

Hétérogénéités du manteau et origine des basaltes des Marquises (Polynésie)

par PHILIPPE VIDAL *, CLAUDE DUPUY **, HANS G. BARSCZUS **,* et CATHERINE CHAUVEL ****

Mots clés. — Manteau, Hétérogénéités, Isotopes, Éléments traces, Volcanisme intraplaques. Polynésie, Marquises.

Résumé. — Dans une première partie, l'on fait le point des connaissances sur les hétérogénéités isotopiques du manteau ainsi que sur les processus qui les ont engendrées. Dans une deuxième partie, la genèse des basaltes des Marquises est abordée par l'étude conjointe des isotopes (strontium, néodyme et plomb) et des traces. Les caractéristiques géochimiques des basaltes sont corrélées à leur type pétrographique et suggèrent un modèle d'interaction de magmas d'origine profonde, marqué de façon variable par un manteau enrichi et un manteau de type Sainte-Hélène - Tubuai, avec le manteau supérieur appauvri. La contribution de celui-ci est prépondérante. Enfin, les caractéristiques géochimiques très différentes entre les Marquises et Hawaii indiquent qu'il n'existe pas un modèle unique pour la genèse du volcanisme intraplaque océanique.

Mantle heterogeneities and origin of basalts from Marquesas (Polynesia)

Abstract. — The first part of this article presents a review of the mantle isotopic heterogeneities and includes the current ideas concerning processes responsible for their development. In the second part, the problem of basalt genesis from the Marquesas Archipelago is addressed using both isotopes (Sr, Nd and Pb) and trace elements. The basalt geochemical characteristics are correlated with the petrographic type and support a model of interaction between magmas of deep origin, variably marked by an enriched mantle and Saint Helen - Tubuai mantle type, with the depleted upper mantle. The contribution of the upper mantle is dominating. The very large geochemical difference between Marquesas and Hawaii basalts indicate that there is not an unique model for the genesis of oceanic intraplate volcanism.

INTRODUCTION.

Cet article poursuit un double but :

1) présenter brièvement l'état actuel des connaissances sur les hétérogénéités isotopiques du manteau et montrer l'intérêt de la géochimie isotopique pour une meilleure compréhension de la composition et de l'évolution du manteau ;

2) étudier à travers l'exemple de l'archipel des Marquises, les hétérogénéités à une échelle plus restreinte, et, en y associant la géochimie des éléments en trace, discuter les mécanismes mis en jeu dans la genèse des basaltes et en particulier les relations entre les différents types magmatiques observés.

En domaine intraplaque, la zone la mieux documentée à cet égard est l'archipel d'Hawaii. Les Marquises, dont les études préliminaires indiquent de très fortes hétérogénéités des sources des points de vue des isotopes radiogéniques et des traces, devraient permettre de vérifier si le modèle proposé pour Hawaii a une portée générale.

a) la fusion partielle et la cristallisation fractionnée ne fractionnent pas les isotopes, qui fournissent donc des informations directes sur les hétérogénéités du manteau ¹ ;

b) un rapport isotopique est fonction de la composition chimique des divers environnements dans lesquels les éléments impliqués ont évolué depuis la formation de la Terre. Ces informations procurées par les isotopes radiogéniques seront donc instructives de la composition et éventuellement des variations de composition des sources au cours du temps.

2) Les données.

Les gammes de rapports isotopiques observées sont reportées d'une façon simplifiée dans le tableau I.

Gast *et al.* [1964] ont été les premiers à montrer que les îles océaniques pouvaient posséder des rapports isotopiques différents. Tatsumoto [1966] a prouvé ensuite que les basaltes tholeiitiques des dorsales (MORB) étaient moins radiogéniques vis-à-vis du strontium et du plomb que les basaltes des îles océaniques (OIB). Il est maintenant bien établi [par ex. Hofmann et Hart, 1978] que les MORB sont isotopiquement extrêmement homogènes et possèdent

I. — LES HÉTÉROGÉNÉITÉS ISOTOPIQUES DU MANTEAU : RAPPEL.

1) Spécificité de l'approche isotopique.

L'intérêt des isotopes radiogéniques dans l'étude des roches issues du manteau tient pour l'essentiel aux deux points suivants :

* UA 10 CNRS et Université, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand.

** Centre géologique et géophysique CNRS et USTL, 34060 Montpellier.

*** Centre ORSTOM de Papeete/Tahiti, Polynésie Française.

**** Max Planck Inst., Postfach 3060, 6500 Mainz (RFA).

Note présentée à la séance des 20-21 mai 1985, déposée le 15 novembre 1985, manuscrit définitif accepté le 8 décembre 1986.

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

N° : 23887 ex 1

Cote : B23887 97

Date 870824

	Rides médio-océaniques (MORB)	îles océaniques (OIB)
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.7023 - 0.7035	0.7028 - 0.707
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.5129 - 0.5133	0.5124 - 0.5131
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	17.8 - 18.8	18 - 21
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.40 - 15.55	15.45 - 15.80
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	37 - 38	37.5 - 40

TABL. I. — Rappports isotopiques des îles et dorsales médio-océaniques.

TABL. I. — Ranges of isotopic compositions for OIB and MORB.

en outre les teneurs en éléments incompatibles les plus faibles.

Les OIB présentent au contraire des gammes de rapports isotopiques d'une part plus variables et qui, d'autre part, impliquent des régions sources ayant évolué avec des teneurs en éléments incompatibles beaucoup plus fortes que celles des MORB.

3) Modèle à deux pôles.

Des calculs simples permettent de montrer que la création de différences de rapports isotopiques aussi considérables entre sources des MORB et des OIB exige que celles-ci aient été séparées les unes des autres depuis 1 à 2 milliards d'années, quel que soit le couple radioactif-radiogénique considéré.

Le modèle le plus simple [Schilling, 1973] est donc celui d'un manteau stratifié verticalement et composé de deux réservoirs :

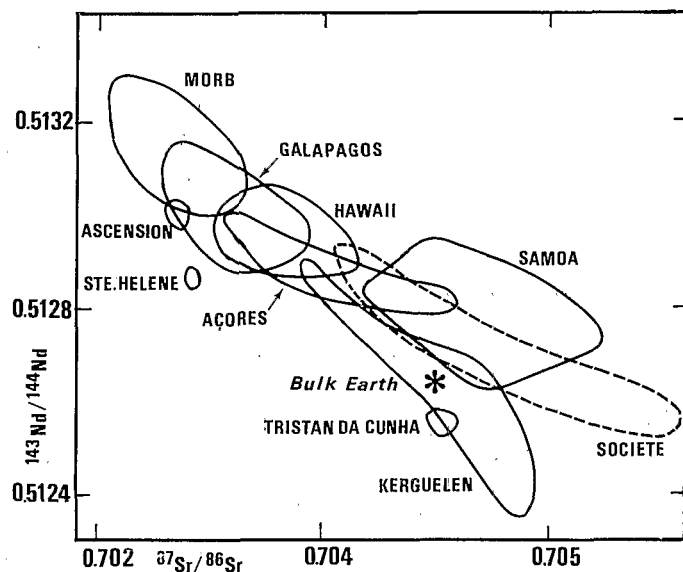
— manteau supérieur appauvri en éléments incompatibles ;

— manteau profond vierge, voire même enrichi en éléments incompatibles.

Les données du néodyme paraissent être en accord avec ce modèle à deux réservoirs : dans le diagramme $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = f(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ de la figure 1, les MORB et OIB s'ordonnent suivant un alignement qualifié de mantellique, ou « mantle array » [De Paolo et Wasserburg, 1976 ; Richard *et al.*, 1976 ; O'Nions *et al.*, 1977].

