



HAL
open science

Introduction d'eau de mer dans le diapre mantellique de Zabargad (Mer Rouge) d'après les isotopes du Sr et du Nd

Delphine Bosch

► **To cite this version:**

Delphine Bosch. Introduction d'eau de mer dans le diapre mantellique de Zabargad (Mer Rouge) d'après les isotopes du Sr et du Nd. CRAS Compte Rendu Académie des Sciences, 1991. hal-02005446

HAL Id: hal-02005446

<https://hal.science/hal-02005446>

Submitted on 8 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Introduction d'eau de mer dans le diapir mantellique de Zabargad (Mer Rouge) d'après les isotopes du Sr et du Nd

Delphine BOSCH

Résumé – Dans l'île de Zabargad affleurent des roches d'origine mantellique constituant l'apex d'un diapir mis en place lors des stades initiaux d'ouverture de la Mer Rouge et affecté par plusieurs processus métasomatiques. Des données isotopiques en Sr et Nd obtenues sur péridotites, diabases et mégacristsaux d'olivine par attaque totale ou partielle fournissent de nouvelles informations sur l'importance du dernier événement hydrothermal correspondant à une circulation d'eau de mer à haute température.

Sr and Nd isotopic evidence for seawater infiltration into the Zabargad mantle diapir (Red Sea)

Abstract – *Mantle-derived rocks that outcrop on Zabargad Island represent the upper part of a diapir emplaced during the early stages of Red Sea rifting. These rocks underwent several metasomatic events. Leaching experiments and Sr-Nd isotopic data on whole rocks and peridot megacrysts provide new information on the last hydrothermal event. These data are consistent with a widespread infiltration of high-temperature seawater.*

Abridged English Version – On the western margin of the Red Sea, Zabargad Island (Fig. 1) is famous as a source of gem peridotites. It displays an association of rock-types and structural features typically found in a mantle diapir environment ([1], [2], [3]). The main petrological units are the following: three peridotite massifs, two generations of diabases, a gneissic unit, and a Miocene metasedimentary formation. Peridotites and diabases from Zabargad preserve evidence for several metasomatic events as identified by three generations of amphiboles [4]. The third generation ranges compositionally from hornblende to actinolite crystallized within the shear-zones, and associated with Cl⁻-rich minerals. They also formed in a static environment as temperature decreased (from 750 to 500°C) within the peridotites, diabases (both generations) and gneisses [5]. The Sr isotopic ratios of whole-rocks range from 0.702,76 to 0.706,98 which suggests mixing with a highly radiogenic Sr component. Considering the geological environment of a mantle diapir, this radiogenic component could be either crustally derived fluids or seawater. A crustal component would be characterized by high Sr and low Nd isotopic ratios. On the Nd/Sr correlation diagram (Fig. 2), the Zabargad diabase and peridotite data define a continuous field parallel to the Sr axis. ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios show limited variation (Table I) and are totally within the MORB domain; this argues against crustal contamination. In contrast, seawater contamination occurring at high temperatures could explain the Nd-Sr data obtained for Zabargad peridotites and diabases. Seawater interaction with mantle-derived rocks will increase the Sr isotopic composition without significant alteration of the ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios of the rocks [6]. Acid leaching experiments on whole-rocks and gem peridotites have been completed in an attempt to characterize the Sr isotopic composition of the fluids (Table II). These experiments are performed in three steps: 1st a 3 min. leach with 6 N HCl for the whole-rock (4 min. with 2.5 N HCl for the peridotites); 2nd a 8 min. leach with warm 2.5 N HCl (24 hrs. with 6 N HCl for the peridotites); 3d dissolution of the remaining solid residue. For the 85Za8c sample as an example (Fig. 3), the first step isolates a leachable component characterized by a

