

# Géochimie isotopique du volcanisme océanique actuel

## Identification des grands domaines mantelliques sources

Catherine CHAUVEL<sup>(1)</sup> et William M. WHITE<sup>(2)</sup>

1 - Laboratoire de Géochimie, Géosciences-Rennes,  
Campus Beaulieu, 35042 RENNES cedex.

2 - Department of Geological Sciences, Cornell University, Ithaca, NY 14850, U.S.A.

1. **INTRODUCTION**
  2. **LE MANTEAU PRIMITIF**
  3. **HÉTÉROGÉNÉITÉS ISOTOPIQUES DANS LE  
MANTEAU ACTUEL**
    - 3.1 Données isotopiques sur le manteau actuel
    - 3.2 Données sur les rides médio-océaniques
    - 3.3 Données sur les îles océaniques
  4. **ORIGINE DES CARACTÉRISTIQUES  
GÉOCHIMIQUES MAJEURES**
    - 4.1 Contraintes apportées par les compositions  
en éléments traces
    - 4.2 Origine des OIB : fractionnement interne  
au système manteau océanique
  5. **CONCLUSIONS**
- BIBLIOGRAPHIE**

# Géochimie isotopique du volcanisme océanique actuel

## Identification des grands domaines mantelliques sources

Catherine CHAUVEL et William M. WHITE

### I. INTRODUCTION

La composition actuelle du manteau terrestre n'est que très peu accessible par la mesure d'échantillons qui le représentent directement, puisque les nodules de péridotites remontés par les volcans sont, d'une part, rares et de petites tailles, et d'autre part, proviennent généralement de la partie lithosphérique du manteau, région qui ne représente qu'une infime partie du manteau dans son ensemble. De plus, ils risquent d'avoir été fortement contaminés par les basaltes qui les transportent. Les géochimistes préfèrent donc utiliser des contraintes indirectes pour évaluer la composition du manteau. L'analyse de roches volcaniques produites par fusion partielle est l'une de ces approches, tandis que la détermination des compositions des chondrites permet d'établir une référence servant à définir la composition du manteau primitif. Cette référence sert alors de point de comparaison pour évaluer les changements qui ont affecté le manteau et son évolution au cours des temps géologiques.

Alors que l'on a cru pendant un certain temps que le manteau terrestre avait une composition homogène, nous réalisons maintenant que sa chimie est hétérogène et ceci à toutes les échelles. Notamment à grande échelle, le manteau semble être formé d'un certain nombre de réservoirs qui ont eu une histoire complexe. L'on distingue généralement une partie supérieure du manteau convectif qui serait la source des basaltes de rides océaniques et une partie plus profonde qui serait à l'origine des basaltes d'îles océaniques. Ces réservoirs majeurs ont été mis en évidence par l'étude des compositions des éléments en traces et des variations isotopiques des roches volcaniques. Dans une moindre mesure, les variations des compositions en éléments majeurs tendent à confirmer ces hétérogénéités. Les variations de concentrations en éléments traces dans les roches volcaniques sont extrêmement importantes puisqu'elles se mesurent en ordres de grandeurs tandis que la gamme de variation des éléments majeurs est beaucoup moins importante. Contrairement aux éléments traces et aux éléments majeurs, les rapports isotopiques ne sont pas changés par les processus de fusion partielle et nous apportent donc des informations sur la composition et la diversité des sources dans le manteau. De plus, les isotopes radiogéniques nous informent sur l'évolution au cours du temps des rapports père-fils (voir chapitre IV) et nous donnent donc une dimension supplémentaire –le temps– dans l'évolution du manteau.

## 2. LE MANTEAU PRIMITIF

Le concept de manteau primitif est un concept très important en géochimie puisque ce réservoir sert de référence pour comprendre l'évolution du manteau depuis le début de l'histoire de la planète. Le manteau primitif correspond au manteau tel qu'il était après la formation et la séparation du noyau terrestre, mais avant la formation et la séparation de la croûte. Sa composition est globalement très similaire à celle des chondrites avec cependant des différences résultant de la perte (a) d'éléments volatiles au cours de la formation du système solaire et de la Terre, et (b) d'éléments sidérophiles lors de la formation du noyau terrestre. Cette composition est comparée à celle des chondrites dans la figure 1 et donnée sous forme de concentrations dans le Tableau 1. Elle sert de référence pour tous les matériaux terrestres et est donc, au moins dans ce sens, extrêmement importante. Tout particulièrement, elle a été utilisée pour définir les compositions isotopiques du néodyme, du strontium et du plomb du manteau depuis l'origine de la Terre jusqu'à l'heure actuelle.

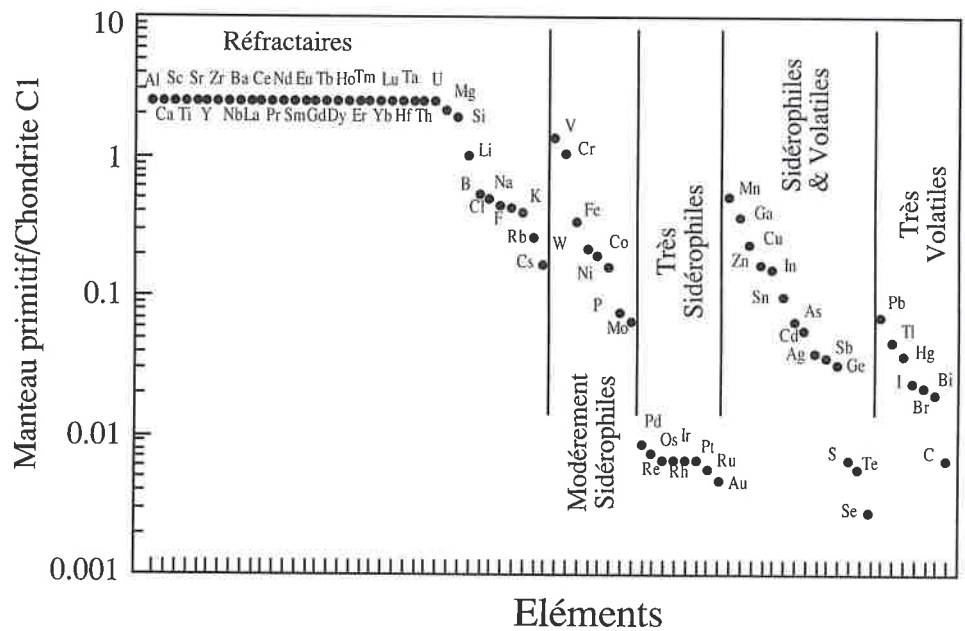


Figure 1 : Abondances des éléments dans le manteau primitif comparées à celles des chondrites de type C1. Noter l'appauvrissement marqué des éléments sidérophiles et volatiles (d'après White, 1998).