La localisation des différentes îles le long du « mantle array » peut recevoir deux explications (1) appauvrissement variable : le pôle le plus radiogénique vis-à-vis des isotopes du strontium et le moins radiogénique vis-à-vis des isotopes du néodyme correspond aux Kerguelen [Dosso *et al.*, 1979 ; Dosso et Murthy, 1980]. Le pôle « Kerguelen » peut correspondre à un manteau primitif (« primitive mantle » ou PM) (2) mélange : il est vraisemblable que les diapirs mantelliques d'origine profonde, et les magmas qui en résultent subissent des contaminations sensibles au cours de leur traversée du manteau supérieur [Schilling, 1973 ; Langmuir *et al.*, 1978 ; Boivin, 1982 ; Dupré, 1983 ;

Bull. Soc. géol. Fr., 1987, n° 4

FIG. 1. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = f(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ dans les MORB et les basaltes des îles océaniques.FIG. 1. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in MORB and oceanic island basalts.

Allègre *et al.*, 1984 ; Hamelin *et al.*, 1984]. Dans ce cas, l'alignement mantellique peut correspondre à un mélange en proportions variables entre des matériaux issus d'un manteau primitif et les régions sources des MORB.

Ces deux modèles ne sont pas exclusifs l'un de l'autre, puisque les matériaux issus d'un manteau profond isotopiquement hétérogène du fait de différenciations anciennes, peuvent être affectés par des mélanges au cours de leur ascension à travers le manteau supérieur.

4) Modèle à au moins trois pôles.

L'utilisation des isotopes du plomb conjointement à ceux du strontium et du néodyme introduit une complexité supplémentaire puisqu'ils impliquent l'existence d'un troisième pôle. Ceci est visible sur la figure 2, modifiée de Zindler *et al.* [1982], où, dans un souci de clarté, les moyennes par île sont représentées. Les diagrammes $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = f(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = f(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ ne font plus apparaître des alignements mais au contraire des champs grossièrement triangulaires. Il est donc évident que le manteau profond est composé d'au moins deux pôles, dont le premier est représenté par les Kerguelen et le deuxième est caractérisé par des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'ordre de 0,7028 et des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de l'ordre de 21 et n'est actuellement reconnu qu'à Sainte-Hélène et Tubuai [Vidal *et al.*, 1984]. Les basaltes de ces deux îles sont d'ailleurs situés à gauche du « mantle array » (fig. 1), ce qui confirme le caractère singulier de leurs régions sources. Ce même diagramme suggère l'existence d'un quatrième pôle représenté par les îles Samoa et dans une moindre mesure par les îles de la Société [White et Hofmann, 1982]. L'existence d'un quatrième pôle a d'ailleurs été avancée

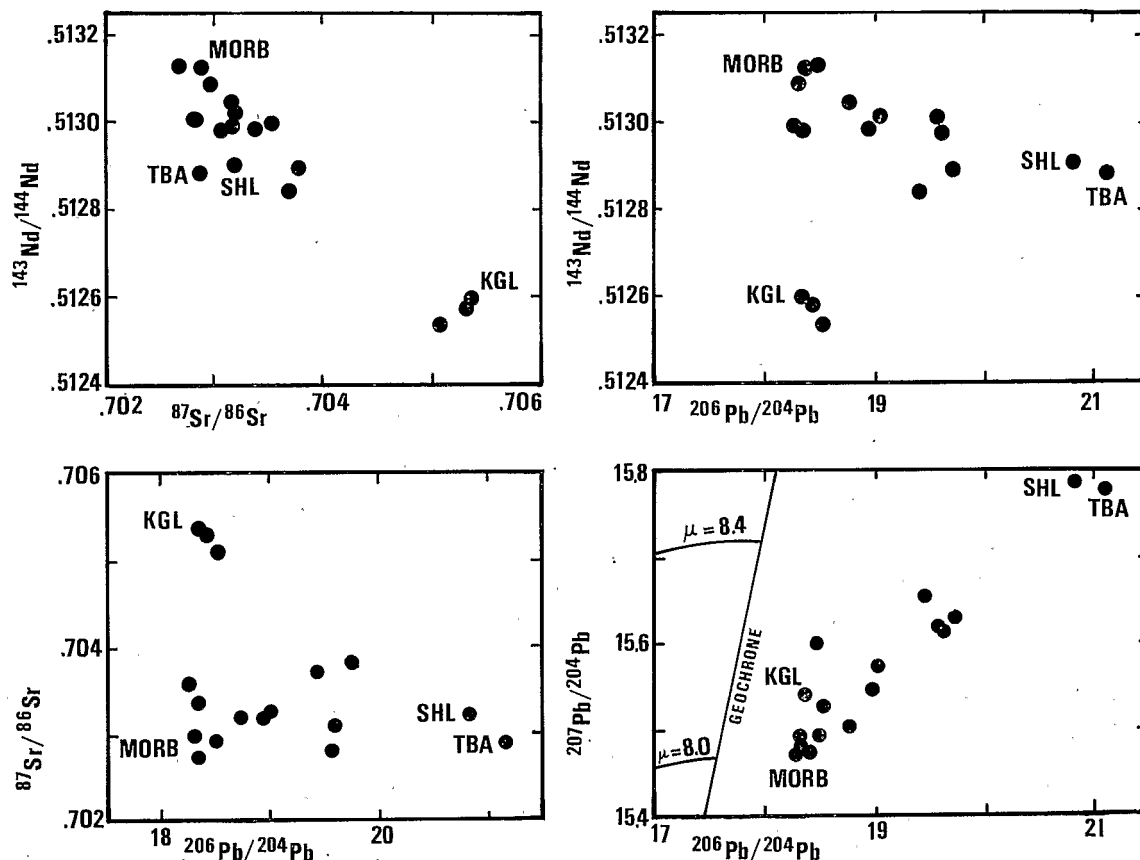


FIG. 2. — Relations entre les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ [d'après Zindler *et al.*, 1982].

Deux courbes d'évolution du plomb terrestre correspondant à des μ ($\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) de 8 et 8,4 sont reportées. La disposition des points à droite de la géochrone (isochrone des météorites) indique que les sources mantelliques ne se sont pas comportées en système clos depuis la formation de la Terre mais ont subi une augmentation de leur μ . — TBA : Tubuai ; SHL : Sainte-Hélène ; KGL : Kerguelen.

FIG. 2. — Relationship between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios (according to Zindler *et al.*, 1982).

Two lead terrestrial evolution curves with μ ($\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) of 8 and 8.4 are reported. The location of the data points to the right of the geochron (meteorite isochrone) indicates that the mantle sources did not behave as closed systems since the Earth formation but experienced an increase of their μ . — TBA : Tubuai ; SHL : Saint Helen ; KGL : Kerguelen.

par Zindler *et al.* [1982] : dans une représentation tri-dimensionnelle ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), les îles et les dorsales océaniques définissent grossièrement un plan (« mantle plane »), ce qui est en accord avec un mélange à trois composants. Les légers écarts à ce plan sont attribués par ces auteurs à l'intervention d'un quatrième composant. Les données isotopiques les plus récentes [Allègre *et al.*, 1986 ; Zindler *et al.*, 1986] confirment la nécessité d'un quatrième réservoir, et même d'un cinquième si l'on tient compte des données de l'hélium.

5) Origines des hétérogénéités du manteau profond.

La corrélation négative entre isotopes du néodyme et du strontium trouve son explication dans le comportement inverse des rapports Rb/Sr et Sm/Nd au cours des fractionnements minéraux. De la même façon, la corrélation positive entre rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ et $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ [Patchett et Tatsumoto, 1980] traduit les similitudes de

comportement des rapports correspondants Sm/Nd et Lu/Hf.