Note présentée par Jean-Louis LE MOUËL.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.709 which represents the seawater end-member. The second leaching has a Sr composition of 0.707,7 intermediate between the composition of seawater and the unleached rock. These results suggest incomplete removal of the seawater component during the first leaching step, because the solid residue yields a low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio comparable to the Sr isotopic ratios of amphibole-free peridotites and diabases from Zabargad. Conversely, the sample 86Z5d, free of III-generation amphibole (actinolite-hornblende), provides limited range of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between the unleached sample (0.703,85) and the residue obtained after leaching experiments (0.703,74). This peculiar and different behaviour between these two samples express the late seawater introduction, probably during the latest stages of the diapir emplacement. Similar results are obtained for leaching experiments on gem peridotites. Fluid inclusion analyses of olivine gems from Zabargad suggest that all the minerals have crystallized at high temperature, low pressure and in the presence of abundant volatile fluids [7]. In agreement with petrologic [4] and stable isotope⁽¹⁾ data [8] the Nd/Sr isotopic results on whole-rocks and gem peridotites from Zabargad island provide evidence for the hypothesis of pervasive widespread seawater introduction along shear-zones of the mantle diapir.

INTRODUCTION. — Témoin précoce de l'ouverture du rift océanique de la Mer Rouge, l'île de Zabargad (*fig. 1*) présente à l'affleurement des péridotites à plagioclase et à spinelle correspondant à l'apex d'un diapir d'origine mantellique ([1] à [3]), ce qui en fait un objet tout à fait exceptionnel pour l'étude des composants du manteau et de la croûte impliqués lorsqu'un rift océanique commence à se développer au sein d'une lithosphère continentale [9]. Un ou plusieurs stades de métasomatisme ont affecté ces composants [4]; le dernier stade est très développé à la fois dans les péridotites, leur encaissant gneissique et les diabases recoupant le tout. Les rapports isotopiques couplés du Sr et du Nd constituent deux des traceurs privilégiés pour identifier l'origine des fluides réagissant avec les roches. Dans le cas de l'île de Zabargad, ces données de Sr et de Nd couplées avec des expériences de leaching en Sr sur roches et sur olivines gemmes permettent de définir la nature du fluide à l'origine de la dernière phase de métasomatisme agissant à la fois sur les matériaux dérivés du manteau et sur l'encaissant gneissique du diapir.

CADRE GÉOLOGIQUE ET DONNÉES ANTÉRIEURES. — Sur une surface d'environ 3 km², l'île de Zabargad présente une grande diversité d'unités lithologiques (*fig. 1*) parmi lesquelles trois massifs de péridotites ([1] à [5]), des gneiss, témoins anciens d'une croûte continentale inférieure différenciée au Pan Africain [10], la formation métasédimentaire de Zabargad d'âge miocène et deux générations de dykes de diabase.

En 1981 Clochiatti et coll. [7] proposent que l'un des fluides ayant circulé dans les matériaux d'origine mantellique de cette île dérive de l'eau de mer. Ce fluide aurait pénétré et réagi avec les composants du diapir à travers des zones de cisaillement localisées en particulier au sommet de ce dernier. En fait, trois générations successives d'amphiboles ont été identifiées [4] : 1. des pargasites ou kaersutites riches en Ti; 2. des hornblendes pargasitiques vertes; 3. des hornblendes et des actinolites cristallisent à la fin de la mise en place du diapir, à la fois dans les péridotites, les diabases et les gneiss. Cette dernière génération d'amphiboles, associée à des minéraux hydratés riches en Cl⁻ témoigne de la circulation de fluide à haute température (supérieure à 500°C).

Enfin dans les péridotites du massif sud, des cristaux d'olivines vertes ou brunes et de taille pluricentimétrique, tapissent les fractures ouvertes. Ces olivines, dont certaines sont

TABLEAU I

Compositions isotopiques en Sr et Nd des péridotites et des diabases de Zabargad. δ : diabase; δAm : diabase amphibolitisée; α : amphibolites; π : péridotite; S : massif sud; C : massif centre; N : massif nord; Sp : spinelle; Am : amphibole; Pl : plagioclase.

Sr and Nd isotopic compositions of Zabargad peridotites and diabases. δ : diabase; δAm : amphibolitized diabase; α : amphibolite; π : peridotite; S : southern body; C : central body; N : northern body; Sp : spinel; Am : amphibole; Pl : plagioclase.