<b>Li</b>	1.6	<b>Ge</b>	1.1	<b>Nd</b>	1.225
<b>Be</b>	0.066	<b>As</b>	0.13	<b>Sm</b>	0.381
<b>B</b>	0.5	<b>Se</b>	0.05	<b>Eu</b>	0.145
<b>C</b>	250	<b>Br</b>	0.075	<b>Gd</b>	0.526
<b>F</b>	26	<b>Rb</b>	0.635	<b>Tb</b>	0.093
<b>Na</b>	2545	<b>Sr</b>	20.631	<b>Dy</b>	0.651
<b>Mg</b>	219407	<b>Y</b>	4.0469	<b>Ho</b>	0.146
<b>Al</b>	22985	<b>Zr</b>	16.928	<b>Er</b>	0.428
<b>Si</b>	214766	<b>Nb</b>	0.651	<b>Tm</b>	0.058
<b>P</b>	95	<b>Mo</b>	0.065	<b>Yb</b>	0.439
<b>S</b>	350	<b>Ru</b>	0.0042	<b>Lu</b>	0.065
<b>Cl</b>	330	<b>Rh</b>	0.001	<b>Hf</b>	0.286
<b>K</b>	240	<b>Pd</b>	0.005	<b>Ta</b>	0.037
<b>Ca</b>	23858	<b>Ag</b>	0.008	<b>W</b>	0.021
<b>Sc</b>	15.5	<b>Cd</b>	0.04	<b>Re</b>	0.00028
<b>Ti</b>	1153	<b>In</b>	0.013	<b>Os</b>	0.0034
<b>V</b>	82	<b>Sn</b>	0.175	<b>Ir</b>	0.0033
<b>Cr</b>	2935	<b>Sb</b>	0.005	<b>Pt</b>	0.0068
<b>Mn</b>	1080	<b>Te</b>	0.013	<b>Au</b>	0.00075
<b>Fe</b>	65500	<b>I</b>	0.011	<b>Hg</b>	0.01
<b>Co</b>	105	<b>Cs</b>	0.033	<b>Tl</b>	0.007
<b>Ni</b>	1890	<b>Ba</b>	6.189	<b>Pb</b>	0.18
<b>Cu</b>	30	<b>La</b>	0.624	<b>Bi</b>	0.0025
<b>Zn</b>	56	<b>Ce</b>	1.637	<b>Th</b>	0.0857
<b>Ga</b>	3.9	<b>Pr</b>	0.238	<b>U</b>	0.0214

Tableau I : Concentrations dans le manteau primitif. Toutes les concentrations sont en ppm (d'après White, 1998).

La composition isotopique du néodyme de la Terre primitive, rapportée au temps actuel, a été définie grâce aux travaux réalisés sur les chondrites et est établie à  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$ . Cette valeur appelée CHUR (chondritic uniform reservoir) sert de référence pour le calcul des  $\epsilon\text{Nd}$  (définis dans le chapitre IV). Elle a également été utilisée pour définir la valeur de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de la Terre primitive qui était jusque là indéterminée puisque le rapport Rb/Sr du manteau primitif n'est pas chondritique. Le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de la Terre primitive a été obtenu par intersection entre le *trend* des

basaltes océaniques et la valeur chondritique du néodyme (voir figure 2). Il est approximativement égal à 0,7045. La composition isotopique du plomb de la Terre primitive reste, quant à elle, inconnue. La seule contrainte est qu'elle devrait se situer sur l'isochrone des météorites dans le diagramme  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  en fonction de  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , droite communément appelée **Géochrone** (voir figure 4).

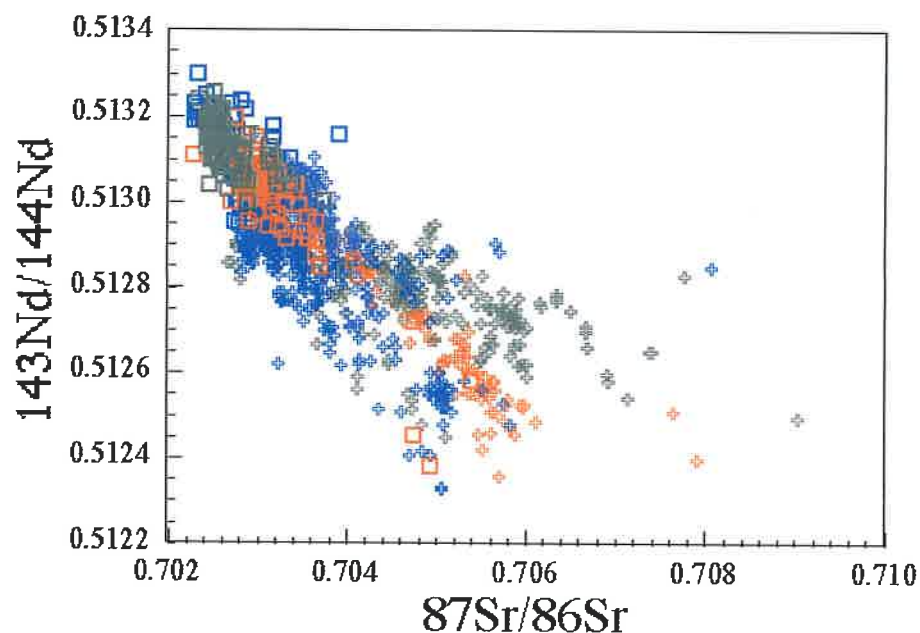


Figure 2 : Compositions isotopiques en néodyme et strontium des basaltes de rides océaniques (représentés par des  $\square$ ) et d'îles océaniques (représentés par des  $\oplus$ ). L'intersection des deux droites définit la valeur théorique du manteau primitif actuel et sert de référence pour le calcul des  $\epsilon\text{Nd}$  et des  $\epsilon\text{Sr}$ . Les MORB ont tous des valeurs isotopiques reflétant une source appauvrie, tandis que les OIB montrent des variations beaucoup plus importantes. Les données représentées ici correspondent à une compilation de plus de mille analyses isotopiques et les références bibliographiques sont donc trop nombreuses pour être citées ici.

### 3. HÉTÉROGÉNÉTÉS ISOTOPIQUES DANS LE MANTEAU ACTUEL

Les variations isotopiques observées dans les basaltes provenant du manteau terrestre actuel prouvent clairement que cette partie de la Terre n'est pas homogène. Les basaltes océaniques sont généralement utilisés pour caractériser les sources mantelliques car les chances que leur composition soit changée lors de la traversée de la croûte sont beaucoup plus faibles que dans le cas des basaltes dont les éruptions se produisent dans les milieux continentaux.

Les compositions isotopiques des **MORB** (*Mid-Ocean Ridge Basalts* ou basaltes de rides océaniques) peuvent, en première approximation, être interprétées comme résultant de l'évolution d'un réservoir dont l'appauvrissement est dû à la différenciation de la croûte continentale au cours des temps géologiques. Ces basaltes sont produits en quantités importantes puisqu'ils représentent la quasi totalité des roches du plancher océanique. Leur existence est généralement interprétée comme le résultat de la fusion, sous l'axe des dorsales, du manteau impliqué dans la convection générale. Cette source est donc un réservoir significatif et volumétriquement important dans le manteau.

