig. 7).

Ainsi, les rapports des éléments tels que La/Yb et Ce/Pb présentent des différences entre les laves anciennes et les laves récentes. La série ancienne est caractérisée par des valeurs du rapport La/Yb voisines de 15 et des rapports Ce/Pb inférieurs à 35 (voisins de 30) tandis que les laves récentes ont des rapports La/Yb plus élevés (environ 25) et des rapports Ce/Pb supérieurs à 35 (fig. 8). Par contre, les rapports Th/U (compris entre 3,5 et 4) et Rb/La (compris entre 0,3 et 0,6) demeurent inchangés entre les deux phases du volcanisme. La différence systématique de ces rapports, entre les laves anciennes et les laves récentes doit être attribuée à des compositions différentes de la source (Chauvel *et al.*, 1997).

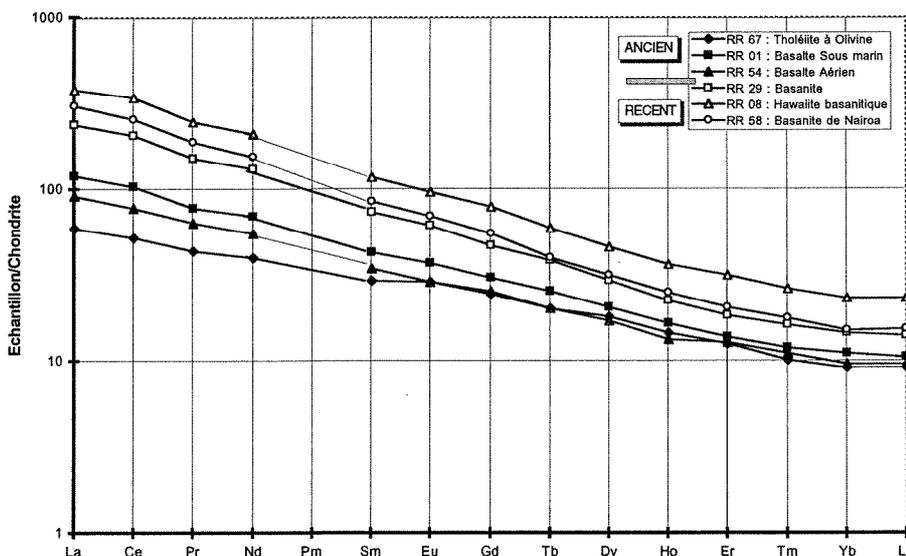


Fig. 9 - Spectre de terres rares normalisé aux chondrites. Valeurs de normalisation d'après Sun et McDonough (1989).

Fig. 9 - Chondrite-normalized rare earth element abundance pattern for Rurutu lavas. Normalizing values are from Sun and McDonough (1989).

Les spectres de terres rares normalisés aux chondrites (Sun et McDonough, 1989) présentent une forte pente négative avec des laves récentes qui sont enrichies en terres rares (fig. 9). Le diagramme des concentrations en éléments en traces des laves de Rurutu normalisées au manteau

primitif (Hofmann, 1988), montre un enrichissement systématique des laves récentes par rapport aux laves anciennes ainsi qu'une anomalie négative très marquée au niveau du K et du Pb dans tous les échantillons et Ti pour les laves récentes (fig. 10).

Ces résultats pourraient correspondre à une simple diminution des taux de fusion. Cependant, en considérant les rapports d'éléments de même degré d'incompatibilité comme Ce/Pb, Rb/Ba ou Hf/Sm (fig. 8), rapports peu affectés par les variations des taux de fusion, il apparaît que la source génératrice des laves récentes est enrichie en Rb et P et appauvrie en Ba, Ti, Hf et Pb par rapport à celle des laves anciennes. (Chauvel *et al.*, 1997).

Géochimie isotopique

La figure 11 précise les domaines de variation des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des alignements polynésiens. On constate que ces variations sont très importantes par rapport au champ du manteau source des MORB (pôle DMM pour *Depleted MORB Mantle*). Pour décrire ces variations, il est nécessaire d'envisager l'existence d'au moins trois compositions théoriques de manteau enrichi (Zindler et Hart, 1986) : EMI (Enriched Mantle type I), EMII (Enriched Mantle type II) et HIMU (High MU, μ désignant usuellement le rapport $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$).

La signification pétrogénétique et surtout la réalité chimico-minéralogique de l'existence de ces pôles sont encore largement débattues. En effet, à l'exception des laves de Tubuai et Mangaia (archipel des Australes) qui dériveraient d'une source typiquement HIMU, les laves des îles polynésiennes dérivent de sources représentant des mélanges complexes des pôles DMM, EMI, EMII et HIMU (fig. 11).

L'interprétation de l'origine de ces différents pôles mantelliques peut être la suivante (Juteau et Maury, 1997) :

- le pôle EMII caractérisé par des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ particulièrement élevés et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ assez bas, est interprété comme du manteau enrichi par l'incorporation ancienne (> 1,5 Ga) de croûte continentale ou de sédiments détritiques en dérivant. Ce pôle contribue à la signa-