Le caractère réputé plus incompatible de l'uranium par rapport au plomb laissait prévoir une évolution dans le même sens des rapports U/Pb et Rb/Sr, et donc une corrélation positive entre rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Dupré et Allègre [1980] ont bien observé cette corrélation le long des rides médio-océaniques et l'ont interprétée comme un mélange entre matériaux d'origine profonde et le manteau supérieur. Cette observation n'est plus vraie à l'échelle des îles océaniques (fig. 2), puisque Tubuai va jusqu'à posséder les isotopes du strontium les moins radiogéniques et ceux du plomb les plus radiogéniques.

Parmi les hypothèses formulées pour rendre compte de cette anomalie, on peut citer (1) le transfert de plomb et de rubidium depuis le manteau inférieur jusqu'au noyau [Vidal et Dosso, 1978] ; (2) la réinjection de croûte océanique [Zindler *et al.*, 1982] à faible rapport Rb/Sr et forts rapports Sm/Nd et U/Pb. En fait, les valeurs de ces rapports

dans la croûte océanique subductée restent controversées : bien que Hart et Staudigel [1982] estiment que l'altération de la croûte océanique par l'eau de mer y augmente aussi bien les teneurs en rubidium que les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, les données récentes de Michard *et al.* [1984] et Michard et Albarède [1985] indiquent que la circulation hydrothermale dans la croûte océanique y lessive le rubidium et y fixe au contraire l'uranium. Si l'effet de l'altération hydrothermale est assez fort pour contrebalancer l'augmentation des rapports Rb/Sr due à l'addition de sédiments et à l'altération superficielle par l'eau de mer, le rapport Rb/Sr de la croûte océanique altérée pourrait alors être inférieur à sa valeur initiale, et en conjonction avec des rapports U/Pb plus élevés, rendre compte du pôle Sainte-Hélène ; (3) métasomatose : la circulation de fluides intramantelliques ou même de liquides magmatiques a été invoquée pour expliquer les répartitions des éléments en trace dans les basaltes alcalins [Bailey, 1982 ; Menzies et Murthy, 1980 a et b ; Chauvel et Jahn, 1984, Hawkesworth *et al.*, 1984] ainsi que la composition même des régions sources [Vollmer, 1983]. Barreiro [1983] a suggéré que la métasomatose en milieu carbonique, dans lequel le strontium et l'uranium seraient solubles au contraire du rubidium, pourrait générer des domaines à rapports Rb/Sr faibles et U/Pb élevés.

Le deuxième pôle, le pôle Kerguelen, pourrait représenter le manteau primitif. En fait, ses caractéristiques isotopiques témoignent d'un relatif enrichissement en éléments incompatibles [Dosso et Murthy, 1980] par rapport au manteau primitif chondritique (« bulk earth », voir fig. 1). Cet enrichissement peut avoir été causé par une migration préférentielle de rubidium et de terres rares légères sous forme de liquides silicatés ou de fluides riches en volatils. Mac Kenzie et O'Nions [1983], ont proposé au contraire que la réincorporation de fragments de lithosphère continentale détachés lors des orogènes par collision pouvait en être responsable. Enfin, la réinjection de sédiments à forts rapports Rb/Sr a été aussi invoquée, encore que ce processus soit plus approprié pour rendre compte des données sur Samoa [White et Hofmann, 1982]. Ce dernier processus vient d'être écarté par Hofmann *et al.* [1986] du fait de la constance du rapport Ce/Pb entre MORB et OIB ; ces auteurs estiment que la subduction de croûte océanique est finalement le processus majeur auquel l'on doit la création des hétérogénéités.

6) Conclusions

Les nombreuses données isotopiques de grande qualité obtenues depuis quelques années ont permis d'identifier plusieurs réservoirs dans le manteau et de fournir un début de cartographie planétaire des hétérogénéités isotopiques [Hedge, 1978 ; Vidal et Dosso, 1978 ; Dupré, 1983 ; Hart, 1984 ; Hamelin *et al.*, 1986] ; en particulier, un vaste domaine à forts rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, et faibles rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ a été reconnu dans l'hémisphère Sud et nommé DUPAL [Hart, 1984] en hommage à ses inventeurs [Dupré et Allègre, 1983]. Enfin, ces travaux ont été le support de modèles géodynamiques qui s'appuient sur l'existence et la persistance de ces hétérogénéités [Anderson, 1982 a et b ; Allègre, 1982 ; Davies, 1984 ; Jacobsen

et Wasserburg, 1981 ; O'Nions *et al.*, 1979 ; Loper, 1985 ; Sun et Hanson, 1975 ; Vollmer, 1983 ; Tatsumoto, 1978 ; Zindler et Hart, 1986].

Cependant, les processus même responsables de la création de ces hétérogénéités à très grande échelle ne sont pas encore totalement éclaircis. Des progrès dans ce domaine exigent entre autres une meilleure connaissance de la composition des différents composants de la lithosphère subductée, du comportement des éléments traces lors du mécanisme de subduction et dans les fluides à haute pression et à haute température et des progrès dans la connaissance de la convection dans le manteau.

Quelles que soient les incertitudes sur l'origine même des hétérogénéités, la Polynésie offre probablement dans ce domaine le meilleur terrain d'étude. En effet, les données existantes [Duncan et Compston, 1976 ; Hedge, 1978 ; White et Hofmann, 1982 ; Vidal *et al.*, 1984 ; Duncan *et al.*, 1986] ont déjà permis de montrer la présence de trois pôles mantelliques.

En outre, la gamme des hétérogénéités y est exceptionnelle [Vidal *et al.*, 1984 ; Duncan *et al.*, 1986] : ainsi, l'île de Nuku Hiva, dans l'archipel des Marquises, couvre la moitié du « mantle array » ; à l'échelle de trois îles des Marquises, l'intégralité du « mantle array » est quasiment atteinte. Enfin, la surface considérable de la Polynésie (2 200 000 km²) et le très grand nombre d'îles ainsi que leur répartition assez régulière offre la chance d'étudier les hétérogénéités à toutes les échelles.

II. — L'ARCHIPEL DES MARQUISES : DONNÉES ISOTOPIQUES ET INTERPRÉTATIONS.

1) Cadre géologique et état des connaissances.

L'archipel des Marquises (fig. 3) comprend une douzaine d'îles et de nombreux hauts-fonds qui constituent le sommet

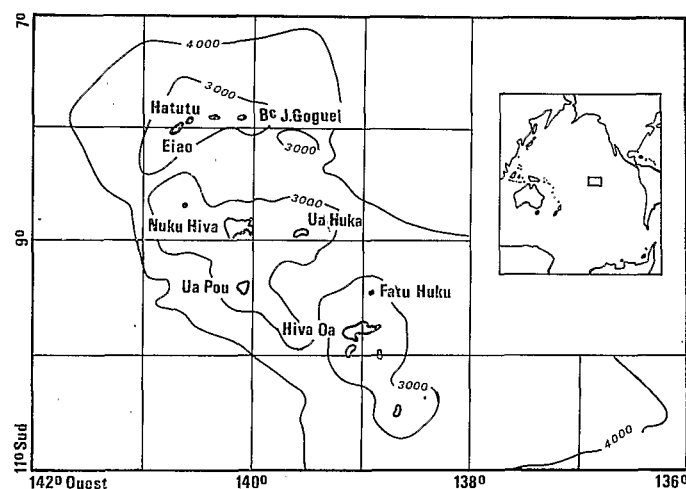


FIG. 3. — L'archipel des Marquises.
Seules les isobathes 3 000 et 4 000 m ont été figurées.