Les **OIB** (*Oceanic Island Basalts* ou basaltes d'îles océaniques), quant à eux, proviennent d'une source différente dans le manteau, dont le volume est sans doute plus réduit que la source des MORB et qui est probablement localisée dans des zones plus profondes. Les premiers travaux effectués dans les années 1970 (Schilling, 1973; DePaolo et Wasserburg, 1979) ont attribué les caractéristiques de ces basaltes d'îles océaniques à une source de type manteau primitif, mais les travaux ultérieurs ont clairement démontré que leur origine est beaucoup plus complexe et nécessite l'intervention d'autres composants.

### 3.1 Données isotopiques sur le manteau actuel

Les données concernant la composition isotopique du manteau actuel proviennent en majorité des mesures effectuées sur les nodules de péridotites, sur les basaltes de rides océaniques (MORB), les basaltes d'îles océaniques (OIB) et les basaltes d'arcs insulaires. Ces derniers nous apportent des informations sur une zone particulière du manteau puisqu'il s'agit du coin mantellique affecté par la subduction de plaque océanique et nous n'aborderons pas ici ces aspects particuliers. Comme nous l'avons rappelé plus haut, les compositions mesurées sur les rares nodules de péridotites en contexte océanique, sont invariablement remises en question car ces roches sont extrêmement facilement contaminées par les basaltes qui les ont transportées. Nous limiterons donc notre approche de la composition du manteau aux informations provenant de l'étude des basaltes de rides et d'îles océaniques.

La différence principale observée au sein des basaltes océaniques se situe entre les basaltes de rides océaniques (MORB) et les basaltes d'îles océaniques (OIB). La figure 2 montre un exemple des variations isotopiques en strontium et en néodyme observées entre ces deux types principaux de volcanisme. De façon générale, les MORB ont des compositions isotopiques du strontium qui sont plus faibles que celles des îles océaniques alors que leur compositions isotopiques du néodyme et de l'hafnium sont plus élevées.

La figure 3 illustre les différences de composition isotopique du strontium entre les deux grands types de volcanisme océanique. Elle montre clairement que la région source des MORB est caractérisée par des valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  plus faibles que dans la région source des OIB. Ces faibles valeurs impliquent que la source des basaltes de rides a évolué avec un rapport Rb/Sr plus faible que celle des OIB et qu'elle est donc

plus appauvrie en éléments très incompatibles puisque l'on sait que le Rb est plus incompatible que le Sr au cours de la formation des principaux magmas. De la même façon, les MORB ont des compositions isotopiques du néodyme plus élevées que les OIB, ce qui correspond à l'expression au cours du temps d'une région source à fort rapport Sm/Nd et donc à un appauvrissement plus important en terres rares légères. Des informations de même nature sont apportées par les compositions isotopiques de l'hafnium.

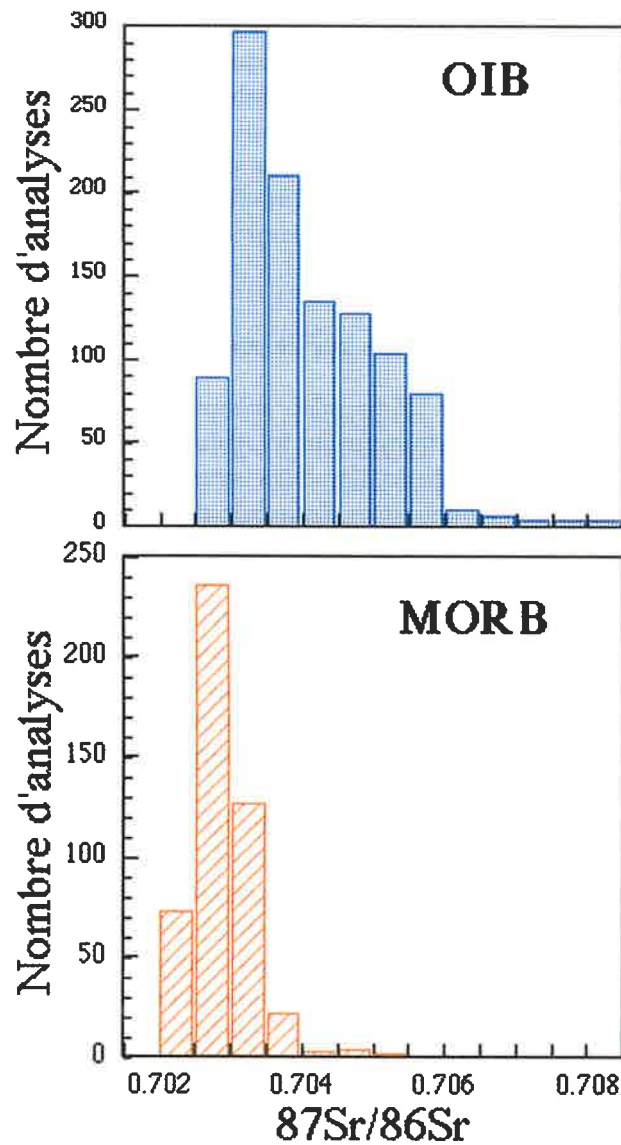


Figure 3 : Histogramme des rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurés sur les MORB et les OIB. Les MORB ont des rapports plus faibles que les OIB dans l'ensemble. De plus, ils montrent une variabilité des valeurs mesurées beaucoup plus faible que les OIB.

La situation en ce qui concerne les isotopes du plomb est beaucoup plus confuse. La figure 4 montre que les recouvrements entre les valeurs mesurées sur les MORB et les OIB sont très importants. Les MORB ont néanmoins des valeurs de  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  généralement plus faibles que les OIB, ce qui traduit une source avec un rapport U/Pb (intégré au cours du temps) plus faible.

À ces grandes tendances générales, se surimposent des hétérogénéités internes aux MORB et aux OIB que nous allons maintenant examiner avec plus de détails.