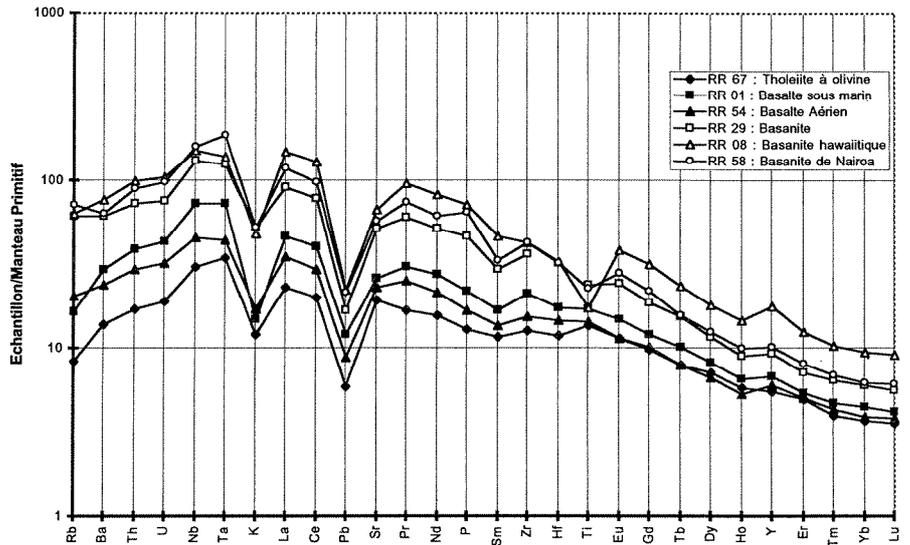


Fig. 10 - Diagramme multiéléments normalisé au manteau primitif des laves représentatives de Rurutu. Valeurs de normalisation d'après Hofmann (1988).

Fig. 10 - Trace-element abundances arranged in the order of ascending compatibility and normalized to primitive mantle concentrations in representative Rurutu lavas (normalizing values are from Hofmann, 1988).

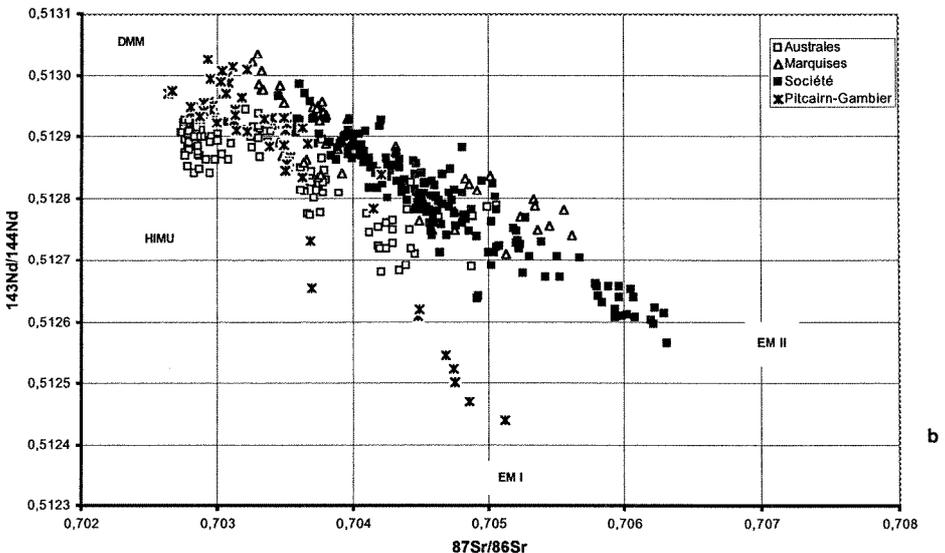
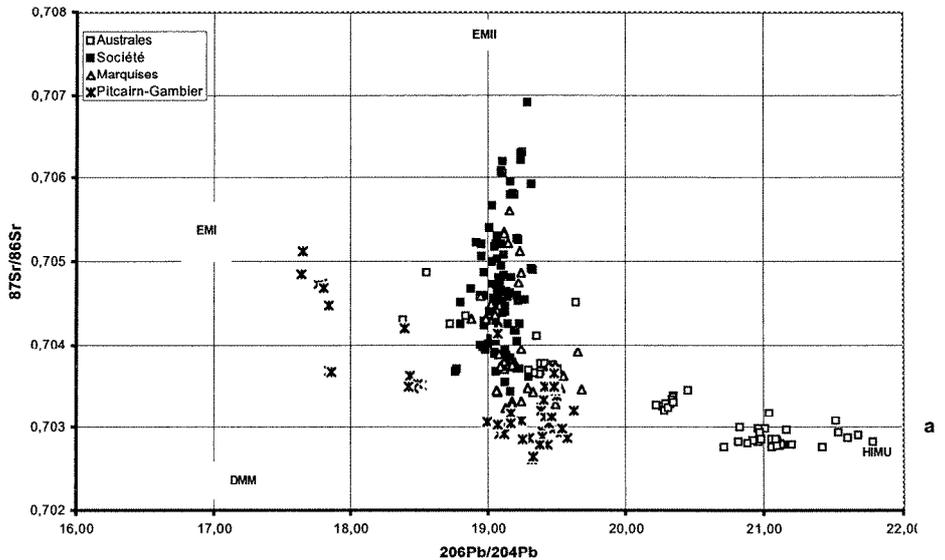


Fig. 11 - Diagramme isotopique Sr/Pb (a) et Nd/Sr (b) illustrant l'hétérogénéité des magmas intra-plaques polynésiens.

Fig. 11 - Sr/Pb (a) and Nd/Sr (b) isotope correlation plot for polynesian within-plate lavas.

ture géochimique des laves de la Société et des Marquises ;

- le pôle EMI diffère de EMII par des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ moins élevés, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ très bas et l'absence d'enrichissement en $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ par rapport à DMM. Ce pôle enrichi pourrait dériver de l'incorporation ancienne dans le manteau de matériaux de type sédiments pélagiques. Sa contribution est particulièrement bien illustrée par l'exemple de Pitcairn ;

- le dernier pôle enrichi, HIMU est caractérisé par des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ faibles, à peine supérieurs à ceux de DMM, et par contre des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ très élevés. Différentes hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine de ce pôle. Les plus en faveur actuellement font appel à la subduction ancienne (2 Ga dans le cas des Australes) de croûte océanique qui aurait : soit subi une forte altération hydrothermale lessivant préférentiellement le rubidium et fixant au contraire l'uranium ; soit perdu sélectivement du Rb et du Pb par rapport à Sr et U, respectivement, durant les processus de déshydratation et/ou de fusion partielle accompagnant la subduction.

