

Géochimie des îles et du plateau de Kerguelen

par Dominique Weis^(1,4,5), Sonia Doucet^(1,2), André Giret⁽²⁾, James Scoates^(1,4), Frederick Frey⁽³⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Isotopes, Pétrologie et Environnement, Université Libre de Bruxelles, CP 160/02, av. F. D. Roosevelt, 50, 1050 Bruxelles, Belgique

⁽²⁾ Laboratoire Magmas et Volcans, CNRS-UMR 6524, Université Jean Monnet, 23 rue du Docteur Paul Michelon, 42023 Saint-Etienne, France

⁽³⁾ Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

⁽⁴⁾ Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canada

⁽⁵⁾ Directeur de Recherches FNRS.

(d'après l'article publié dans *Géologues*, 2003, n°137, pp. 40-51)

L'archipel de Kerguelen se trouve sur la plaque antarctique à 1400 km de la ride sud-est indienne (SEIR) et appartient à la partie Nord du plateau de Kerguelen (NKP) formée il y a moins de quarante millions d'années, soit plus de soixante millions d'années après l'édification du plateau sud (SKP) d'âge Crétacé inférieur. La formation du plateau et celle de l'archipel sont attribuées à l'activité du panache de Kerguelen qui a également produit le plateau conjugué de Broken Ridge (BR) et la Ride de Quatre-Vingt dix degrés est (90E). Etudier l'origine de l'archipel de Kerguelen équivaut à s'intéresser aux derniers quarante millions d'années de l'activité du panache. Au cours de cet intervalle, le point chaud, initialement à l'aplomb de la ride sud-est indienne, c'est-à-dire dans une situation comparable à celle de l'Islande sur la ride médio-Atlantique, a évolué vers sa situation intra-plaque actuelle comparable à celle de Hawaii.

L'origine et l'évolution de cette île océanique s'intègrent dans une problématique plus large qui inclut la connaissance du plateau océanique de Kerguelen, l'une des plus grandes provinces magmatiques répertoriées à l'heure actuelle. Comme nous le verrons, les données géochimiques apportent un éclairage particulier aux interactions entre le magmatisme lié à la ride Est-Indienne et à celui qui résulte de l'activité du point chaud de Kerguelen. Cet exemple est d'autant plus intéressant que cette portion de l'océan Indien a été le siège d'une dynamique d'expansion très rapide.

1. Géochimie du Plateau de Kerguelen: la partie océanique

1.1. Structure du Plateau de Kerguelen

Le Plateau de Kerguelen, au sud de l'océan Indien, est une vaste surélévation topographique entourée par des bassins océaniques profonds (Figure 1). Essentielles pour la connaissance actuelle du plateau de Kerguelen, trois campagnes de forages (Leg 119, 120 et 183) ont été réalisées dans le cadre du programme ODP (Ocean Drilling Program) par le navire foreur "*Joides Resolution*". Le plateau de Kerguelen s'étend sur 2300 km entre 46° et 64° S selon un axe Nord Ouest – Sud Est qui atteint presque la marge continentale antarctique. Il a une largeur de 200 à 600 km et il surplombe de 2 à 4 km les bassins océaniques adjacents dont l'âge varie de l'Oligocène (~32 Ma) dans le nord, au début du Crétacé (~125 Ma,) dans le sud (Schlich & Wise, 1992).

Le plateau, divisé en deux domaines distincts (nord et sud, Munschy et Schlich, 1987), présente des zones de failles majeures parmi lesquelles le graben 77° E est la plus importante (Houtz *et al.*, 1977; Munschy *et al.*, 1993). Le magmatisme subaérien n'a été observé que dans les îles Kerguelen, Heard et McDonald, c'est-à-dire dans le secteur nord du plateau (~46°-54° S) qui est caractérisé par de faibles profondeurs d'eau (<1000 m) et par un volcanisme d'îles récent. Broken Ridge et la plupart de la partie

nord du Plateau de Kerguelen constituent de grandes provinces magmatiques qui étaient unifiées au Crétacé, et qui furent séparées par l'expansion de la ride Sud-Est Indienne (SEIR) pendant l'Eocène (Mutter et Cande, 1983). Ce secteur Nord du plateau a été subdivisé en deux parties : le plateau Nord (NKP), où émerge l'archipel de Kerguelen, et le plateau central (CKP) sur lequel se situent les îles Heard et Mc Donald. Outre sa complexité tectonique, la partie sud du Plateau de Kerguelen (SKP) se distingue de la partie nord (NKP) par des eaux profondes, 1500 à 2500 mètres, et par l'absence de volcanisme récent (Coffin *et al.*, 1986; Royer & Coffin, 1992; Könnecke & Coffin, 1994).