Échantillon		$^{87}Sr/^{86}Sr$	ϵSr	$^{143}Nd/^{144}Nd$	ϵNd
<i>Diabases</i>					
85Za71-20	δ	.70404 \pm 1	- 6.5	.51296 \pm 2	+ 6.2
86Z7c	δ	.70349 \pm 2	- 14.3	.51298 \pm 2	+ 6.6
86Z31e	δ	.70367 \pm 2	- 11.8	.51290 \pm 1	+ 5.1
86Z5d	δ	.70385 \pm 1	- 9.2	.51306 \pm 4	+ 8.2
85Za20b	δ	.70281 \pm 1	- 24.0	.51285 \pm 1	+ 4.1
86Z12b	δ	.70307 \pm 1	- 20.3	.51296 \pm 1	+ 6.2
85Za21a	δ	.70382 \pm 3	- 9.6	.51309 \pm 1	+ 8.7
85Za26b1	δ	.70352 \pm 3	- 13.9	-	-
86Z9c	δ	.70341 \pm 1	- 15.5	-	-
86Z18	δAm	.70408 \pm 1	- 6.0	.51290 \pm 1	+ 5.1
86Z11a	δAm	.70321 \pm 1	- 18.3	.51296 \pm 2	+ 6.2
86Z8	α	.70371 \pm 1	- 11.2	.51300 \pm 1	+ 7.0
86Z13	α	.70369 \pm 2	- 11.5	.51281 \pm 3	+ 3.3
85Za60	α	.70698 \pm 3	+ 35.2	.51295 \pm 1	+ 6.1
86Z9d	α	.70276 \pm 1	- 24.7	.51303 \pm 1	+ 7.6
86Z6a	α	.70495 \pm 3	+ 6.4	.51290 \pm 2	+ 5.0
<i>Péridotites</i>					
85Za43	πAmN	.70417 \pm 1	- 4.7	.51292 \pm 5	+ 5.5
85Za42a	πSpN	.70354 \pm 3	- 13.6	.51307 \pm 4	+ 8.4
85Za42b	$\pi AmSpN$	.70520 \pm 9	+ 9.9	.51300 \pm 6	+ 7.0
85Za40	πAmN	.70434 \pm 2	- 2.3	.51295 \pm 5	+ 6.0
85Za56	πSpC	.70345 \pm 2	- 14.9	.51309 \pm 2	+ 8.7
85Za59	πAmC	.70298 \pm 3	- 21.6	-	-
85Za26b2	πAmS	.70613 \pm 3	+ 23.1	-	-
85Za8	πAmS	.70545 \pm 1	+ 13.5	.51290 \pm 5	+ 5.1
85Za31b	πAmS	.70617 \pm 1	+ 23.7	.51287 \pm 4	+ 4.5
85ZF2b	πAmS	.70576 \pm 1	+ 17.9	.51293 \pm 5	+ 5.6
85Za2	πPIS	.70368 \pm 4	- 11.6	.51288 \pm 6	+ 4.8
85Za71-12	πPIS	.70316 \pm 5	- 19.3	.51292 \pm 5	+ 5.5
85Za71-13	$\pi AmPIS$	.70307 \pm 6	- 20.3	.51306 \pm 7	+ 8.2
85ZF1	πPIS	.70633 \pm 2	+ 26.0	-	-
85ZF2	πPIS	.70386 \pm 1	- 9.1	.51299 \pm 5	+ 6.8

de qualité gemme et de couleur verte, se développent en association avec antigorite, cancrinite et scapolite ([2], [3], [7]). Des phénocristaux d'olivine brune contiennent de nombreuses inclusions (amphiboles, talc, chlorites, sulfates, carbonates, phosphates).

TECHNIQUES ANALYTIQUES. — La préparation des échantillons, la séparation de Sr et de Nd sur résines échangeuses d'ions, le dépôt sur filament et l'analyse au spectromètre de masse ont été précédemment décrits en ([10] à [12]). Les blancs totaux de chimie sont inférieurs à .17 ng pour le Sr et inférieurs à .15 ng pour le Nd.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX. — Les compositions isotopiques en Sr de 16 diabases et 15 péridotites varient de .70276 à .70698 (tableau I). Deux mécanismes de contamination