Dès 1976, R.A. Duncan et V. Compston notaient une différence des rapports isotopiques du Sr entre les laves anciennes et les laves récentes de l'île de Rurutu (0,7031-0,7032 pour les laves récentes et de 0,7027-0,7030 pour les laves anciennes).

De nouvelles analyses (tabl. 3 et fig. 12) confirment ces différences significatives entre les deux phases de volcanisme (Chauvel *et al.*, 1997). Les laves anciennes mises en place il y a 12 Ma environ présentent des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variant

entre 0,70281 et 0,70300, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ entre 0,51288 et 0,51291 et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 20,82 et 21,08, systématiquement différents des résultats obtenus sur les laves récentes caractérisées par des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plus faibles (20,28 et 20,35) et par des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevés (entre 0,70320 et 0,70334).

Les laves anciennes caractérisées par de fortes valeurs des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et par un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement bas ont une signature isotopique de type HIMU (Zindler et Hart, 1986 ; Vidal *et al.*, 1984 ; Chauvel *et al.*, 1992) pratiquement pure (un peu moins extrême toutefois que celle des laves prélevées sur l'île de Mangaia ; Woodhead, 1996) alors que les laves récentes ont tendance à s'en éloigner sans toutefois atteindre le champ des autres îles de l'archipel (fig. 12).

Discussion

Rurutu au sein de l'archipel des Australes-Cook

Les datations réalisées sur les laves des différentes îles qui constituent l'archipel des Australes-Cook ne montrent pas, comme c'est le cas pour les autres archipels polynésiens, une progression d'âges systématique du sud-est vers le nord-ouest (fig. 5). En effet, dans un modèle simple de point chaud qui serait situé actuellement au niveau du volcan sous-marin Macdonald, certaines îles de l'archipel (Aitutaki, Atiu, Rarotonga et Mauke) sont trop jeunes alors que d'autres (Rurutu et Aitutaki) présentent deux épisodes d'acti-

tivité volcanique séparés par une longue période de repos.

Pour expliquer ces « anomalies » chronologiques, on peut envisager l'existence de trois points chauds indépendants qui auraient édifié trois successions d'îles. Le premier, situé au niveau du volcan sous-marin Macdonald, actif depuis au moins 18 Ma, aurait permis l'édification des îles de Mangaia, Rimatara, la phase ancienne de Rurutu, Tubuai, Raevavac, Rapa et les îlots de Marotiri. Le second serait à l'origine des îles de Aitutaki, Atiu, Mauke et de la partie récente de Rurutu. Actuellement inactif, on peut estimer sa position entre Rurutu et Tubuai. Le troisième enfin, dont le fonctionnement aurait réactivé l'île de Aitutaki et édifié Rarotonga, serait situé au sud-est de cette île. De ce fait et suivant la proposition de E. Bonatti et C.G.A. Harrison (1976), E. Bonatti *et al.* (1977) et D.L. Turner et R.D. Jarrard (1982), l'existence de ces trois points chauds peut être envisagée sur cet archipel au niveau d'une ligne chaude dont l'origine pourrait être de petites convections similaires à celles décrites par F. Richter (1973) et F. Richter et B. Parsons (1975).

Alternativement, on peut envisager l'existence d'un seul point chaud de grande taille qui aurait alimenté des venues magmatiques sur une distance de l'ordre de 2 200 km. La reprise du volcanisme loin du point chaud serait due à l'extraction de matériaux mantelliques chauds du sommet du panache, extraction facilitée par la déflexion de celui-ci dans la direction du mouvement de la plaque Pacifique. Ces fragments de panache migreraient sous l'alignement, transportés par les rouleaux convectifs longitudinaux de Richter. Leur fusion partielle interviendrait de façon aléatoire à la faveur de zones de flux ascendant séparant deux rouleaux adjacents (Diraison, 1991).

Le fonctionnement des sources magmatiques

La figure 12 présente une synthèse des données isotopiques obtenues sur les laves des îles de l'alignement des Australes-Cook dont l'édification est liée au fonctionnement des deux sources magmatiques qui ont participé à la construction de l'île de Rurutu.

Echantillon	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Volcanisme ancien					
RR 01	0,702857	0,512877	21,080	15,775	40,316
RR 03	0,702857	0,512884	20,982	15,751	40,194
RR 11	0,703003	0,512894	20,823	15,728	40,043
RR 16	0,702948	0,512900	20,971	15,742	40,168
RR 67	0,702807	0,512906	20,880	15,710	40,040
Volcanisme récent					
RR 05	0,703300	0,512897	20,294	15,673	39,757
RR 20b	0,703205	0,512946	20,285	15,671	39,758
RR 27	0,703252	0,512882	20,309	15,670	39,772
RR 28	0,703343	0,512908	20,340	15,673	39,748
RR 30	0,703309	0,512913	20,351	15,678	39,803
RR 59	0,703303	0,512918	20,350	15,680	39,820

Tabl. 3 - Compositions isotopiques des laves de Rurutu.
Table 3 - Isotopic composition of Rurutu lavas.

La première à l'origine des laves miocènes de Rurutu est située actuellement au niveau du volcan sous-marin Macdonald. On remarque que cette source est active depuis au moins 18 Ma (âge de l'île de Mangaia), qu'il existe une hétérogénéité isotopique des îles qui constituent cette succession et que par contre, il n'existe pas de corrélation entre les variations isotopiques et l'âge des îles. Cependant, on observe que le pôle HIMU, caractérisé par de fortes valeurs du rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et de faibles valeurs du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, se limite aux îles les plus vieilles de l'alignement (Mangaia, Rimatara, Rurutu ancien et Tubuai). Cette relative homogénéité isotopique de type HIMU a perduré pendant au moins 11 Ma (entre l'édification de Mangaia et celle de Tubuai) et le changement de signature isotopique qui affecte les îles les plus jeunes de l'alignement (Rapa, Marotiri et Macdonald) pourrait être intervenu vers 7 Ma lors de l'édification de l'île de Raevavae.