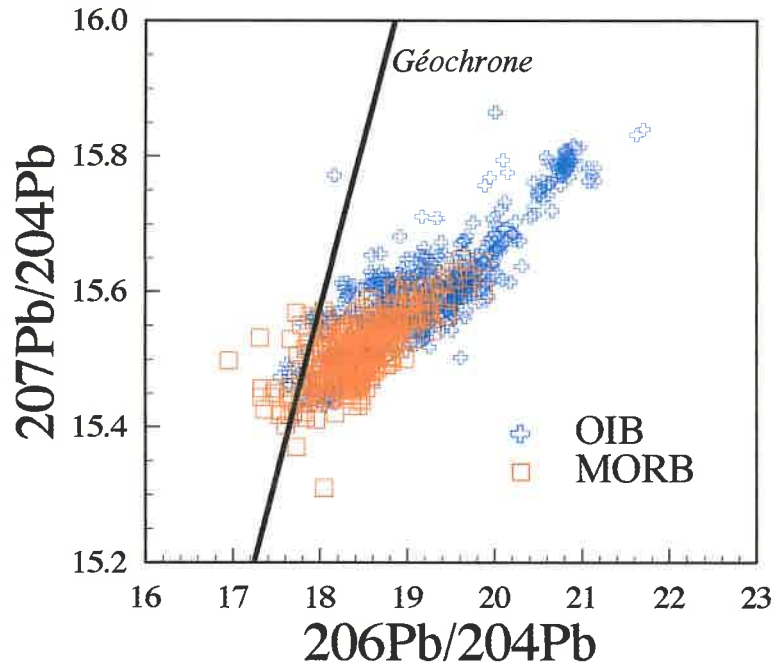


Figure 4 : Diagramme  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  en fonction de  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  montrant les plus faibles valeurs isotopiques caractérisant les MORB (représentés par des  $\square$ ) par rapport aux OIB (représentés par des  $\oplus$ ). L'ensemble des données définit une pente qui donne un âge de l'ordre de 1,8 milliard d'années. La géochrone (isochrone définie par les météorites) est également représentée dans la figure. La composition du manteau primitif devrait se situer sur cette droite de référence.

À ces grandes tendances générales, se surimposent des hétérogénéités internes aux MORB et aux OIB que nous allons maintenant examiner avec plus de détails.

### 3.2 Données sur les rides médio-océaniques

Les données isotopiques obtenues sur les basaltes de rides océaniques sont de plus en plus nombreuses et montrent, dans leur ensemble, que ces laves proviennent d'une source mantellique appauvrie en éléments incompatibles. Les valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurées varient aux alentours de 0.7027 et montrent que la source de ces basaltes est très appauvrie en Rb depuis longtemps (figure 2). Les valeurs  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  sont



élevées, correspondent à des  $\epsilon\text{Nd}$  d'environ +12 (figure 2), et traduisent un appauvrissement à long terme de la source. Si l'on utilise une estimation raisonnable du rapport  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  pour la source de ces MORB, on peut calculer un âge moyen d'appauvrissement de cette source. Cet âge est d'environ 1,5 à 2 milliards d'années, ce qui est globalement comparable à l'âge moyen de la croûte continentale. Les quelques valeurs  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  obtenues sur des MORB indiquent également un appauvrissement de la source (qui a donc un rapport Lu/Hf plus élevé que le rapport chondritique) mais montrent également une forte dispersion qui, à l'heure actuelle, n'est pas bien comprise. Les mesures isotopiques de plomb sur les MORB sont assez dispersées (figure 4). On note cependant une corrélation entre les rapports  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  et  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  qui définit une pente avec un âge d'environ 1,8 milliard d'années (voir le chapitre IV pour les explications détaillées sur le calcul d'âge). Le fait le plus marquant en ce qui concerne les isotopes du plomb est qu'ils n'ont pas enregistré une diminution du rapport U/Pb au cours des temps géologiques. En effet, les données sur les MORB se situent en majorité à droite de la géochrone ce qui traduit une augmentation du rapport U/Pb par rapport à celui de la Terre Primitive qui se situe, elle, sur la géochrone. Cette augmentation du rapport U/Pb va à l'encontre de ce qui pourrait être prévu dans une source appauvrie, puisque l'uranium est plus incompatible que le plomb lors de la formation des magmas de type basaltique. Ceci n'est pas cohérent avec les informations obtenues à partir des autres systèmes isotopiques et requiert donc des processus de formation de la source des MORB plus compliqués qu'un seul appauvrissement.

Les rides océaniques sont classiquement divisées en trois grandes régions principales : les rides médio-atlantique, médio-pacifique et médio-indienne. Ces trois rides ne sont pas identiques du point de vue isotopique. La figure 5 (a et b) montre que des différences notables sont observables pour les isotopes du strontium et du plomb. La ride médio-pacifique est celle qui présente les rapports isotopiques du strontium les plus faibles tandis que la ride médio-indienne se singularise par des compositions isotopiques du strontium élevées et des rapports  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  faibles. Ces différences sont suffisamment significatives pour suggérer que les régions sources ne sont pas bien homogénéisées à l'échelle globale du manteau terrestre. À ces différences systématiques, s'ajoute le fait que les rapports isotopiques mesurés montrent de grandes variations prouvant que la source de ces basaltes est loin d'être uniforme (figure 5a et b).

Une partie des variations isotopiques observées le long des rides est imputée à la présence et à l'influence de panaches à proximité de la ride, le mélange entre une source de type MORB et un panache qui porte une signature isotopique différente pouvant créer des variations des rapports isotopiques. Ceci a été démontré clairement dans le cas de l'Islande, exemple typique de l'interaction entre un panache d'origine profonde et le manteau source des basaltes de rides. Dans ce cas précis, la ride située au sud de l'Islande porte l'empreinte de la contamination de la source des MORB par un matériau provenant du panache islandais (Sun *et al.*, 1975). Une autre partie des hétérogénéités isotopiques observables au sein des MORB semble, elle, ne pas être liée à la présence de panaches et représenterait donc des hétérogénéités plus locales de la région source.