sont susceptibles d'avoir provoqué de telles variations isotopiques du Sr : il peut s'agir soit d'une contamination crustale, soit d'une contamination par l'eau de mer. Le contexte géologique de l'île de Zabargad permet d'envisager légitimement l'une ou l'autre de ces deux solutions étant donné que nous sommes en domaine sub-océanique et que l'encaissant du diapir est constitué de gneiss acides et basiques témoins d'une croûte inférieure différenciée au Pan Africain [10]. Reportés dans un diagramme $\epsilon\text{Nd}-\epsilon\text{Sr}$ (fig. 2), les points expérimentaux définissent un domaine continu, parallèle à l'axe des abscisses. L'ensemble des roches analysées possède une relative homogénéité dans les rapports isotopiques $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ compris entre .51281 et .51309, valeurs équivalentes à celles des MORB [13]. Cette signature particulière du réservoir source est confirmée par les données isotopiques du plomb obtenues sur les péridotites et diabases de l'île ([4], [13], [14]). Une contamination crustale engendrerait dans le diagramme $\epsilon\text{Nd}-\epsilon\text{Sr}$ une corrélation négative, traduisant une variation des rapports du Nd et du Sr depuis des valeurs comparables à celles des MORB pour des échantillons indemnes d'altération, jusqu'à des rapports bas en Nd et élevés en Sr pour des échantillons contaminés. Les résultats des compositions isotopiques en Nd excluent la possibilité que la croûte puisse constituer le pôle contaminant des échantillons d'origine mantellique de l'île.

L'eau de mer, deuxième « agent contaminant » envisagé ne contient que très peu de Nd et n'influencera donc pas significativement les rapports isotopiques $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ des roches analysées. De ce fait, une contamination par l'eau de mer sur des produits dérivés du manteau se traduira dans le diagramme $\epsilon\text{Nd}-\epsilon\text{Sr}$ par une faible variation des rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ couplée à une forte variation des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [6], ce qui est le cas de nos échantillons analysés. Cette intervention de l'eau de mer conduit à la cristallisation à haute température d'une troisième génération d'amphiboles en particulier dans les zones de cisaillement favorables à l'introduction de fluides dans les roches de l'apex du diapir.

Afin de mieux contrôler le rôle de l'eau de mer, un travail spécifique sur les produits du métasomatisme a été entrepris par lessivage acide. Ces lessivages, effectués sur des péridotites et des diabases visent à attaquer préférentiellement les discontinuités minéralogiques (limites de grains, clivages, etc.) ou structurales (sous-grains, microfractures, etc.) dans lesquelles se sont développés les produits du métasomatisme ([15] à [18]). L'analyse en Sr des acides extraits au cours de ces lessivages permet d'identifier la composition du fluide contaminant. L'analyse du résidu obtenu après ces lessivages doit fournir une signature en Sr plus proche de la composition réelle de la roche que celle obtenue pour la roche totale non lessivée, voire même la composition isotopique initiale de la roche. Ces expériences ont été réalisées sur des mégacristaux d'olivines non déformées cristal-

TABLEAU II

Résultats des lessivages acides sur roches totales et mégacristaux d'olivine. Roches totales : 1^{er} : 3 mn aux ultrasons en HCl 6 N; 2^e : 8 mn à chaud en HCl 2.5 N; Olivines : 1^{er} : 5 mn aux ultrasons en HCl 2.5 N; 2^e : 24 h en HCl 6 N.

Acid leaching data on whole-rocks and peridot megacrysts. Whole-rocks: 1st: 3 min. with HCl 6 N; 2nd: 8 min. with hot HCl 2.5 N. Peridots: 1st: 5 min. with HCl 2.5 N; 2nd: 24 hrs. with HCl 6 N.

Échantillon	Non lessivé	1 ^{er} lessivage	2 ^e lessivage	Résidu
86Z5d . . . . .	.70385 ± 1	.70586 ± 4	.70435 ± 4	.70374 ± 2
85Za8c . . . . .	.70545 ± 1	.70937 ± 4	.70770 ± 4	.70444 ± 2
85a71-19 . . . . .	.70665 ± 1	.70817 ± 1	.70614 ± 3	—
Olivine Gemme verte . . . . .	.70746 ± 2	.70887 ± 1	.70831 ± 2	.70664 ± 3
Olivine brune . . . . .	.70659 ± 7	.70872 ± 1	—	.70588 ± 1