La seconde source qui a généré les laves pléistocènes de Rurutu est aussi à l'origine des îles de Aitutaki (laves anciennes), Atiu et Mauke (fig. 5). Cependant, si l'on prend en compte les valeurs des rapports isotopiques et les rapports d'éléments en traces, on constate que les laves récentes de Rurutu sont plus proches des laves anciennes de cette île que de celles d'Aitutaki, Atiu et Mauke (Chauvel *et al.*, 1997). Elles diffèrent notamment de ces dernières par des rapports isotopiques du Sr plus faibles et par des rapports isotopiques du Nd et du Pb plus élevés. Les particularités géochimiques du volcanisme quaternaire de Rurutu peuvent être expliquées par l'existence d'un composant de type carbonatite similaire à celui envisagé par Hauri *et al.*, (1993), qui aurait interagi avec la lithosphère océanique sous-jacente à l'île durant la première phase d'édification (12 Ma). Ce composant aurait été ensuite incorporé dans les liquides magmatiques issus de la deuxième phase volcanique (1 Ma), donnant ainsi aux laves récentes de Rurutu leurs caractéristiques géochimiques (Chauvel *et al.*, 1997).

Conditions de formation de l'île de Rurutu

L'activité volcanique sous-marine a débuté au Miocène moyen où les premières coulées se mirent en place sur une

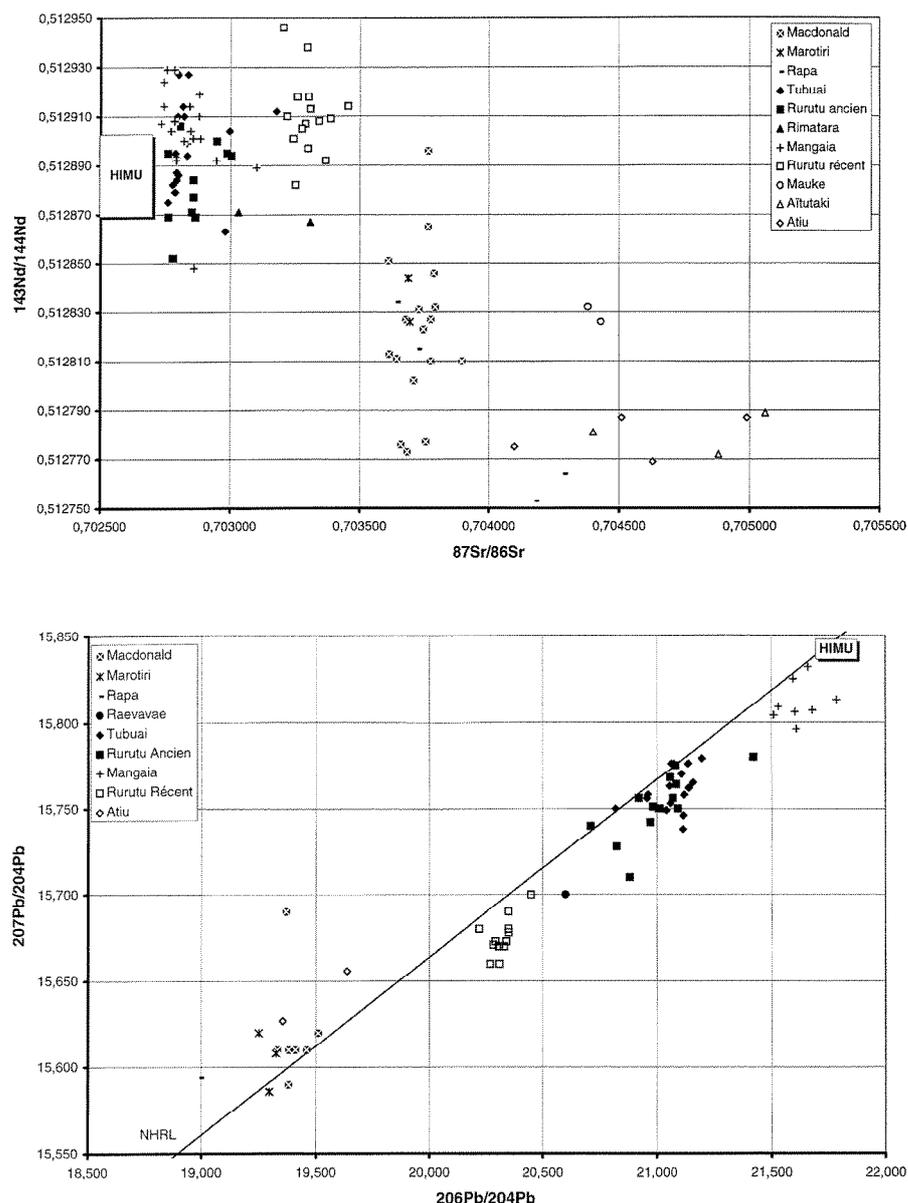


Fig. 12 - Variation des rapports isotopiques du strontium, du néodyme et du plomb des laves des îles de l'archipel des Australes-Cook.

Les données proviennent de : Vidal *et al.*, 1984 (Tubuai) ; Nakamura et Tatsumoto, 1988 (Rurutu récent, Timara, Mangaia, Mauke, Aitutaki, Atiu) ; Chauvel *et al.*, 1992 (Marotiri, Rapa, Tubuai, Rurutu) ; Hauri *et al.*, 1993 (Tubuai) ; Hemond *et al.*, 1994 (Macdonald) ; Woodhead, 1996 (Mangaia) ; Kogiso *et al.*, 1997 (Rurutu ancien) et ce travail (Rurutu).

NHRL = Northern Hemisphere Reference Line (Hart, 1984).

Fig. 12 - Sr-Nd-Pb isotopic ratios of lavas from the Austral-Cook archipelago islands.