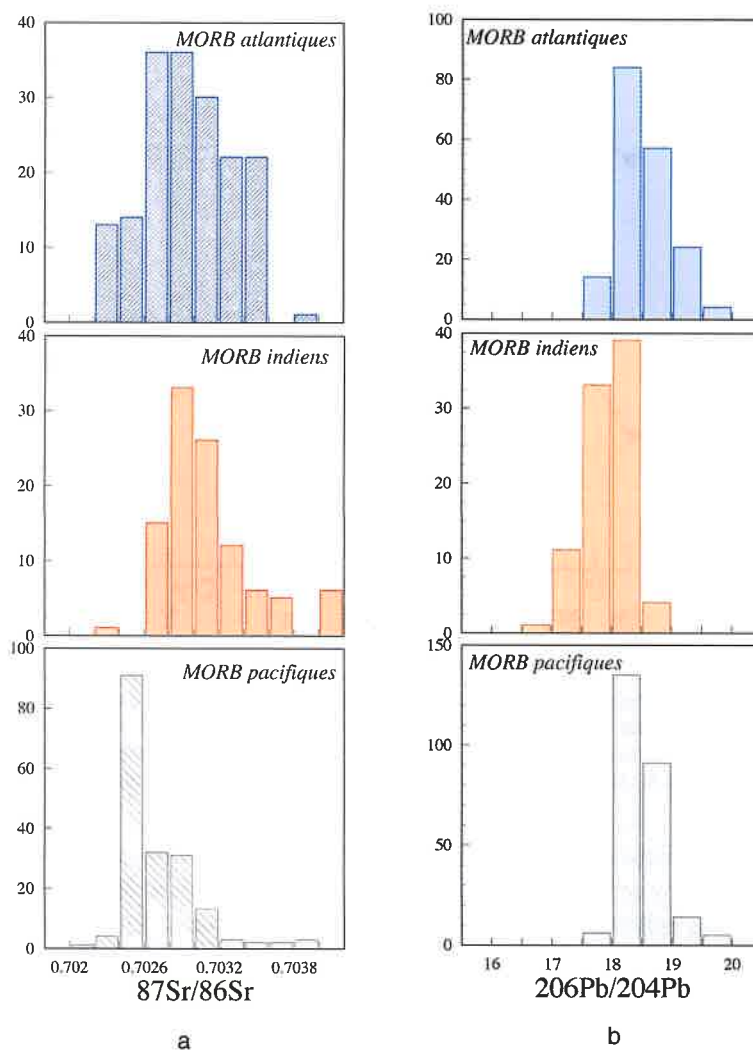


Figure 5a : Histogrammes des rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesurés sur les basaltes des trois rides médio-océaniques principales. La ride pacifique se caractérise par les valeurs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  les plus faibles tandis que la ride indienne a les valeurs les plus élevées. La ride atlantique se singularise par une variation importante des constitutions isotopiques mesurées sur les laves.

Figure 5b : Histogrammes des rapports  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  mesurés sur les trois rides. Les MORB indiens ont les rapports  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  les plus faibles.

Les rapports isotopiques mesurés sur les MORB montrent que leur source est appauvrie en éléments incompatibles et ce, depuis suffisamment longtemps pour avoir des effets sur les constitutions isotopiques d'éléments tels que le néodyme. Cet appauvrissement est à mettre en parallèle avec l'appauvrissement observé au niveau des éléments traces (figure 6). Qualitativement, les deux faits sont cohérents mais une approche détaillée montre que les choses sont en fait plus complexes.

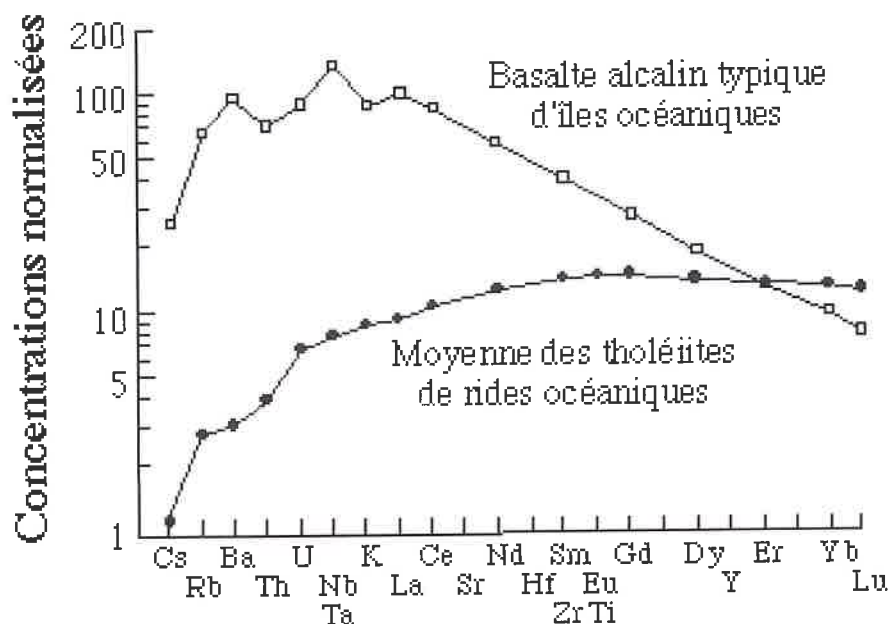


Figure 6 : Spectres d'éléments traces (ou spidergrams) montrant la différence entre les tholéiites de rides océaniques et les basaltes alcalins d'îles océaniques. Dans ce diagramme, les éléments sont rangés par ordre de compatibilité croissante vers la droite et leurs concentrations sont normalisées à celles du manteau primitif (d'après White, 1995, modifié).

Les mesures effectuées sur les MORB servent, de fait, à définir les caractéristiques du manteau appauvri actuel qui est considéré comme localisé dans la partie supérieure du manteau. La taille de ce réservoir est difficile à estimer mais des calculs de bilans de masse entre manteau appauvri, croûte continentale et manteau primitif, montrent que ce réservoir appauvri qui résulte de la différenciation de la croûte continentale, représente sans doute environ 30 à 50 % du manteau terrestre.

### 3.3 Données sur les îles océaniques

Les îles océaniques ont des constitution isotopiques différentes de celles des MORB. Les rapports isotopiques du strontium et du plomb sont généralement plus élevés tandis que ceux du néodyme et de l'hafnium sont plus faibles. La source de ces basaltes est, de façon intégrée dans le temps, appauvrie en éléments incompatibles puisque la plupart des données se situe dans la partie supérieure du *mantle array*, mais cette source est moins appauvrie que celle des rides océaniques (figure 2).

Toutefois, la caractéristique principale des OIB est la très grande diversité des rapports isotopiques. Que ce soit pour les compositions isotopiques du strontium, du néodyme ou de l'hafnium, la gamme observée s'étend de valeurs similaires à celles des MORB jusqu'à des valeurs extrêmement différentes marquant l'existence de sources particulières dans le manteau. Si tant est que des moyennes puissent être calculées et

avoir une signification géologique, il apparaît que la source des basaltes d'îles océaniques est moins appauvrie que celle des MORB. Cette constatation avait amené les premiers chercheurs à la fin des années 70 à suggérer que la source des OIB pouvait résulter d'un mélange entre un manteau inférieur primitif et un manteau supérieur appauvri, source des MORB. Les travaux ultérieurs ont clairement démontré que cette interprétation n'était pas envisageable car les données isotopiques obtenues sur certaines îles (telles que les îles de la Société en Polynésie ou les îles Samoa) montrent que la source de ces basaltes est enrichie par rapport au manteau primitif. La composition de cette source ne peut donc pas résulter d'un mélange entre manteau primitif et manteau appauvri et requiert la présence dans le manteau de zones relativement enrichies en éléments traces depuis longtemps.

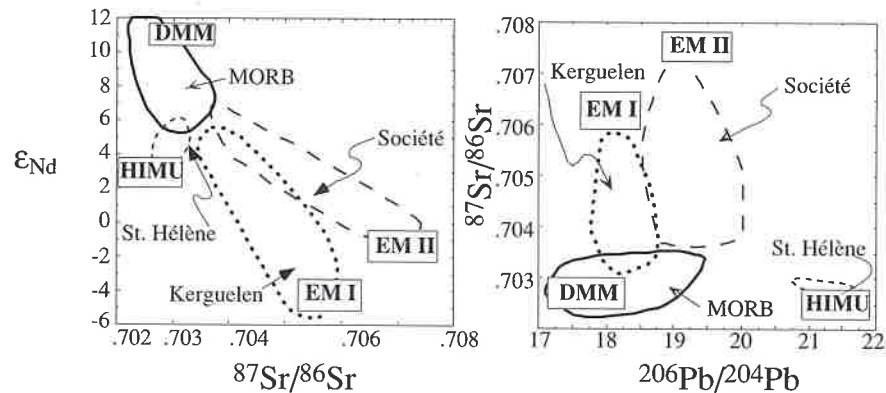


Figure 7 : Représentation des quatre grands types isotopiques définis par White (1985) et des quatre compositions extrêmes de Zindler et Hart (1986) dans les diagrammes  $^{87}Sr/^{86}Sr$  en fonction de  $^{143}Nd/^{144}Nd$  et  $^{206}Pb/^{204}Pb$  en fonction de  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (d'après White, 1995).