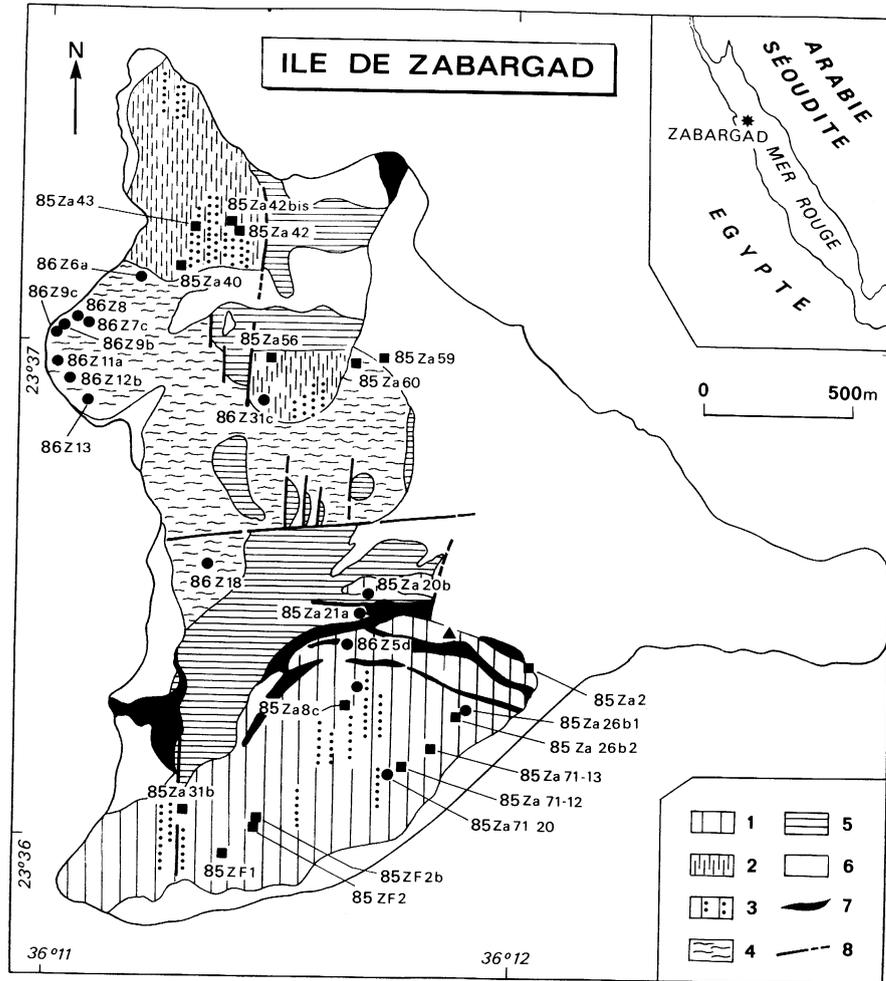


Fig. 1. — Carte géologique schématique de l'île de Zabargad d'après [1] à [3]. 1, Péridotites à plagioclase; 2, Péridotites à spinelle; 3, Péridotites à amphibole; 4, Gneiss; 5, Formation métasédimentaire de Zabargad; 6, Formations sédimentaires cénozoïques; 7, Diabases; 8, Failles. ■ : échantillons de péridotites; ● : échantillons de diabases; ▲ : échantillons de mégacristsaux d'olivine.

Fig. 1. — Geological sketch map of Zabargad island after [1] to [3]. 1, Plagioclase peridotites; 2, Spinel peridotites; 3, Amphibole peridotites; 4, Gneisses; 5, Zabargad metasedimentary formation; 6, Cenozoic sedimentary formations; 7, Diabases; 8, Faults. ■: peridotite samples; ●: diabase samples; ▲: peridot megacryst samples.