FIG. 3. — The Marquesas archipelago.
Only depth contours for 3 000 and 4 000 m have been figured.

de grands strato-volcans s'élevant à plus de 4 000 mètres au-dessus d'une croûte océanique paléocène. A l'exception d'Eiao (6,3 - 5,3 Ma) [Brousse et Bellon, 1974] l'âge des autres îles se situe selon Duncan et McDougall [1976] entre 3,8 Ma à Nuku Hiva et 1,3 Ma à Fatu Hiva. Ces âges tendent à décroître dans une direction sud-est et suggèrent une migration de l'activité volcanique de 9,9 cm/an⁻¹.

Les roches volcaniques qui composent cet archipel ont été décrites par plusieurs auteurs [Maury, 1976 ; Brousse, 1978 ; Brousse *et al.*, 1978 a et b ; Brousse et Servin, 1978]. Le type pétrographique dominant est représenté par un basalte à olivine avec des quantités subordonnées mais variables de roches différenciées (trachybasaltes, trachytes et phonolites). Les données sur les éléments majeurs permettent de classer les basaltes de l'archipel en trois catégories : basanites, basaltes transitionnels et tholéiites à olivine. Toutes ces roches ont des valeurs du rapport Mg/(Mg + Fe⁺²) comprises entre .78 et .39 indiquant un fractionnement basse pression. Ce fractionnement est dominé par la précipitation de l'olivine et de clinopyroxène.

L'étude des éléments en traces [Liotard *et al.*, 1986] suggère une source hétérogène au niveau de l'archipel. Dans la plupart des cas, cette source est enrichie en éléments incompatibles avec les rapports La/Yb, Ti/V, P/Ce... supérieurs aux valeurs enregistrées dans les chondrites. A l'inverse, certaines laves comprenant les tholéiites de Ua Pou ou les basaltes alcalins de Hiva Oa, dériveraient d'un manteau supérieur relativement appauvri en ces mêmes éléments.

2) Données isotopiques.

Les données disponibles des points de vue des isotopes du strontium et du néodyme [Vidal *et al.*, 1984 ; Dupuy *et al.*, 1987] sont reportées dans le tableau II et les figures 4 et 5. Elles appellent les remarques suivantes.

a) La très grande hétérogénéité du manteau sous-jacent, autant à l'échelle de l'archipel qu'à celle d'une île est confirmée. Ainsi, l'important degré d'hétérogénéité observé à Nuku Hiva est-il retrouvé, même amplifié, à l'échelle d'Ua Pou.

b) Le champ des Marquises est légèrement oblique par rapport au « mantle array » (fig. 4).

c) Les rapports isotopiques sont corrélés, à l'intérieur d'une même île, au type pétrographique. Ainsi, vis-à-vis du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, les basaltes alcalins sont-ils plus radiogéniques que les tholéiites, les basaltes transitionnels occupant une position intermédiaire. C'est la relation inverse qui est observée à Hawaii [Roden *et al.*, 1984].

d) Les basaltes tholéiitiques d'Ua Pou sont situés en dehors du « mantle array » ; ils sont assez proches de Sainte-Hélène et de Tubuai. Les données des isotopes du plomb (tabl. III et fig. 5) indiquent cependant que leurs régions sources ont subi une augmentation récente de leurs rapports U/Pb alors que celle-ci est plus ancienne pour Sainte-Hélène-Tubuai [Dupuy *et al.*, 1987]. La présence locale d'un manteau du type Sainte-Hélène - Tubuai est donc probable à l'aplomb d'Ua Pou.

Îles	Réf/Type	Sr ppm	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Nd ppm	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd
Eiao	EAO-03 TH	420	0.70411	26.7	0.512890
	EAO-11 TH	491	0.70406	34.2	0.512925
Hatutu	HTT-01 AL	455	0.70472	33.4	0.512806
	HTT-05 TR	423	0.70433	30.1	0.512867
	HTT-19 TR	335	0.70448	24.6	0.512859
Bc. J. Goguel	BJG-06 AL	1180	<0.7062	39.3	0.512772
	BJG-08 AL	1890	<0.7070	38.6	0.512820
Nuku Hiva	NH 77B TR	587	0.70438	43.9	0.512810
	NH 78A TH*	435	0.70378	30.9	0.512889
	NH 77T TR*	559	0.70422	46.0	0.512848
Ua Pou	UAP-03 AL	972	0.70483	61.5	0.512749
	UAP-11 TH	548	0.70288	43.3	0.512919
	UAP-17 TH	434	0.70293	40.3	0.512921
	UAP-24 TH	610	0.70318	57.9	0.512904
	UAP-26 AL	910	0.70499	60.7	0.512718
	UP 73F AL*	539	0.70512	29.9	0.512710
	UP 74H AL*	1360	0.70522	71.6	0.512724
Ua Huka	UH 67H TR*	646	0.70458		0.512750
	UH 68F2AL*	473	0.70561	29.2	0.512741
Fatu Huku	FTK-04 TR	416	0.70501	28.2	0.512809
	FTK-09 TR	577	0.70546	40.5	0.512781
	FTK-13 TR	794	0.70427	39.4	0.512901
Hiva Oa	HVO-01 AL	595	0.70475	40.4	0.512780
	HVO-07 TR	399	0.70491	26.5	0.512813
	HVO-27 AL	594	0.70483	38.6	0.512834

TABLE II. — Rapports isotopiques du strontium et du néodyme des basaltes des Marquises. * : Vidal *et al.* [1984].

Les échantillons du banc Jean Goguel ont été altérés par l'eau de mer. Les données reportées ont été obtenues après un lessivage par HCl 2 N pendant 30 mn. — TH : tholéiites, TR : basaltes transitionnels, AL : basaltes alcalins.

TABLE II. — Strontium and neodymium isotopic compositions from Marquesas basalts. * : Vidal *et al.* [1984].

Samples from Jean Goguel seamount have been altered by seawater. The data reported have been obtained after leaching in 2 N HCl for 30 mn. — TH : tholeiites, TR : transitional basalts, AL : alkali basalts.

Réf./Type	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Pb	μ	Ce/Pb
UAP-11 TH	19.858	15.540	39.394	1.8	28	38
	19.858	15.532	39.373			
UAP-17 TH	19.993	15.564	39.662	1.3	15	47
	19.963	15.554	39.576			
UAP-24 TH	19.608	15.548	39.204	1.0	37	78
	19.626	15.558	39.173			
UP-73F* AL	19.23	15.62	39.23	3.3		23
UP-74H AL	19.228	15.635	39.260	6.7		28

TABLE III. — Rapports isotopiques du plomb dans l'île d'Ua Pou. * : Vidal *et al.* [1984].

TABLE III. — Lead isotopic compositions in Ua Pou island. * : Vidal *et al.* [1984].

L'analogie isotopique s'étend également à la répartition des éléments traces. Ces derniers sont caractérisés par un enrichissement relatif en éléments tels que le hafnium et le niobium et un appauvrissement relatif en alcalins, alcalino-terreux, plomb. Par exemple, le rapport Ce/Pb y est beaucoup plus fort (tabl. III) que la moyenne de 25 ± 5 observée

FIG. 4. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = f(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ dans les basaltes des Marquises.

Carrés vides : Eiao ; carrés pleins : Hatutu ; cercles vides : Nuku Hiva ; cercles pleins : Ua Pou ; triangles vides : Fatu Huku ; triangles pleins : Hiva Oa ; étoile pleine : Ua Huka.

FIG. 4. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ in Marquesas basalts.

Open squares : Eiao ; solid squares : Hatutu ; open circles : Nuku Hiva ; solid circles : Ua Pou ; open triangles : Fatu Huku ; solid triangles : Hiva Oa ; solid stars : Ua Huka.