Data from: Vidal *et al.*, 1984 (Tubuai) ; Nakamura and Tatsumoto, 1988 (récent Rurutu, Rimatara, Mangaia, Mauke, Aitutaki, Atiu) ; Chauvel *et al.*, 1992 (Marotiri, Rapa, Tubuai, Rurutu) ; Hauri *et al.*, 1993 (Tubuai) ; Hemond *et al.*, 1994 (Macdonald) ; Woodhead, 1996 (Mangaia) ; Kogiso *et al.*, 1997 (old Rurutu) ; this study (Rurutu).

NHRL = Northern Hemisphere Reference Line (Hart, 1984).

croûte océanique âgée de 70 Ma. Le volcan a émergé vers 12 Ma et l'activité aérienne de nature basaltique et hawaïenne s'est poursuivie jusque vers 10,5 Ma. Déconnectée du panache mantellique, l'alimentation magmatique de l'île cesse et l'édifice subit les effets de l'érosion et d'une subsidence à vitesse graduellement

décroissante. Au Miocène supérieur, entre 10,5 et 6,5 Ma d'après l'examen des microfossiles, s'est établie une sédimentation carbonatée fine sur la pente sous-marine peu inclinée entourant l'île.

L'édifice volcanique et sa ceinture carbonatée subissent ensuite un soulèvement qui précède la reprise des émissions

magmatiques du Pléistocène. En effet, en plusieurs endroits, les coulées et les projections récentes recouvrent partiellement les plateaux carbonatés entourant l'île.

Plusieurs hypothèses ont été émises quant aux causes de ce soulèvement : M.K. McNutt et H.W. Menard (1978) l'attribuaient à une déformation de la lithosphère à la suite du poids exercé par un édifice volcanique. Il n'y a, en fait, à proximité de Rurutu aucune île volcanique de taille suffisante ou d'âge approprié pour avoir pu provoquer le soulèvement observé uniquement par flexure lithosphérique. Si l'on excepte la possibilité d'un guyot de grande taille à proximité de Rurutu, ce qui apparaît assez peu probable (Lambeck et Coleman, 1982 ; Baudry *et al.*, 1987), le seul autre mécanisme plausible pouvant avoir provo-

qué le soulèvement de l'île est un rajeunissement thermique de la lithosphère (Calmant et Cazenave, 1986).

La présence au niveau zéro actuel (nord de la piste de l'aéroport) d'une coulée basaltique récente, autofragmentée au contact de l'eau de mer, indique qu'il y a environ 1,1 Ma la surrection de l'île s'était déjà produite et que le récif fossile était dans sa position actuelle.

D'après la position de la série d'encoches (+8/+10 m) datée de la dernière période interglaciaire (120 000 ans), on obtient une vitesse de surrection moyenne de l'ordre de 0,06 à 0,08 mm/an, selon les hypothèses sur la position du niveau de la mer à l'époque. A cette vitesse, le soulèvement des calcaires de Rurutu jusqu'à leur

altitude actuelle aurait nécessité entre 1 et 2 millions d'années. La dernière période d'épanchements magmatiques qui a culminé vers 1,1 Ma est donc directement associée à cette phase de surrection de l'île.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement Ph. Rossi pour sa participation aux travaux de terrain, J. Trichet pour la communication des résultats obtenus sur les échantillons manganifères, H.G. Barszczus, M. Bohn (analyses à la microsonde) et J. Cotten (analyses ICP-AES).

La rédaction finale de ce travail a bénéficié des commentaires constructifs de J.M. Liotard et de J. Varet.

Références

- Aubert de la Rue (1959) - Étude géologique et prospection minière de la Polynésie française. *Insp. Gén. Mines et Géol.*, Paris, 43 p.
- Baudry N., Diament M., Albouy Y. (1987) - Precise location of unsurveyed seamounts in the Austral archipelago area using SEASAT data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **89**, 869-888.
- Berger E.T. (1985) - Hétérogénéités pétrographiques du manteau sud-pacifique, sous l'archipel des Australes : mise en évidence et interprétation par l'étude des enclaves ultramafiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **1**, n° 2, 207-216.
- Bonatti E., Harrison C.G.A. (1976) - Hot line in the earth's mantle. *Nature*, **263**, 402-404.
- Bonatti E., Harrison C.G.A., Fisher D.E., Honnorez J., Schilling J.G., Stipp J.J., Zentilli M. (1977) - Eastern volcanic chain (Southern Pacific): a mantle hot line. *J. Geophys. Res.*, **82**, 2457-2478.
- Bourrouilh-Le-Jan F.G. (1984) - Un stade d'évolution entre une île haute volcanique et un atoll dit soulevé ou île carbonatée. Les faciès carbonatés de Rurutu (Archipel des Australes) : stratigraphie, sédimentologie, géochimie et diagénèse. Rapport interne EPHE, 27 p.
- 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.
- Calmant S., Cazenave A. (1986) - The effective elastic lithosphere under the Cook-Austral and Society islands. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **77**, 187-202.
- Chauvel C., Hofmann A., Vidal Ph. (1992) - HIMU-EM : The French Polynesia connection. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **110**, 99-119.
- Chauvel C., McDonough W., Guille G., Maury R.C., Duncan R.A. (1997) - Contrasting old and young volcanism in Rurutu island, Austral chain. *Chem. Geol.*, **139**, 125-143.
- Chubb L.J. (1927) - On the geology of the Austral islands (Southern Pacific). *Quaterl. J. Geol. Soc.*, **83**, n° 2, 291-316.
- Cotten J., Le Dez A., Bau M., Caroff M., Maury R.C., Dulski P., Fourcade S., Bohn M., Brousse R. (1995) - Origin of anomalous rare-earth element and yttrium enrichments in subaerially exposed basalts: evidence from french Polynesia. *Chem. Geol.*, **119**, 115-138.
- Dalrymple G.B., Jarrard R.D., Clague D.A. (1975) - K-Ar ages of some volcanic rocks from the Cook and Austral islands. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **86**, 1463-1467.
- Diraison C. (1991) - Le volcanisme aérien des archipels polynésiens de la Société, des Marquises et des Australes-Cook. Téphrostratigraphie, datation isotopique et géochimie comparées. Contribution à l'étude des origines du volcanisme intraplaque du Pacifique central. Thèse Doctorat, Univ. Bretagne Occidentale, Brest, 413 p.
- Duncan R.A., McDougall I. (1976) - Linear volcanism in French Polynesia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **1**, 197-227.
- Duncan R.A., Compston V. (1976) - Sr-isotope evidence for an old mantle source region for French Polynesian volcanism. *Geology*, **4**, 728-732.