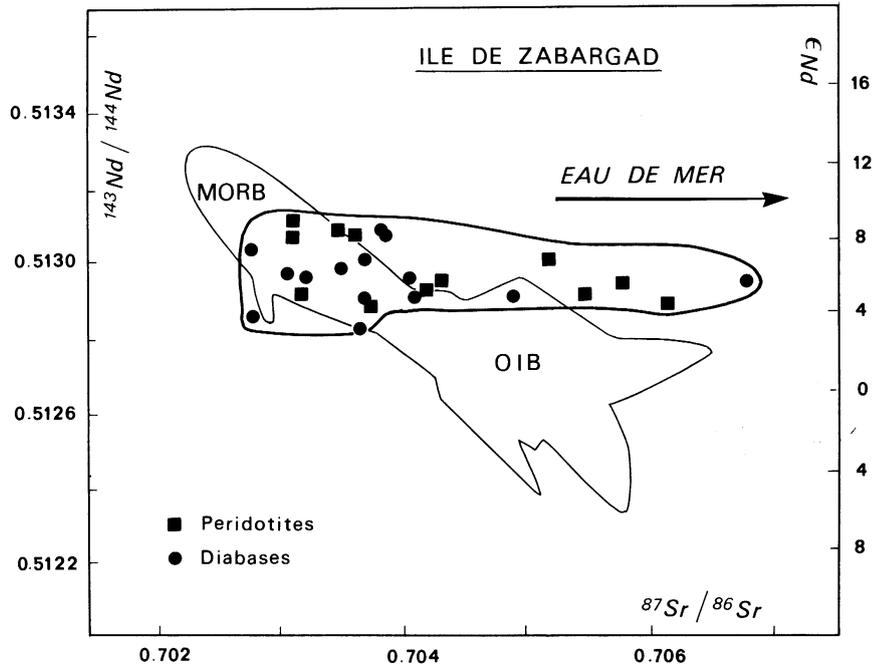


Fig. 2

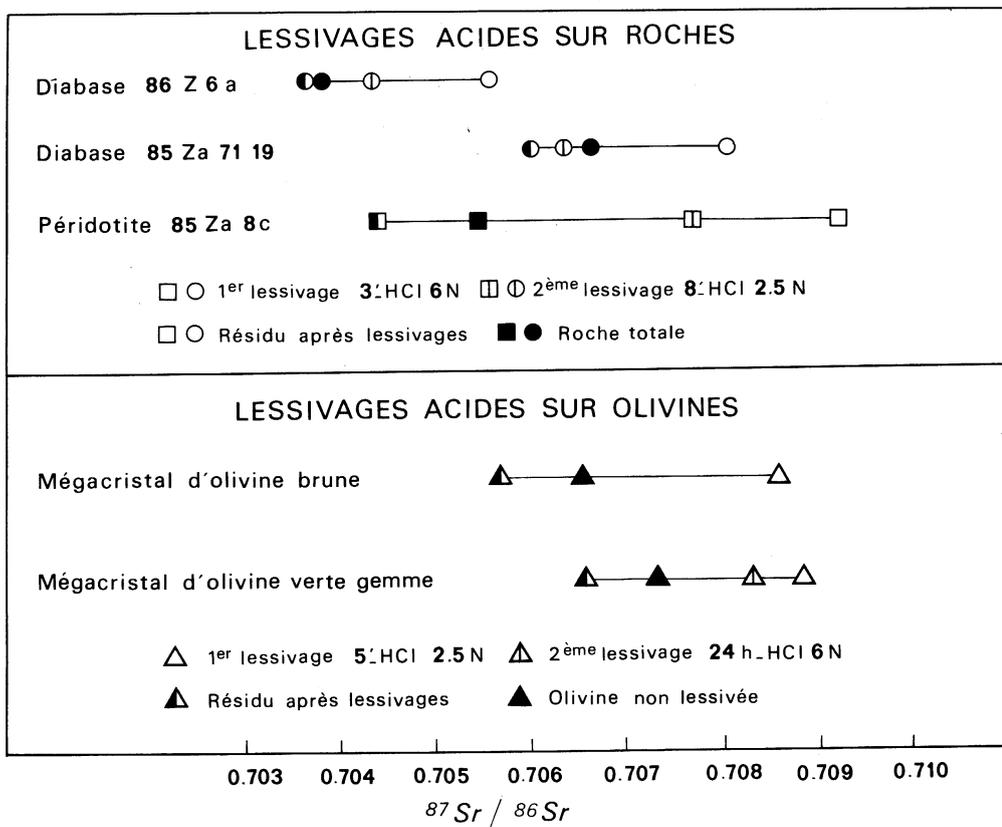


Fig. 3

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE II

Fig. 2. — Diagramme $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ en fonction $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Les domaines des MORB et OIB sont figurés (voir [13] pour les références).