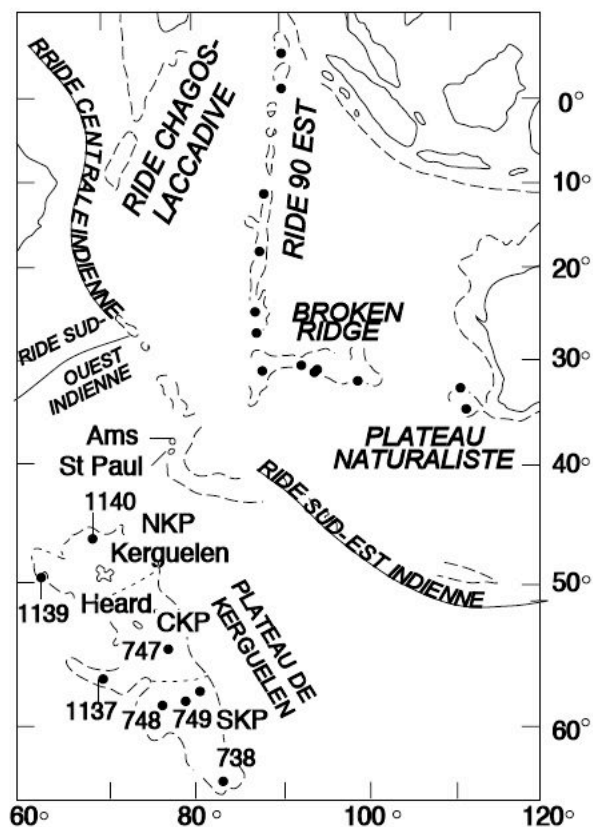


Figure 1

Carte simplifiée de l'océan Indien montrant les rides (Centrale, Sud-Ouest et Sud-Est) indiennes le plateau de Kerguelen, et les différents sites qui y ont été forés, la ride de quatre-vingt-dix degrés est, Broken Ridge, le Plateau Naturaliste et les îles Kerguelen, St. Paul, Amsterdam.

1.2. Ages

La plupart des plateaux océaniques résultent de l'éruption d'énormes volumes de magmas sur des intervalles de temps très courts, de l'ordre de 1 à 2 millions d'années, suivis par une production magmatique moins intense et constante sur des

intervalles de temps plus longs (Duncan & Richard, 1991).

La datation des basaltes du Plateau de Kerguelen (Leclaire *et al.*, 1987; Whitechurch *et al.*, 1992, Pringle *et al.*, 1994 ; Duncan, 2002) a montré que l'essentiel du plateau édifié au sud de $\sim 57^\circ$ S (SKP) s'est formé autour de 115 Ma. Les basaltes échantillonnés dans la partie centrale du Plateau de Kerguelen (CKP) révèlent un âge plus récent de ~ 100 Ma (Duncan, 2002), tandis que le plateau de Broken Ridge est daté à 95 Ma (Duncan, 2002). La partie Nord du plateau de Kerguelen (NKP) a été l'objet d'investigations plus récentes, au cours de la campagne ODP n°183 (1999); deux sites 1139 et 1140 du NKP ont été forés et les échantillons ont été datés à 68 et 34 Ma, respectivement (Duncan, 2002).

Les âges obtenus sur les roches des divers sites de forage indiquent que l'édification du plateau de Kerguelen s'est déroulée en une succession d'événements éruptifs très intenses qui s'échelonnent sur une période d'environ 25 Ma (120-95 Ma), ce qui est très long comparé aux modèles de formation des plateaux océaniques ($1-2 \cdot 10^6$ ans). L'importance des taux d'extraction de magma associés à l'activité du panache de Kerguelen de 120 à 95 Ma, ainsi que la présence de ces produits magmatiques en des lieux éloignés les uns des autres (Fig. 1), ont conduit Coffin *et al.* (2002) à l'hypothèse de l'existence de plusieurs panaches ou de celle d'un panache dichotomisé.

1.3. Géochimie des laves et caractères isotopiques des sources magmatiques

1.3.1. Des basaltes tholéïtiques atypiques

Les roches basaltiques associées à la longue activité magmatique du Panache de Kerguelen (119 Ma ; Wallace *et al.*, 2002) qui a produit le Plateau de Kerguelen (Figure 1), la ride de 90E et les laves de plateau de l'Archipel de Kerguelen lui-même, sont exclusivement tholéïtiques, bien qu'elles ne soient pas typiquement des basaltes de ride médio-océanique. Elles sont en effet caractérisées par une abondance en éléments incompatibles supérieures à celles des N-MORB (e.g., Davies *et al.*, 1989; Weis *et al.*, 1991; Frey *et al.*, 1991; Frey & Weis, 1995; Saunders *et al.*, 1991; Storey *et al.*, 1992; Weis *et al.*, 1992). Les

compositions tholéïtiques sont attribuées à des degrés de fusion relativement élevés (Kent & MacKenzie, 1994) et leurs paramètres isotopiques les rattachent au point chaud de Kerguelen. Cela suggère que le panache de Kerguelen a été une source de magma à flux important pendant une longue période à l'échelle des temps géologiques (~115 Ma). Toutefois le magmatisme du plateau et des îles Kerguelen se distingue des exemples classiques de point chaud par :

- le fait que les liquides riches en MgO et riches en olivine soient particulièrement rares dans l'archipel et n'aient pas encore été répertoriés dans les laves du plateau, alors qu'ils sont habituellement observés dans les produits magmatiques associés à des points chauds (e.g., La Réunion, Hawaï) et que l'on pourrait s'attendre à les trouver vu les degrés de fusion élevés des panaches à hautes températures (Storey *et al.*, 1991).