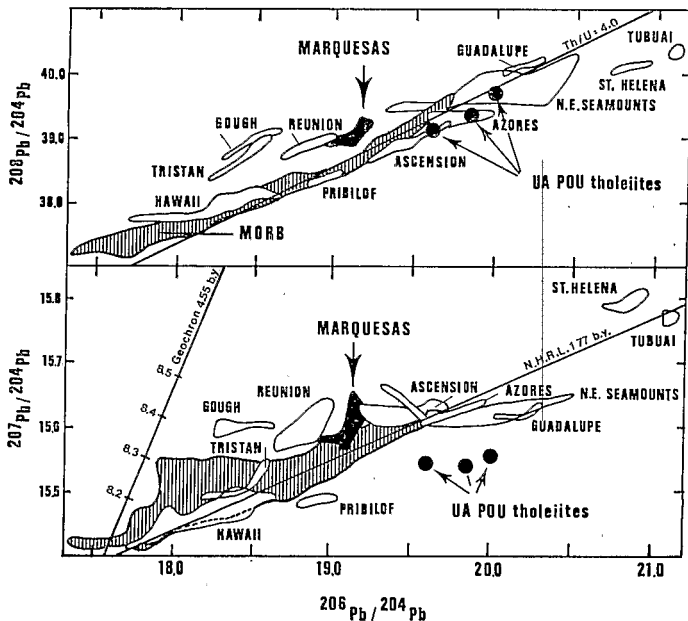
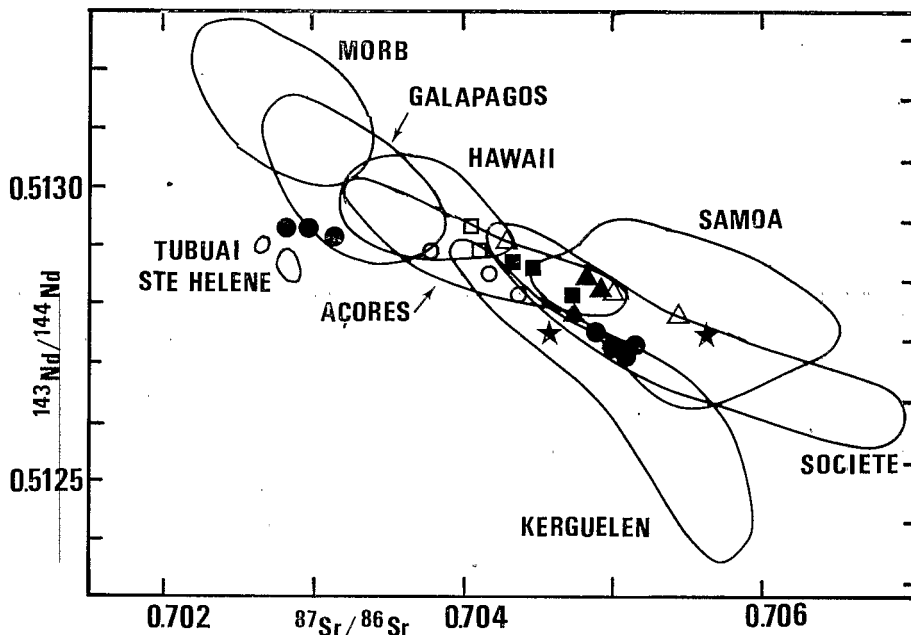


FIG. 5. — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = f(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ dans les basaltes des Marquises.

N.H.R.L. : droite de régression de l'hémisphère Nord.

FIG. 5. — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for Marquesas basalts.

N.H.R.L. : North hemisphere regression line.

dans les MORB et basaltes des îles océaniques [Hofmann *et al.*, 1986]. Ces résultats ont été utilisés récemment [Dupuy *et al.*, 1987] pour proposer que ce pôle correspond à la lithosphère subductée après extraction de liquides ayant la composition des tholéiites d'arc.

3) Corrélations entre les rapports isotopiques et les éléments en trace.

Une corrélation entre les rapports isotopiques et les rapports ou les concentrations des éléments en trace a été décrite dans les basaltes océaniques [Dupré et Allègre, 1980 ; Le Roex *et al.*, 1983 ; Zindler *et al.*, 1979 et 1984 ; Schilling *et al.*, 1983 ; Langmuir *et al.*, 1978 ; Schilling, 1973 ; Sun et Jahn, 1975] et dans les basaltes des îles Hawaii [Chen et Frey, 1983 ; Roden *et al.*, 1984 ; Stille *et al.*, 1983]. De telles relations apparaissent aussi dans l'archipel des Marquises : le rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ est positivement corrélé avec les rapports Sm/Nd, Nb/La, Zr/Nb, K/Rb, K/Ba et négativement corrélé avec La/Yb, Rb/Sr, La/Ce, Th/La (quelques exemples sont donnés sur la figure 6).

Ces relations suggèrent les commentaires suivants :

— la corrélation apparaît avec des rapports tel que Ba/La ou K/Rb qui sont peu ou pas sensibles au fractionnement minéral. Elle apparaît aussi avec des rapports faisant intervenir des éléments dont le degré d'incompatibilité est variable. Dans ce cas, la corrélation est positive ou négative selon que l'élément le plus compatible se trouve au numérateur (par exemple Zr/Nb) ou au dénominateur (La/Yb) ;

— les corrélations résultent des différences de compositions entre les trois types magmatiques rencontrés ; les tholéiites et les basaltes alcalins représentent les termes extrêmes alors que les basaltes transitionnels occupent une position intermédiaire. Les corrélations peuvent apparaître aussi au sein d'un même type magmatique. C'est particulièrement vrai pour les basaltes alcalins lorsque l'on se réfère au diagramme $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. K/Rb. Cette corrélation indique que les valeurs très faibles du K/Rb dans les basaltes alcalins de Ua Pou ne reflètent pas un

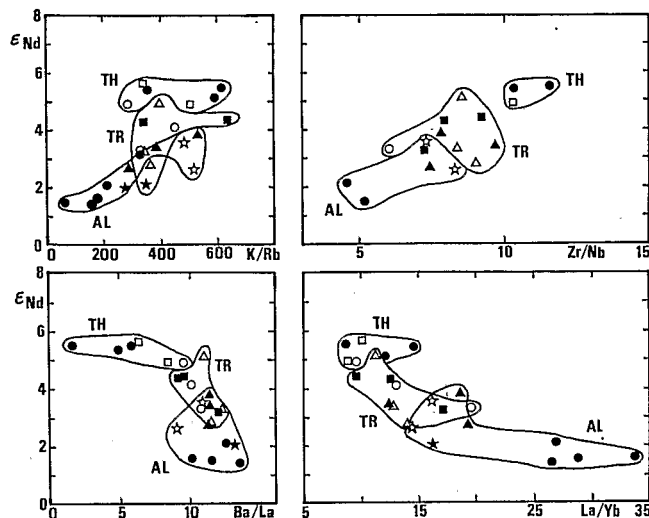


FIG. 6. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ en fonction de rapports d'éléments traces dans les basaltes des Marquises. Symboles comme dans la figure 4. L'étoile vide représente le banc Jean Goguel. — TH : tholéiites, TR : basaltes transitionnels, AL : basaltes alcalins.

Le symbole ϵ_{Nd} est une quantification commode des différences de compositions entre les régions sources des basaltes et les météorites chondritiques, dont le rapport Sm/Nd est supposé représenter celui de la « bulk earth » [De Paolo et Wasserburg, 1976] :

$$\epsilon_{\text{Nd}} = \left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \text{ mesuré}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \text{ CHUR}} - 1 \right) \times 10^4$$

où CHUR signifie « chondritic uniform reservoir ». Un ϵ positif correspond à un manteau appauvri en éléments incompatibles, un ϵ négatif à un manteau enrichi.