Fig. 2. — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ correlation diagram. MORB and OIB domains are represented (see [13] for references).

Fig. 3. — Résultats des compositions isotopiques en Sr pour les lessivages acides de roches totales et des mégacristsaux d'olivine; les compositions isotopiques des échantillons non lessivés sont également reportées.

Fig. 3. — Sr isotopic compositions obtained for acid leaching on whole rocks and peridot megacryst compositions of unleached samples are reported for comparison.

lisant dans des fractures ouvertes lors de la circulation de la phase hydrothermale à haute température (tableau II, *fig. 3*). Pour l'échantillon 85Za8c par exemple, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la roche totale non lessivée est de .70545, le premier lessivage (3 mn en HCl 6 N) fournit une composition voisine de celle de l'eau de mer à savoir .70901. Lors du deuxième lessivage (8 mn en HCl 2.5 N), on obtient pour le liquide extrait un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de .7077 valeur intermédiaire entre celle de la roche totale non lessivée et celle obtenue lors du premier lessivage : celui-ci n'a donc pas été suffisant pour extraire entièrement le Sr radiogénique dû à la contamination par les fluides aqueux et la composition mesurée trace alors un mélange où domine la composition en Sr de l'eau de mer mais où le Sr de la matrice de la roche commence à apparaître. Lors de l'analyse du résidu, on obtient une composition de .70444 inférieure à celle de la roche totale non lessivée permettant de conclure que la majorité du Sr provenant de la contamination est extrait lors des deux premières phases de lessivage. Par contre, l'échantillon 86Z5d, ne contenant pas d'amphiboles de type hornblende-actinolite, présente de très faible variation des rapports $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ mesurés, lors de l'attaque totale d'une part, et, pour le résidu après lessivages acides d'autre part (tableau II). Cette différence de comportement d'un échantillon à l'autre témoigne de l'intervention tardive de l'eau de mer dans les roches constituant l'apex du diapir. Elle se produit vraisemblablement tardi à post la mise en place de celui-ci dans l'encaissant gneissique.

Le même type d'expérience mené sur des mégacristsaux d'olivine du massif sud fournit des résultats particulièrement intéressants quant à l'origine de ces minéraux apparaissant dans des fractures ouvertes (*fig. 3*). Lors de leur cristallisation, les olivines n'incorporent que très peu de Sr dans leur réseau cristallin. Ainsi, la majorité du Sr mesuré lors de l'analyse des mégacristsaux d'olivine correspond à du Sr radiogénique amené par l'eau de mer, présent principalement dans les inclusions fluides et cristallines (chlorite, talc, amphibole, sulfates, carbonates, phosphates) [7]. Lors des expériences menées sur les olivines brunes, la majorité du Sr est extrait lors de la première étape de lessivage (99 % du Sr extrait avec une composition de .70872). Inversement, lors d'expériences similaires réalisées sur des olivines gemmes, seulement 8.7 % du Sr avec un rapport de .70887 est récupéré lors de la première étape et ce n'est que lors de la seconde phase de lessivage que 77 % du Sr est extrait avec une composition de .70831. Ceci démontre l'efficacité du lessivage acide d'autant plus grande que le réseau cristallin des olivines renferme des inclusions aisément attaquées lors des lessivages, par exemple, les inclusions solides des olivines brunes (carbonates en particulier). Ces lessivages favorisent donc l'extraction d'un composant caractérisé par une composition isotopique en Sr plus radiogénique que celles obtenues lors de l'attaque totale ou de l'analyse du résidu obtenu après lessivage.

Il n'y a donc pas eu homogénéisation isotopique complète lors de l'événement hydrothermal entre le strontium d'origine mantellique et celui apporté par l'eau de mer. Cependant, après lessivage des mégacristsaux d'olivine, leurs résidus présentent encore des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ radiogéniques (.7066 pour une olivine gemme verte; .7058 pour une olivine brune) intermédiaires entre celui de l'eau de mer (.709) et ceux des roches mantelliques de Zabargad, dépourvues d'amphiboles (.70276 à .70386) ([4], [13]).