À cause du nombre croissant de données reportées dans la littérature et de la variabilité des rapports isotopiques observés, une tentative de compréhension de ces variations a été proposée par White (1985). Ayant remarqué que ces variations isotopiques n'étaient pas aléatoires, il a subdivisé les données obtenues sur les îles océaniques en 4 grands types principaux : St Hélène, Kerguelen, Société et Hawaii, auxquels s'adjoint le type MORB représenté en majorité par les basaltes de rides (figure 7). Cette classification a été reprise par Zindler et Hart (1986) qui ont modifié le nom de quatre des 5 composants en HIMU, EM I, EM II et DMM (figure 7). Le terme HIMU vient de *high m* [rapport  $^{238}U/^{204}Pb$  élevé], terme qui traduit la particularité des roches de type St Hélène : des valeurs  $^{206}Pb/^{204}Pb$  très élevées. Les termes EM I et EM II traduisent deux variantes de composants enrichis (EM = *enriched mantle*), le deuxième (type Société ou EM II) ayant des rapports  $^{87}Sr/^{86}Sr$  plus élevés que le premier (type Kerguelen ou EM I), pour des  $^{143}Nd/^{144}Nd$  similaires. Le terme DMM (*Depleted MORB Mantle*) correspond à un réservoir plus appauvri que les MORB les plus appauvris.

## 4. ORIGINE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES MAJEURES

### 4.1 Contraintes apportées par les compositions en éléments traces

Les variations de concentrations en éléments traces dans les basaltes sont généralement liées aux différences de profondeur de fusion, d'assemblage minéral de la source, et de taux de fusion et de cristallisation ayant mené à la formation des laves. Les MORB, dans leur ensemble, sont de nature tholéiitique et résultent d'une fusion à relativement faible profondeur, principalement hors de la zone de stabilité du grenat. Les spectres d'éléments incompatibles sont donc assez plats et ne portent pas une empreinte marquée de l'influence du grenat lors de la fusion (figure 6). Les basaltes d'îles océaniques sont, quant à eux, de nature plus alcaline ; ils résultent généralement de faibles taux de fusion partielle dans une zone en moyenne plus profonde, où le grenat est stable dans la phase résiduelle. Leurs spectres d'éléments traces sont donc fractionnés et beaucoup plus riches en éléments très incompatibles que les MORB (figure 6). Néanmoins, il a été démontré par Newson *et al.* (1986) et Hofmann *et al.* (1986) que les rapports de certains éléments traces ne variaient pas avec le taux de fusion produisant les laves océaniques, et que ces rapports [Nb/U et Ce/Pb] n'avaient pas des valeurs chondritiques (figure 8). Cette découverte importante permet de déterminer que les sources des MORB et des OIB sont, de ce point de vue, similaires. Les OIB ne résultent pas, dans leur ensemble, d'un mélange entre un réservoir appauvri, source des MORB, et un réservoir primitif ou enrichi puisque leurs rapports Ce/Pb et Nb/U ne se situent pas entre les valeurs retenues pour, d'une part le manteau appauvri et, d'autre part, le manteau primitif ou la croûte continentale. La source des OIB doit être, malgré ses caractères isotopiques particuliers, très semblable à celle des MORB. Cette contrainte très importante doit être prise en compte dans toute modélisation de l'évolution et de la différenciation du manteau terrestre.

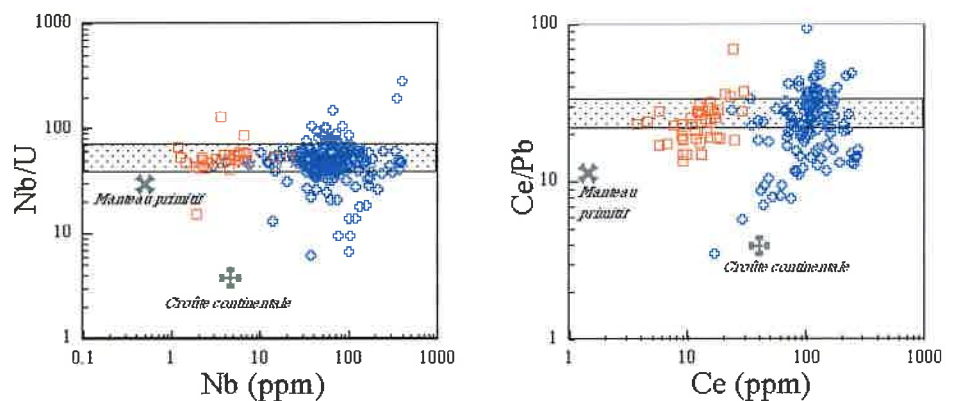


Figure 8 : Diagramme Nb/U en fonction de Nb, et Ce/Pb en fonction de Ce montrant la relative uniformité de ces deux rapports dans les MORB (représentés par des  $\square$ ) et les OIB (représentés par des  $\circ$ ). Les valeurs moyennes du volcanisme océanique se distinguent nettement des valeurs acceptées pour le manteau primitif et la croûte continentale.

Le contraste entre la mémoire isotopique qui suggère que la source des OIB est appauvrie en éléments traces et les données sur les éléments traces mesurées sur les laves qui, elles, démontrent un enrichissement en éléments incompatibles, a longtemps interpellé la communauté des géochimistes et a mené à une plus grande prise en compte de l'association de ces deux types de données pour évaluer l'origine des processus qui créent les hétérogénéités isotopiques dans le manteau.

#### 4.2 Origine des OIB : fractionnement interne au système manteau océanique

Les compositions isotopiques mesurées sur les basaltes d'îles océaniques sont extraordinairement variées et nécessitent l'intervention de processus anciens (de l'ordre du milliard d'années) ayant fractionné les rapports élémentaires Sm-Nd, Rb-Sr, Lu-Hf et U-Th-Pb. Ces fractionnements peuvent avoir eu lieu soit dans le manteau lui-même, soit dans des zones plus superficielles de la planète, telles que les lithosphères continentales ou océaniques. De nombreux débats ont toujours lieu quant aux processus ayant mené à ces fractionnements, mais l'accord est quasi général pour admettre qu'ils se produisent dans les zones superficielles de la planète, soit dans la croûte ou la lithosphère océanique, soit dans la croûte ou la lithosphère continentale.