FIG. 6. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ as a function of trace element ratios in basalts from Marquesas. Symbols as in figure 4. The open stars represent Banc Jean Goguel. — TH : tholeiites, TR : transitional basalts, AL : alkali-basalts.

The symbol ϵ_{Nd} is a convenient way of estimating the compositional differences between basalts source regions and chondritic meteorites, whose Sm/Nd ratio is supposed to represent that of the bulk earth [De Paolo and Wasserburg, 1976] :

$$\epsilon_{\text{Nd}} = \left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \text{ measured}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \text{ CHUR}} - 1 \right) \times 10^4$$

where CHUR stands for « Chondritic Uniform Reservoir ». A positive ϵ corresponds to a mantle depleted in incompatible element, a negative ϵ to an enriched mantle.

processus secondaire d'altération mais traduisent probablement des rapports faibles de la source. Des valeurs aussi faibles sont exceptionnelles et caractéristiques des roches crustales évoluées [Shaw, 1968], les sédiments marins [White et al., 1985] et exceptionnellement des kimberlites [Fesq et al., 1975].

Les corrélations mises en évidence dans cette étude apparaissent aussi dans les MORB [Le Roex et al., 1983 ; Zindler et al., 1984] où elles sont interprétées en terme de mélange entre deux sources. Par contre les évolutions rencontrées dans les îles Marquises sont très différentes de celles enregistrées à Hawaii où les rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ et Sm/Nd sont respectivement plus faibles et plus forts dans les tholéiites que dans les basaltes alcalins.

4) Interprétations.

Sur la base de la répartition des éléments en trace, une hétérogénéité des sources a été proposée pour les basaltes des îles Marquises [Liotard et al., 1986]. Dans la présente étude, cette hétérogénéité caractéristique de la Polynésie française [Vidal et al., 1984] est largement confirmée. Les relations entre les rapports isotopiques et les rapports des éléments en trace (fig. 6) suggèrent un mélange entre trois termes : le manteau appauvri source des MORB, le pôle représenté par le groupe Sainte-Hélène - Tubuai, et enfin un pôle enrichi.

Dans l'hypothèse d'un simple mélange binaire liquide-liquide ou liquide-solide, les échantillons devraient, après correction de la cristallisation fractionnée [Feigenson et al., 1983] se situer sur une droite dans le diagramme $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = f(1/\text{Nd})$ (fig. 7). Ce n'est pas rigoureusement le cas ici, bien qu'une corrélation positive se dessine à l'intérieur des îles de Nuku Hiva et Hatutu.

Cette corrélation va dans le sens d'un mélange entre sources appauvrie et enrichie. La dispersion des données à l'échelle d'une île et surtout à l'échelle de l'archipel,

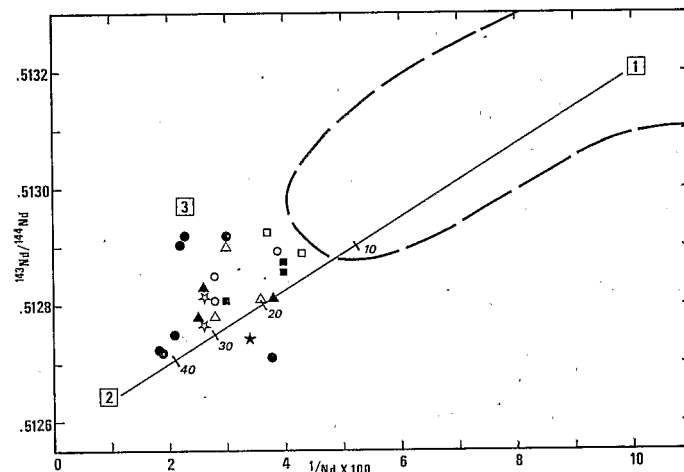


FIG. 7. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = f(1/\text{Nd})$ dans les basaltes des Marquises, corrigés de l'effet de la cristallisation fractionnée en supposant MgO = 12 % dans le magma primaire [Feigenson et al., 1983].

Ligne discontinue : domaine des MORB [Le Roex et al., 1983 ; O'Nions et al., 1977 ; Zindler et al., 1984]. Droite de mélange entre deux liquides avec pour [1] : $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,5132$ et Nd = 10 ppm et pour [2] : $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,51264$ et Nd = 100 ppm. Les graduations représentent les proportions de matériel enrichi. Celles-ci seraient beaucoup plus faibles encore dans l'hypothèse, plus probable, d'une assimilation de péridotites du manteau supérieur par un liquide basaltique. Le pôle [3] a été figuré à proximité des trois tholéiites d'Ua Pou. Symboles comme dans les figures 4 et 6.

FIG. 7. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $1/\text{Nd}$ for Marquesas basalts corrected for fractional crystallisation using MgO = 12 % for primary magma [Feigenson et al., 1983].

Broken Line : MORB domain [Le Roex et al., 1983 ; O'Nions et al., 1977 ; Zindler et al., 1984].

Mixing line between two liquids, with [1] : $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,5132$ et Nd = 10 ppm et pour [2] : $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,51264$ and Nd = 100 ppm. The graduations represent the proportions of enriched mantle. These proportions would be even lower in the more likely hypothesis of upper mantle peridotites digestion by a basaltic liquid. Pole [3] has been figured crossed to the three Ua Pou tholeiites. Symbols as in figures 4 and 6.

peut-être imputable pour partie à une mauvaise correction de la cristallisation fractionnée, peut alors être expliquée également par l'intervention du pôle Sainte-Hélène - Tubuai. D'ailleurs, les trois échantillons de tholéiites d'Ua Pou ne suivent pas la tendance principale. Dans l'hypothèse d'un mélange binaire entre deux liquides, les calculs approximatifs reportés sur la figure 7 (dans lesquels l'on a pris pour le pôle enrichi le rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ du « bulk earth », puisqu'il correspond aux îles les moins radiogéniques vis-à-vis du néodyme) indiqueraient la présence d'un maximum de 40 % de ce composant enrichi. Cependant, dans l'hypothèse, plus vraisemblable, d'une assimilation du manteau supérieur péridotitique par un liquide basaltique d'origine profonde, la proportion de composant basaltique serait beaucoup plus faible encore.

CONCLUSIONS.

Les hétérogénéités chimiques du manteau résultent de mécanismes complexes faisant intervenir plusieurs réservoirs distincts séparés les uns des autres depuis plus d'un milliard d'années. Leur étude est essentielle pour une meilleure compréhension des processus géodynamiques dans le manteau et de la genèse des basaltes. Au niveau des îles Marquises, cette hétérogénéité est largement développée. Les variations des rapports isotopiques en fonction des rapports d'éléments en trace permettent de mieux caractériser les différents réservoirs et conduisent aux conclusions suivantes :

1) les caractéristiques isotopiques sont corrélées au type pétrographique ; cependant, à l'intérieur d'un même type pétrographique des variations importantes sont observées, en particulier lorsque l'on compare les tholéiites d'Ua Pou à celles d'Eiao ;

2) les tholéiites d'Ua Pou proviennent d'une source de type Sainte-Hélène - Tubuai. Ces réservoirs pourraient correspondre à la lithosphère subductée résiduelle après l'extraction des tholéiites d'arc ;

3) l'ensemble des autres basaltes pourrait résulter d'un mélange dominé par le manteau appauvri, avec des proportions variables de manteau enrichi et de manteau du type Sainte-Hélène - Tubuai ;

4) le concept d'interactions entre matériel d'origine profonde et manteau supérieur, développé par Berger [1981, 1985], Berger et Vannier [1984] et Boivin [1982] à partir d'observations d'ordre pétrologique est en accord avec les données géochimiques présentées ici ;

5) enfin, les basaltes des Marquises montrent des différences notables avec ceux de Hawaï ; ceci tend à prouver que chaque archipel peut avoir ses spécificités et que la composition des sources ou les processus mis en œuvre peuvent être différents dans des contextes géodynamiques similaires.