CONCLUSION. — Les analyses isotopiques en Nd et en Sr des péridotites et diabases de Zabargad éliminent la possibilité d'une contamination crustale et mettent en évidence l'importance de la contamination par l'eau de mer intervenue tardivement dans la genèse de ces roches et marquée par la présence d'amphiboles de type hornblende à actinolite, cristallisées tard à post la mise en place du diapir. De même les δD compris entre -30 et -50 ‰ [8] obtenus sur ces amphiboles ajoutent un argument en faveur de l'altération par l'eau de mer. Les lessivages acides entreprises sur les roches totales et les mégacristsaux d'olivine mettent en évidence le composant contaminant radiogénique correspondant à l'eau de mer. Le caractère tardif de la contamination est démontré par l'hétérogénéité isotopique du Sr des péridotites et des diabases révélé par ces expériences de lessivage. Enfin les données sur les mégacristsaux d'olivine indiquent d'une part qu'il n'y a eu homogénéisation isotopique lors de l'activité hydrothermale et d'autre part que la majorité du Sr de ces olivines, extractable par lessivage, est radiogénique et se localise préférentiellement dans les inclusions solides et fluides.

(¹) Je remercie M^{me} D. Ben Othman, MM. L. Briquieu, J. R. Lancelot et J. M. Luck pour leurs commentaires ainsi que B. K. Nelson pour les corrections de l'anglais. Ce travail constitue la contribution C.N.R.S.-I.N.S.U.-D.B.T. n° 290.

Note remise le 15 avril 1991, acceptée le 16 mai 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. NICOLAS, F. BOUDIER, N. LYBERIS, R. MONTIGNY et P. GUENNOG, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 301, série II, 1985, p. 1063-1068.
- [2] E. BONATTI, P. HAMLYN et G. OTTONELLO, *Geology*, 9, 1981, p. 474-479.
- [3] E. BONATTI, G. OTTONELLO et P. HAMLYN, *J. Geophys. Res.*, 91, 1986, p. 599-631.
- [4] D. BOSCH, L. BRIQUEU, J. R. LANCELOT et C. MEVEL, *Earth Planet. Sci. Lett.* (à paraître).
- [5] F. BOUDIER, A. NICOLAS, J. R. KIENAST et C. MEVEL, *Tectonophysics*, 10, 1988, p. 209-227.
- [6] M. T. MCCULLOCH, R. T. GREGORY, G. J. WASSERBURG et J. H. P. TAYLOR, *J. Geophys. Res.*, 86, 1981, p. 2721-2735.
- [7] R. CLOCHIATTI, O. MASSARE et C. JEHANNO, *Bull. Mineral.*, 104, 1981, p. 354-360.
- [8] P. AGRINIER, C. MEVEL et M. JAVOY, *Abstract 5th E.U.G.*, 1989, p. 202.
- [9] F. MARTINEZ et J. R. COCHRAN, *Tectonophysics*, 150, 1988, p. 1-32.
- [10] J. R. LANCELOT et D. BOSCH, *Earth Planet. Sci. Lett.* (sous presse).
- [11] J. L. BIRCK et C. J. ALLEGRE, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 392, 1978, p. 37-51.
- [12] P. RICHARD, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 31, 1976, p. 269-278.
- [13] D. BOSCH, *Thèse*, Univ. Montpellier-II, 1990, 225 p.
- [14] B. HAMELIN et C. J. ALLEGRE, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 91, p. 117-131.
- [15] E. J. DASH, C. E. HEDGE et J. DYMOND, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 1973, p. 177-183.
- [16] R. K. O'NIONS et R. J. PANKHURST, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 31, 1976, p. 255-261.
- [17] B. DUPRE, B. LAMBERT et C. J. ALLEGRE, *Nature*, 99, 1982, p. 620-622.
- [18] L. BRIQUEU et J. R. LANCELOT, *Geochi. Cosmoch. Acta*, 47, 1983, p. 191-200.

Laboratoire de Géochimie isotopique, U.R.A. n° 13-71,
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, U.M.II.,
place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05.