- Emiliani C. (1978) - The cause of the ices ages. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **37**, 349-352.
- Gaven C., Bourrouilh-Le-Jan F.G. (1981) - Géochronologie (^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U) et sédimentologie des faciès récifaux pléistocènes à Maré, Archipel des Loyautés, SW Pacifique. 26^{ème} Congrès Inter. Paris, Res., **3**, 843.
- Guille G., Goutière G., Sornein J.F. (1993) - Les atolls de Mururoa et de Fangataufa (Polynésie française) I). Géologie-Pétrologie-Hydrogéologie (Edification et évolution des édifices). Masson Eds, 168 p.
- Hart S.R. (1984) - A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, **309**, 753-757.
- Hauri E. H., Shimizu N., Dieu J.J., Hart S.R. (1993) - Evidence for hotspot-related carbonatite metasomatism in the oceanic upper mantle. *Nature*, **365**, 221-227.
- Hemond C., Devey C.W., Chauvel C. (1994) - Source compositions and melting processes in the Society and Austral plumes (South Pacific ocean): element and isotope (Sr, Nd, Pb, Th) geochemistry. *Chem. Geol.*, **115**, 7-45.
- Hofmann A.W. (1988) - Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **90**, 297-314.
- Johnson R.H. (1970) - Active submarine volcanism in the Austral islands. *Science*, **167**, 977-979.
- Johnson R.H., Malahoff A. (1971) - Relation of Macdonald volcano to migration of volcanism along the Austral chain. *J. Geophys. Res.*, **76**, n° 14, 3282-3290.
- Juteau T., Maury R.C. (1997) - Géologie de la croûte océanique. Pétrologie et dynamisme endogène. Enseignement des Sciences de la Terre, Masson Éditeur, 367 p.
- Kogiso T., Tatsumi Y., Shimoda G., Barseczus H.G. (1997) - High μ (HIMU) ocean island basalts in southern Polynesia: new evidence for whole mantle scale recycling of subducted oceanic crust. *J. Geophys. Res.*, **102**, n° B4, 8085-8103.
- Krummacher D., Noetzelin J. (1966) - Datation d'échantillons de roches en provenance de Polynésie française. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **263**, (D), 20-21.
- Lambeck K., Coleman R. (1982) - A search for seamounts in the Southern Cook and Austral region. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, n°4, 389-392.
- Macdonald G.A., Katsura T. (1964) - Chemical composition of Hawaiian lavas. *J. Petrol.*, **5**, 82-133.
- Matsuda J.I., Notsu K., Okano J., Yaskawa K., Chungue L. (1984) - Geochemical implications from Sr isotopes and K-Ar age determinations for the Cook-Austral islands chain. *Tectonophysics*, **104**, 145-154.
- Maury R.C., El Azzouzi M., Bellon H., Liotard J.M., Guille G., Barseczus H.G., Chauvel C., Diraison C., Dupuy C., Vidal Ph., Brousse R. (1994) - Géologie et pétrologie de l'île de Tubuai (Australes, Polynésie française). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **318**, (2), 1341-1347.
- McDougall I., Duncan R.A. (1980) - Linear volcanic chains-Recording plate motions ? *Tectonophysics*, **63**, 275-295.
- McNutt M.K., Menard H.W. (1978) - Lithospheric flexure and uplifted atolls. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1206-1212.
- Montaggioni L.P. (1985) - Makatea island, Tuamotu archipelago. In: B. Delesalle, R. Galzin et B. Salvat (Eds). 5th Inter. Coral Reef Cong., Tahiti, 27 May-1 June 1985, 1 : « French Polynesian Coral Reefs », 103-158.
- Monti S., Pautot G. (1974) - Cartes bathymétriques du Pacifique Sud. Échelle 1/2 800 000, CNEXO/COB.
- Nakamura Y., Tatsumoto M. (1988) - Pb,Nd and Sr isotopic evidence for a multicomponent source for rocks of Cook-Austral islands and heterogeneities of mantle plumes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2909-2924.
- Obellianne J.M. (1955) - Contribution à l'étude géologique des établissements français de l'Océanie. Nancy, Sci. de la Terre, **3**, n° 3, 1-134.
- Palacz Z.A., Saunders A.D. (1986) - Couple trace element and isotope enrichment in the Cook-Austral-Samoa islands, southwest Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **79**, 270-280.
- Obellianne J.M. (1955) - Contribution à l'étude géologique des établissements français de l'Océanie. Nancy, Sci. de la Terre, **3**, n° 3, 1-134.
- Palacz Z.A., Saunders A.D. (1986) - Couple trace element and isotope enrichment in the Cook-Austral-Samoa islands, southwest Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **79**, 270-280.
- Pirazzoli P.A., Vecch H.H. (1987) - Age $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ d'une encoche émergée et vitesses de soulèvement quaternaire à Rurutu, îles Australes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, (2), **305**, 919-923.
- Pirazzoli P.A., Salvat B. (1992) - Ancient shorelines and quaternary vertical movements on Rurutu and Tubuai (Austral islands, French Polynesia). *Zeitschrift für geomorphologie*, **36**, 4, 431-451.
- Richter F. (1973) - Convection and large-scale circulation of mantle. *J. Geophys. Res.*, **78**, 8735-8745.
- Richter F., Parsons B. (1977) - The interaction of two scales of convection in the mantle. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2529-2541.
- Steiger R.H., Jäger E. (1977) - Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constant in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **36**, 359-362.