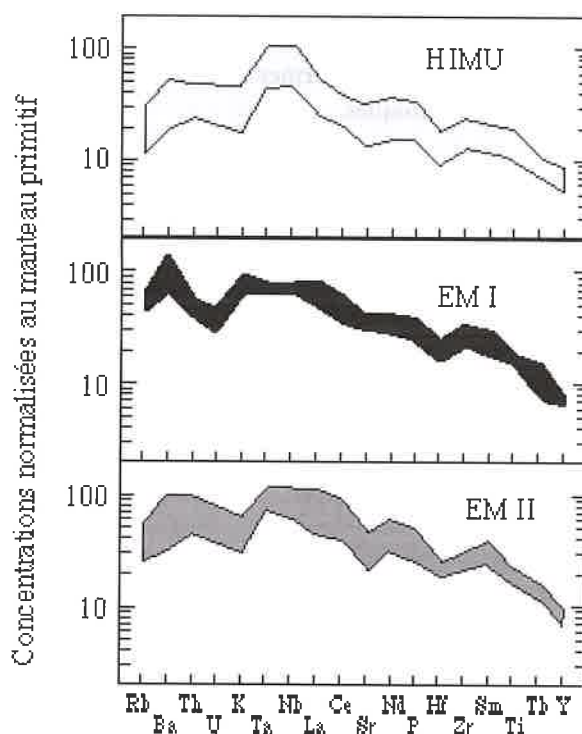


Figure 9 : Spectres d'éléments en traces des trois principaux types d'OIB (d'après Weaver, 1991).

Weaver (1991) a montré que des différences systématiques en spectres d'éléments traces étaient associées aux variations isotopiques observées dans les îles océaniques. La figure 9 montre les spectres d'éléments traces mesurés sur les trois principaux types d'îles océaniques, HIMU, EM I et EM II.

- Les spectres correspondant aux laves provenant de sources type HIMU sont caractérisés par un appauvrissement en éléments très incompatibles (Rb à Nb). Cet appauvrissement ne peut résulter des processus de fusion partielle ou de cristallisation fractionnée puisqu'ils ont tous les deux tendance à enrichir le liquide en de tels éléments. Cette caractéristique ne peut donc être interprétée que comme reflétant un appauvrissement de la source en ces éléments.
- Les spectres des laves provenant de sources type EM I et EM II ne présentent pas cet appauvrissement caractéristique des laves HIMU. De plus, les basaltes de type EM I se distinguent de ceux de type EM II par un enrichissement plus important en Ba et K.

Ces caractéristiques peuvent être mises en parallèle avec les contraintes apportées par les compositions isotopiques pour mieux comprendre l'origine de ces classes principales d'OIB. Hofmann et White (1982) ont proposé un modèle unificateur suggérant que la composition géochimique particulière des panaches pourrait être expliquée par le recyclage profond de croûte océanique au cours des temps géologiques (figure 10). Après subduction de la plaque océanique, le matériel serait stocké au niveau d'une zone de transition (entre le manteau supérieur et le manteau inférieur, ou bien, à la limite manteau-noyau) pendant un temps indéterminé, et fondrait ultérieurement pour produire les panaches. Ce modèle permet de rendre compte des diverses caractéristiques des basaltes d'îles océaniques.

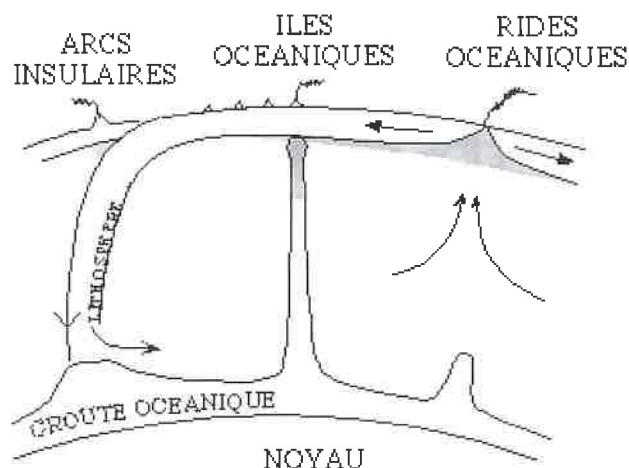


Figure 10 : Schéma illustrant le modèle de Hofmann et White (1982) concernant le recyclage de la lithosphère océanique dans le manteau. Après subduction et déshydratation, la croûte océanique subit des transformations minéralogiques qui augmentent sa densité. Elle se sépare alors de la lithosphère sous-jacente moins dense et s'accumule à la base du manteau. Au bout d'un certain temps, elle devient suffisamment chaude pour former des panaches qui, en arrivant à la surface, donnent naissance aux îles océaniques (d'après Hofmann et White, 1982).

Les sédiments étant, dans la majorité des cas, subductés avec les plaques océaniques qu'ils recouvrent, ils peuvent donc également contribuer aux caractéristiques des magmas produits à partir des panaches. Suivant les quantités, les types et l'âge de ces sédiments, les signatures qu'ils peuvent porter varieront. Néanmoins, ils dérivent dans leur ensemble de la désintégration de la croûte continentale et peuvent donc introduire une « note continentale » au sein des magmas produits dans le manteau.

Comme la composition chimique en éléments majeurs des basaltes d'îles océaniques est généralement assez semblable à celle des basaltes de rides océaniques, il semble inconcevable que la source des panaches soit exclusivement composée de croûte océanique recyclée dans le manteau. Il est fort probable que cette source consiste en grande majorité de péridotite et de seulement quelques dizaines de pour cent de croûte océanique. Cependant, comme cette croûte a des concentrations en éléments traces beaucoup plus élevées qu'une péridotite, c'est elle qui imposera sa signature isotopique et ses caractéristiques en éléments traces au liquide produit lors de la fusion (Chauvel *et al.*, 1992).

Cette interprétation concernant la source des OIB est confortée par les mesures de compositions isotopiques de l'oxygène effectuées sur les basaltes océaniques. Les OIB ont, dans leur ensemble, des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  beaucoup plus variables que les MORB. La seule explication plausible pour cette plus grande variabilité est que le matériau source des OIB a subi, à un moment de son histoire, des processus se produisant à la surface de la planète. En effet, l'altération hydrothermale active au niveau des rides affecte les compositions isotopiques de l'oxygène en augmentant les  $\delta^{18}\text{O}$  dans la partie supérieure de la croûte et en les diminuant dans les parties plus profondes, créant donc des variations importantes de ce rapport. De la même façon, les sédiments déposés à la surface de la croûte océanique ont des compositions isotopiques de l'oxygène qui se distinguent par des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  très élevées.