Remerciements. — Ce travail a été rendu possible grâce au concours de l'ATP-CNRS Géologie et Géophysique des Océans et de l'ORSTOM. Le manuscrit a bénéficié des commentaires judicieux d'E. Berger et J. Fabriès.

1. Dans la pratique, et dans le cas du strontium par exemple, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesuré par spectrométrie de masse est corrigé de façon à ramener le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesuré à la valeur de 0,1194 considérée comme une constante universelle héritée de la nucléosynthèse ; les écarts, très faibles, à cette valeur sont peut-être causés par des fractionnements naturels, mais sont surtout imputables à la distillation fractionnée au niveau de la source d'ions du spectromètre de masse. Grâce à cette « normalisation », l'on est assuré que les différences de rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre deux roches sont intégralement le témoignage de celles de leurs sources mantellières.

Références

- ALLÈGRE C. J. (1982). — Chemical geodynamics. — *Tectonophysics*, Amsterdam, 81, pp. 109-132.
- ALLÈGRE C. J., HAMELIN B. & DUPRÉ B. (1984). — Statistical analysis of isotopic ratios in MORB : the mantle blob cluster model and the convective regime of the mantle. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 71, pp. 71-84.
- ALLÈGRE C. J., HAMELIN B., PROVOST A. & DUPRÉ B. (1986). — Topology in isotopic multispaces and origin of mantle chemical heterogeneities. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam (sous presse).
- ANDERSON D. L. (1982 a). — Isotopic evolution of the mantle : the role of magma mixing. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 57, pp. 1-12.
- ANDERSON D. L. (1982 b). — Isotopic evolution of the mantle a model. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 57, pp. 13-24.
- BAILEY D. K. (1982). — Mantle metasomatism - continuing chemical change within the Earth. — *Nature*, Londres, 296, pp. 525-530.
- BARREIRO B. (1983). — An isotopic study of westland dike swarm, South Island, New Zealand. — *Ann. Report Carnegie Inst.*, Washington DTM, pp. 471-475.
- BERGER F. (1981). — Enclaves ultramafiques, mégacristaux et leurs basaltes hôtes en contexte océanique (Pacifique Sud) et continental (Massif central français). — Thèse d'État, Paris-Sud, Orsay, 470 p.
- 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. France*, Paris, (8), I, 2, pp. 207-216.
- BERGER E. T. & VANNIER M. (1984). — Les dunites en enclaves dans les basaltes alcalins des îles océaniques : approche pétrologique. — *Bull. Minéral.*, Paris, 107, pp. 649-663.
- BOIVIN P. (1982). — Interactions entre magmas basaltiques et manteau supérieur. — Thèse d'État, Clermont-Ferrand, 344 p.
- BROUSSE R. (1978). — Éléments d'analyses de quelques îles des Marquises Fatu Hiva, Tahuata, Motane, Ua Pou. In : « Marquises ». — Cahiers du Pacifique. — Fondation Singer Polignac, Paris, pp. 107-144.
- BROUSSE R. & BELLON H. (1974). — Age du volcanisme de l'île d'Eiao, au nord de l'archipel des Marquises. — *C. R. Acad. Sci.*, Paris, D, 278, pp. 827-830.
- BROUSSE R., GUILLE G. & GIBERT J.-P. (1978 a). — Volcanisme et