- Stoddart D. R., Spencer T. (1987) - Rurutu reconsidered: The development of Makatea topography in the Austral islands. *Atoll Res. Bull.*, **297**, 1-19.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) - Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (eds), *Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Turner D.L., Jarrard R.D. (1982) - K-Ar dating of the Cook-Austral island chain: a test of the hot-spot hypothesis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **12**, 187-220.
- Veeh (1966) - $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ages of Pleistocene high sea level stand. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3379.
- Vidal Ph., Chauvel C., Brousse R. (1984) - Large mantle heterogeneity beneath French Polynesia. *Nature*, **307**, 536-538.
- Vidal Ph., Rocaboy A., Dupuy C. (1989) - Composition du manteau : le réservoir HIMU. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **308**, (2), 635-639.
- White W.M., Patchett P.J. (1984) - Hf-Nd-Sr isotopes and incompatible element abundances in island arcs: implications for magma origins and crust-mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **67**, 167-185.
- Woodhead J.D. (1996) - Extreme HIMU in an oceanic setting: the geochemistry of Mangaia island (Polynesia), and temporal evolution of the Cook-Austral hotspot. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **72**, 1-19.
- Zindler A., Hart S. (1986) - Chemical Geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, **14**, 493-571.

Planche I

Les formations volcaniques *Volcanic formations*

Photo a - Réseau de dykes recoupant le volcanisme sous-marin.
Photo a - Network of dykes cutting the submarine volcanics.

Photo b - Coulée de lave en coussin sur dépôt de hyaloclastites litées.
Photo b - Pillow lava flow on top of stratified hyaloclastite deposit.

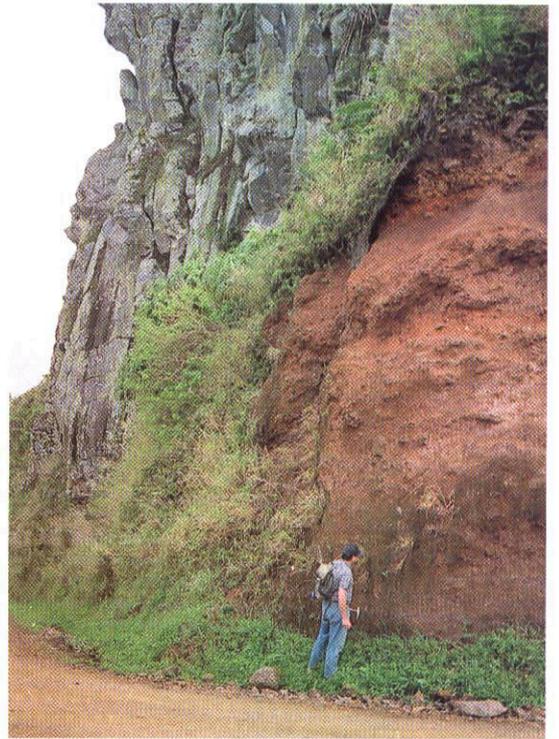
Photo c - Contact entre le volcanisme ancien (12 Ma) très altéré où l'on observe des squelettes de lave en coussin et une coulée de vallée du volcanisme récent (1,13 Ma).
Photo c - Contact between highly weathered older volcanics (12 Ma) containing skeletal pillow lava structures and a young flow of valley lava (1.13 Ma).

Photo d - Contact entre le plateau carbonaté et les projections hydromagmatiques du maar de Naairoa.
Photo d - Contact between the carbonate platform and phreatomagmatic ejecta from the Naairoa maar.

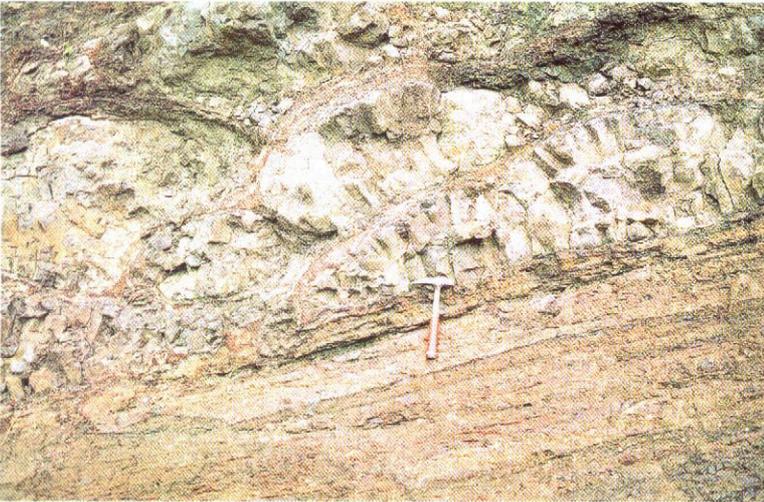
Photo e - Projections hydromagmatiques de Naairoa.
Photo e - Phreatomagmatic ejecta from the Naairoa maar.