Woodhead *et al.* (1993) ont clairement démontré que des variations de  $\delta^{18}\text{O}$  étaient corrélées à des variations des rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  sur des laves provenant de *seamounts* de l'alignement de Pitcairn en Polynésie (figure 11). Ces données représentent un argument extrêmement fort pour affirmer que les valeurs élevées de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  résultent de l'implication de sédiment dans la source de ces magmas et donc pour conforter l'interprétation globale proposée par Hofmann et White en 1982.

De même, l'examen détaillé des données en éléments traces sur les OIB permet de mettre en évidence l'implication de sédiments dans la source de ces magmas. Le rapport Ce/Pb est, de ce point de vue particulièrement utile puisque ce rapport est d'environ 5 dans les matériaux provenant de la croûte continentale alors que les laves provenant du manteau ont un rapport de l'ordre de 25 (figure 8). De plus, les sédiments ont des concentrations en plomb beaucoup plus élevées que les basaltes ou le manteau (20 ppm comparés à 0,5 ou 0,05 ppm) et l'addition de quantités infimes d'un tel matériel aura donc un effet important sur le rapport Ce/Pb dans le mélange. C'est exactement ce qui a été observé dans un certain nombre de cas, l'exemple le plus criant étant celui des basaltes des îles de la Société pour lesquels il est observé une



corrélation indéniable entre le rapport Ce/Pb et les rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . Cette corrélation représente un argument très fort pour l'implication de sédiments dans la source des basaltes produits dans les panaches.

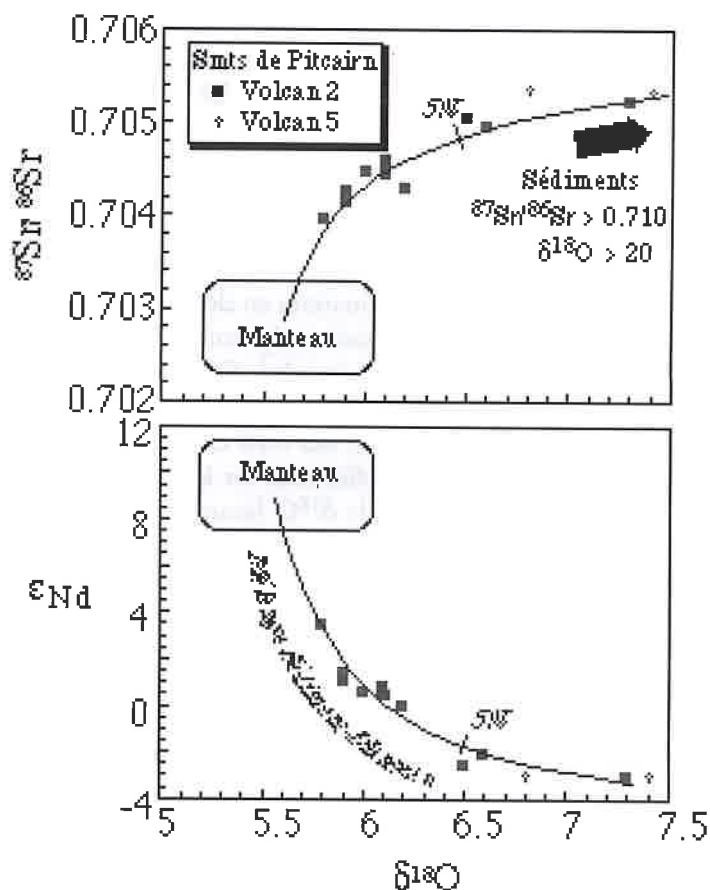


Figure 11 : Diagramme montrant les variations corrélées de  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et  $\epsilon\text{Nd}$  dans les laves provenant des seamounts de la chaîne de Pitcairn en Polynésie. Les données s'accordent parfaitement avec un modèle de mélange entre le manteau appauvri et des sédiments (d'après Woodhead *et al.*, 1993).

## 5. CONCLUSIONS

Ci-dessus, nous avons présenté rapidement un modèle unificateur permettant d'expliquer les variations isotopiques observées au sein des basaltes océaniques. Nous devons néanmoins rappeler que d'autres interprétations ont été avancées et nous citons ici le modèle de McKenzie et O'Nions (1983) qui explique l'origine des OIB par l'implication de lithosphère sous-continentale. Ces auteurs rappellent que cette partie du manteau est particulièrement enrichie en éléments incompatibles et qu'elle peut,

occasionnellement être délaminée de la croûte qui la surmonte pour sombrer dans le manteau. Comme dans le modèle d'Hofmann et White, cette lithosphère serait stockée au niveau d'une couche limite, pour y être réchauffée et donner naissance à des panaches. La lithosphère océanique, non pas recyclée mais présente à l'aplomb des îles actuelles, a également été suggérée comme source possible des basaltes d'îles océaniques.

Étant donnée la variété des compositions chimiques et isotopiques observées pour les basaltes océaniques, il est possible que ces grands types de processus soient à l'origine des données observées. D'autres processus, non encore envisagés à l'heure actuelle, pourraient aussi jouer un rôle déterminant. Il y a donc encore beaucoup de zones d'ombres dans notre compréhension de la dynamique du manteau et les travaux futurs permettront sans aucun doute d'en améliorer notre vision.

## BIBLIOGRAPHIE

CHAUVEL C., A.W. HOFMANN et P. VIDAL (1992). HIMU-EM : the French Polynesian connection. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **110**, 99-119.

DePAOLO D.J. et G.J. WASSERBURG (1979). Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **43**, 615-627.

HOFMANN A.W. et W.M. WHITE (1982). Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 421-436.

HOFMANN A.W., K.P. JOCHUM, M. SEUFERT et W.M. WHITE (1986). Nb and Pb in oceanic basalts : new constraints on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **79**, 33-45.

McKENZIE D. et R.K. O'NIONS (1983). Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, **301**, 229-231.

NEWSOM H.E., W.M. WHITE, K.P. JOCHUM et A.W. HOFMANN (1986). Siderophile and chalcophile element abundances in oceanic basalts, Pb isotope evolution and growth of the Earth's core. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **80**, 299-313.

SCHILLING J.-G. (1973). Iceland mantle plume : geochemical study of the Reykjanes Ridge. *Nature*, **242**, 565-571.

SUN S.S., M. TATSUMOTO et J.-G. SCHILLING (1975). Mantle plume mixing along the Reykjanes Ridge axis : lead isotopic evidence. *Science*, **190**, 143-147.

WEAVER B.L. (1991). The origin of ocean island basalt end-member compositions : trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **104**, 381-397.

WHITE W.M. (1985). Sources of oceanic basalts : Radiogenic isotopic evidence. *Geology*, 13, 115-118.

WHITE W.M. (1998). *Geochemistry*, Johns-Hopkins University Press, Baltimore.

WOODHEAD J.D., P. GREENWOOD, R.S. HARMON et P. STOFFERS (1993). Oxygen isotope evidence for recycled crust in the source of EM-type ocean island basalts. *Nature*, 362, 809-813.

ZINDLER A. et S. HART (1986). Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 493-571.