- pétrologie de l'île de Hiva-Oa dans les îles Marquises (Pacifique central). In : « Marquises ». — Cahiers du Pacifique. — Fondation Singer Polignac, Paris, pp. 189-202.
- BROUSSE R., GUILLE G. & MAURY R. (1978 b). — Volcanisme et pétrologie de l'île de Nuku-Hiva dans les îles Marquises (Pacifique central). — *Ibidem*, pp. 145-188.
- BROUSSE R. & SEVIN M. A. (1978). — Pétrologie de l'île de Ua Huka dans le Pacifique central. — *Ibidem*, pp. 203-214.
- CHAUVEL C. & JAHN B. M. (1984). — Nd-Sr isotope and REE geochemistry of alkali basalts from the Massif central, France. — *Geochim. Cosmochim. Acta*, Oxford, 48, pp. 93-110.
- CHEN C. Y. & FREY F. A. (1983). — Origin of Hawaiian tholeiite and alkali basalt. — *Nature*, Londres, 302, pp. 785-789.
- DAVIES G. F. (1984). — Geophysical and isotopic constraints on mantle convection. — *J. Geophys. Res.*, Washington, 89, pp. 6017-6040.
- DE PAOLO D. J. & WASSERBURG G. J. (1976). — Nd isotope variations and petrogenetic models. — *Geophys. Res. Lett.*, Washington, 3, pp. 249-252.
- DOSSO L. & MURTHY V. R. (1980). — A Nd isotopic study of the Kerguelen islands : inferences on enriched oceanic mantle sources. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 48, pp. 268-276.
- DOSSO L., VIDAL PH., CANTAGREL J. M., LAMEYRE J., MAROT A. & ZIMINE S. (1979). — Kerguelen : continental fragment or oceanic island ? Petrology and isotopic geochemistry evidence. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 42, pp. 46-60.
- DUNCAN R. A. & COMPSTON W. (1976). — Sr isotopic evidence for an old mantle source region for French Polynesian volcanism. — *Geology*, Boulder, 4, pp. 728-732.
- DUNCAN R. A., MCCULLOCH M. T., BARSCZUS H. G. & NELSON D. R. (1986). — Pume versus lithospheric sources for melts at Ua Pou, Marquesas islands. — *Nature*, Londres, 322, pp. 534-538.
- DUNCAN R. A. & MCDUGALL I. (1976). — Linear volcanism in French Polynesia. — *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Amsterdam, 1, pp. 197-227.
- DUPRÉ B. (1983). — Structure et évolution du manteau terrestre : études à l'aide des traceurs isotopiques couplés Sr-Rb. — Thèse d'État Paris VII.
- DUPRÉ B. & ALLÈGRE C. J. (1980). — Pb-Sr-Nd isotopic correlation and the chemistry of the North Atlantic mantle. — *Nature*, Londres, 286, pp. 17-22.
- DUPRÉ B. & ALLÈGRE C. J. (1983). — Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. — *Nature*, Londres, 303, pp. 142-145.
- DUPUY C., VIDAL P., BARSCZUS H. G. & CHAUVEL C. (1987). — Origin of basalts from the Marquesas archipelago (south central Pacific Ocean) : isotope and trace element constraints. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam (sous presse).
- FEIGENSON M. D., HOFMANN A. W. & SPERA F. J. (1983). — Case studies on the origin of basalt. II. — The transition from tholeiitic to alkalic volcanism on Kohala volcano, Hawaiï. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, Heidelberg, 84, pp. 390-405.
- FESQ H. W., KABLE E. J. D. & GURNEY J. J. (1975). — Aspect of the geochemistry of kimberlites from the Premier Mine, and other selected south African occurrences with particular reference to the rare earth elements. — *Phys. Chem. Earth*, Amsterdam, 9, pp. 687-707.
- GAST P. W., TILTON G. R. & HEDGE C. (1964). — Isotopic composition of lead and strontium from Ascension and Gough islands. — *Science*, 145, p. 1181.
- HAMELIN B., DUPRÉ B. & ALLÈGRE C. J. (1984). — Lead-strontium isotopic variations along the East Pacific Rise and the Mid-Atlantic Ridge : a comparative study. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 67, pp. 340-350.
- HAMELIN B., DUPRÉ B. & ALLÈGRE C. J. (1986). — Pb-Sr-Nd isotopic data of Indian Ocean ridges : new evidence of large-scale mapping of mantle heterogeneities. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 76, pp. 288-298.
- HART S. R. (1984). — A large-scale isotope anomaly in the Southern hemisphere mantle. — *Nature*, Londres, 309, pp. 753-757.
- HART S. R. & STAUDIGEL H. (1982). — The control of alkalies and uranium in seawater by ocean crust alteration. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 58, pp. 202-212.
- HAWKESWORTH C. J., ROGERS N. W., VAN CALSTEREN P. W. C. & MENZIES M. A. (1984). — Mantle enrichment processes. — *Nature*, Londres, 311, pp. 331-335.
- HEDGE C. H. (1978). — Strontium isotopes in basalts from the Pacific Ocean basin. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 38, pp. 88-94.
- HOFMANN A. W. & HART S. R. (1978). — An assessment of local and regional isotopic equilibrium in the mantle. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 38, pp. 44-62.
- HOFMANN A. W., JOCHUM K. P., SEUFERT M. & WHITE W. M. (1986). — Nb and Pb in oceanic basalts : new constraints on mantle evolution. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 79, pp. 33-45.
- JACOBSEN S. B. & WASSERBURG G. J. (1981). — Transport models for crust and mantle evolution. — *Tectonophysics*, Amsterdam, 75, pp. 163-179.
- LANGMUIR C. H., VOCKE R. D., HANSON G. N. & HART S. R. (1978). — A general mixing equation with application to Iceland basalts. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 37, pp. 380-392.
- LE ROEX A. P., DICK H. J. B., ERLANK A. J., REID A. M., FREY F. A. & HART S. R. (1983). — Geochemistry mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and II° East. — *J. Petrol.*, Oxford, 24, pp. 267-318.
- LIOTARD J. M., BARSCZUS H. G., DUPUY C. & DOSTAL J. (1986). — Geochemistry and origin of basaltic lavas from Marquesas Archipelago, French Polynesia. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, Heidelberg, 92, pp. 260-268.
- LOPER D. E. (1985). — A simple model of whole-mantle convection. — *J. Geophys. Res.*, Washington, 90, pp. 1809-1836.
- MACKENZIE D. & O'NIONS R. K. (1983). — Mantle reservoirs and ocean island basalts. — *Nature*, Londres, 301, pp. 229-231.
- MAURY R. C. (1976). — Contamination et cristallisation fractionnée des séries volcaniques alcalines continentales (Massif central) et océaniques (Pacifique central). — Thèse, Univ. Paris Sud, 455 p.
- MENZIES M. M. & MURTHY R. V. (1980 a). — Enriched mantle : Nd and Sr isotopes in diopsides from kimberlites nodules. — *Nature*, Londres, 283, pp. 634-636.
- MENZIES M. M. & MURTHY R. V. (1980 b). — Nd and Sr isotope geochemistry of hydrous mantle nodules and their host alkali basalts : implications for local heterogeneities in metasomatically veined mantle. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 46, pp. 323-334.
- MICHARD A. & ALBAREDE F. (1985). — The hydrothermal uranium uptake at ridge crests. — *Nature*, Londres, 317, pp. 244-245.
- MICHARD A., ALBAREDE F., MICHARD G., MINSTER J. F., CHARLOU J. L. & TAN N. (1984). — Chemistry of solutions from the 13° N East Pacific Rise hydrothermal site. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 67, pp. 297-307.
- O'NIONS R. K., EVENSEN N. M. & HAMILTON P. J. (1979). — Geochemical modelling of mantle differentiation and crustal growth. — *J. Geophys. Res.*, Washington, 84, pp. 6091-6101.
- O'NIONS R. K., HAMILTON P. J. & EVENSEN N. M. (1977). — Variations in $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in oceanic basalts. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 34, pp. 13-22.
- PATCHETT P. J. & TATSUMOTO M. (1980). — Hafnium isotope variations in oceanic basalts. — *Geophys. Res. Lett.*, Washington, 7, 12, pp. 1077-1080.
- RICHARD P., SHIMIZU N. & ALLÈGRE C. J. (1976). — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, a natural tracer : an application to oceanic basalts. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 31, pp. 269-278.
- RODEN M. F., FREY F. A. & CLAGUE D. A. (1984). — Geochemistry of tholeiitic and alkalic lavas from the Koolau Range, Oahu, Hawaii : implications for Hawaiian volcanism. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 69, pp. 141-158.
- SCHILLING J. G. (1973). — Iceland mantle plume : geochemical study of Reykjanes Ridge. — *Nature*, Londres, 242, pp. 565-571.
- SCHILLING J. G., ZAJAC M., EVANS R., JOHNSTON T., WHITE W., DEVINE J. D. & KINGSLEY R. (1983). — Petrologic and geo-

- chemical variations along the Mid-Atlantic Ridge from 29° N. — *Am. J. Sci.*, New Haven, 283, pp. 510-586.
- SHAW D. M. (1968). — A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis. — *Geochim. Cosmochim. Acta*, Oxford, 32, pp. 573-602.
- STILLE P., UNRUH D. M. & TATSUMOTO M. (1983). — Pb, Sr, Nd and Hf isotopic evidence of multiple sources for Oahu, Hawaii basalts. — *Nature*, Londres, 304, pp. 25-29.
- SUN S. S. & HANSON C. (1975). — Evolution of the mantle : geochemical evidence from alkali basalts. — *Geology*, Boulder, 3, pp. 297-302.
- SUN S. S. & JAHN B. M. (1975). — Lead and strontium isotopes in post-glacial basalts from Iceland. — *Nature*, Londres, 255, pp. 527-530.
- TATSUMOTO M. (1966). — Genetic relations of oceanic basalts as indicated by lead isotopes. — *Sciences*, 153, pp. 1094-1101.
- TATSUMOTO M. (1978). — Isotopic composition of lead in oceanic basalt and its implication to mantle evolution. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 38, pp. 63-87.
- VIDAL PH., CHAUVEL C. & BROUSSE R. (1984). — Large mantle heterogeneity beneath French Polynesia. — *Nature*, Londres, 307, pp. 536-538.
- VIDAL PH. & DOSSO L. (1978). — Core formation : catastrophic or continuous ? Sr and Pb isotope constraints. — *Geophys. Res. Lett.*, Washington, 5, pp. 169-172.
- VOLLMER R. (1983). — Earth degassing, mantle metasomatism, and isotopic evolution of the mantle. — *Geology*, Boulder, 11, pp. 452-454.
- WHITE W. M., DUPRÉ B. & VIDAL PH. (1985). — Isotope and trace elements geochemistry of sediments from the Barbados Ridge - Demerara Plain region, Atlantic Ocean. — *Geochim. Cosmochim. Acta*, Oxford, 49, pp. 1875-1886.
- WHITE W. M. & HOFMANN A. W. (1982). — Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. — *Nature*, Londres, 296, pp. 821-825.
- ZINDLER A. & HART S. R. (1986). — Chemical geodynamics. — *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* (sous presse).
- ZINDLER A., HART S. R., FREY F. A. & JAKOBSSON S. P. (1979). — Nd and Sr isotope ratios and rare earth element abundances in Reykjanes Peninsula basalts : evidence for mantle heterogeneity beneath Iceland. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 45, pp. 249-262.
- ZINDLER A., JAGOUTZ E. & GOLDSTEIN S. (1982). — Nd-Sr and Pb isotopic systematics in a three component mantle : a new perspective. — *Nature*, Londres, 298, pp. 519-523.
- ZINDLER A., STAUDIGEL H. & BATIZA R. (1984). — Isotope and trace element geochemistry of young Pacific seamounts : implications for the scale of upper mantle heterogeneity. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, Amsterdam, 70, pp. 175-195.