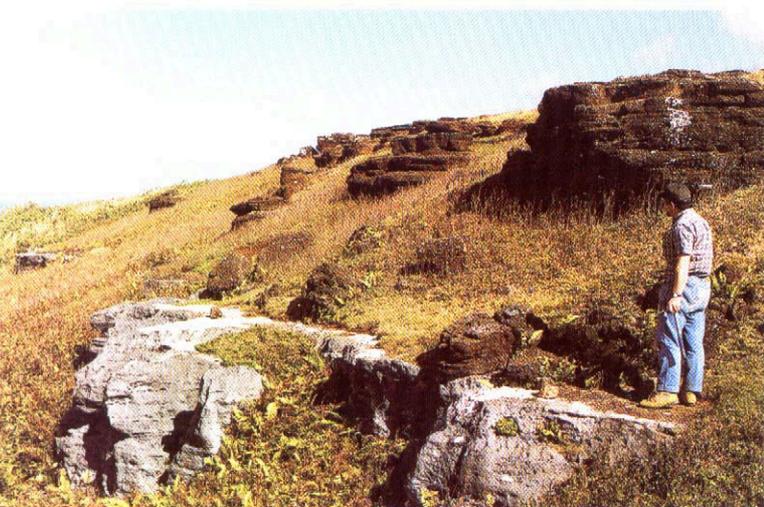
a



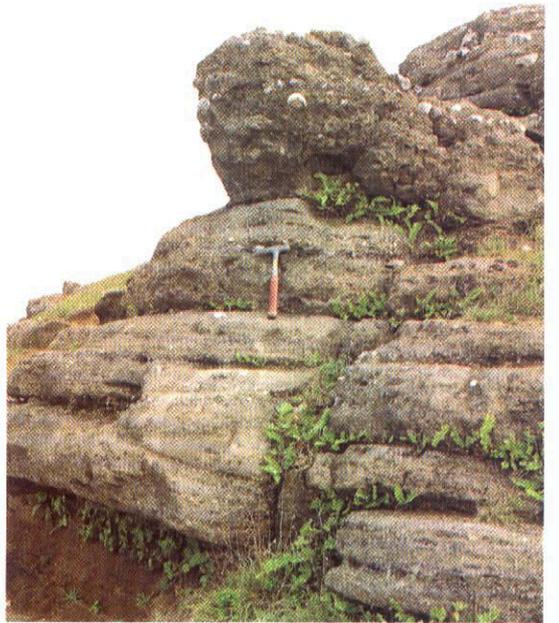
c



b



d



e

Planche II

Les formations carbonatées *Carbonate formations*

Photo a - Vue générale de l'île de Rurutu avec les falaises carbonatées périphériques.
Photo a - General view of Rurutu island with rimming carbonate cliffs.

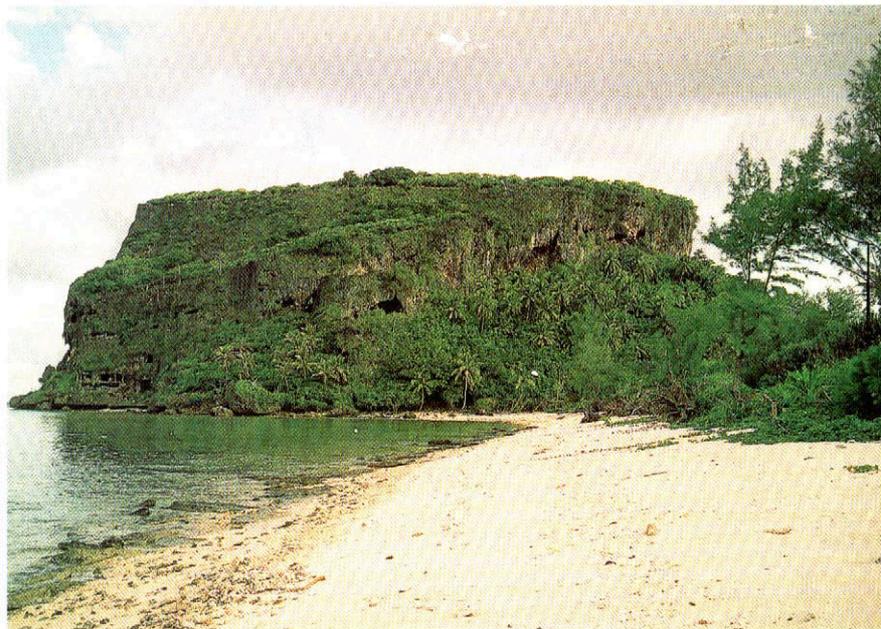
Photo b - Plateau carbonaté surélevé de Toarutu sur la côte est de l'île. On observe un léger pendage vers l'océan et les alignements d'encoches.
Photo b - Uplifted carbonate platform (Toarutu cap) on the eastern coast of Rurutu. Note the shallow dip towards the ocean and the alignment of benches.

Photo c - Secteur de Paparai à l'est de l'île avec des falaises carbonatées donnant vers l'intérieur de l'île.
Photo c - Area around Paparai in the eastern part of the island, with carbonate cliffs overlooking the interior.

Photo d - Encoche + 8 m avec stalactites dans le plateau carbonaté.
Photo d - + 8 m bench with stalagmites from the overhanging carbonate platform.



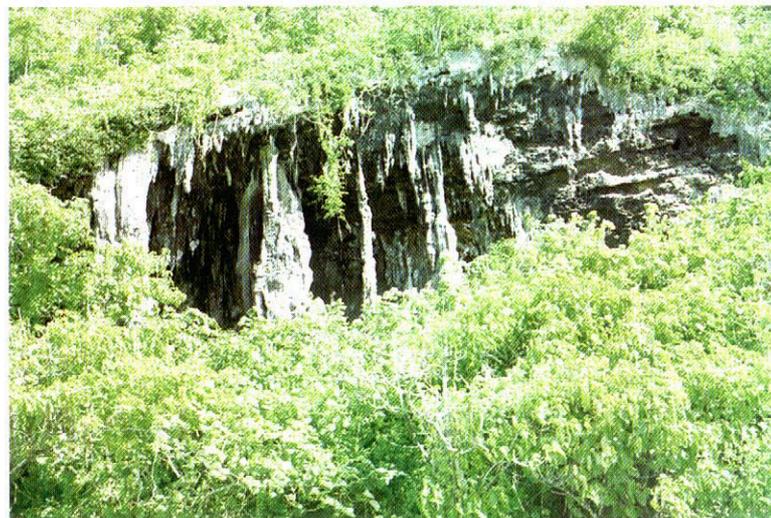
a



b



c



d