- l'absence, sur le Plateau de Kerguelen, de traces d'une ségrégation de liquides à des pressions relativement élevées, dans le domaine de stabilité du grenat (Frey *et al.*, 1991), ce qui contraste avec les laves tholéïtiques constituant les boucliers hawaïens (Rhodes & Hart, 1995).

1.3.2. Des compositions isotopiques qui reflètent des interactions de différentes sources

1.3.2.1. Prédominance du panache de Kerguelen

Les rapports isotopiques Sr et Nd des laves récupérées par draguage ou par forage et provenant du Plateau de Kerguelen sont hétérogènes, différents de ceux des laves de la ride sud-est indienne (SEIR). Chaque site de forage sur la ride 90E (Weis & Frey, 1991 ; Frey *et al.*, 1991 ; Frey & Weis, 1995) et sur le Plateau de Kerguelen (Storey *et al.*, 1992; Mahoney *et al.*, 1995 ; Frey *et al.*, 2000 a ; Weis & Frey., 2002 ; Frey *et al.*, 2002a ; Kieffer *et al.*, 2002) définit un champ isotopique distinct dans un diagramme Nd-Sr. Excepté le site 738 sur le plateau Sud qui a des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevés, les compositions des basaltes du plateau intersectent toutes le champ plus grand défini par des laves de moins de 40 Ma de l'Archipel de Kerguelen et de l'île de Heard (Weis *et al.*, 1989 a; 1998 a & b ; 2002 ; Storey *et al.*, 1992), montrant ainsi une influence dominante du panache de Kerguelen (Figure 2). Cette gamme de signatures isotopiques est interprétée comme reflétant différents

degrés d'interaction entre le composant enrichi représentatif du Panache de Kerguelen, identifié dans tous les cas, et d'autres composants qui s'expriment de manière tout à fait locale dans les différents sites du Plateau de Kerguelen.

1.3.2.2. Interaction du panache de Kerguelen avec la croûte continentale: Sites 738, 747, 1137

Les basaltes du site ODP 738 (localisation Figure 1) à l'extrémité sud du plateau ont des caractéristiques géochimiques atypiques pour des laves océaniques. Ces laves ont en effet des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ très élevés, des rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ bas et des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ élevés qui accompagnent des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ relativement bas (Mahoney *et al.*, 1995). Bien que la densité d'échantillonnage soit limitée, Mahoney *et al.* (1995) montrent que les laves situées sur le plateau le plus proche des marges continentales (e.g., Site 738 du SKP, certaines laves orientales de Broken Ridge, et les laves du Plateau Naturaliste en Australie occidentale) ont les caractéristiques isotopiques les plus extrêmes (entre autres, $-7 < \epsilon_{\text{Nd}} < -13$) accompagnées d'un appauvrissement relatif en Nb et Ta et des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ relativement élevés. Ces caractères géochimiques sont attribués à l'implication d'un composant de la lithosphère continentale (Mahoney *et al.*, 1995 ; Storey *et al.*, 1989) qui fut particulièrement impliqué dans la genèse du volcanisme le plus ancien qui s'est déclenché en bordure du plateau de Kerguelen-Broken Ridge.

Les témoignages géochimiques de l'implication de ce composant continental sont tout à fait cohérents avec les conclusions obtenues à l'issue des investigations géophysiques menées dans la partie la plus méridionale du plateau (SKP), ce qui suggère que ce dernier est un fragment de marge passive (Schlich *et al.*, 1993; Operto et Charvis, 1995). Vu l'intérêt et la diversité des échantillons récoltés lors du Leg ODP 183, un ré-échantillonnage des carottes des Leg 119 et 120 a été entrepris afin d'optimiser la couverture géographique de l'étude du plateau de Kerguelen. Cette étude géochimique et isotopique montre que lors de la formation de la partie crétacée du plateau, juste après la fragmentation de Gondwana, les magmas tholéïtiques provenant de la fusion du panache de Kerguelen ont été contaminés par de la croûte continentale supérieure au site 738 et par de la croûte continentale inférieure au

site 747 (localisation Figure 1). Il s'agit vraisemblablement de lambeaux crustaux résultant du démantèlement du continent Gondwana (Frey *et al.*, 2002a).

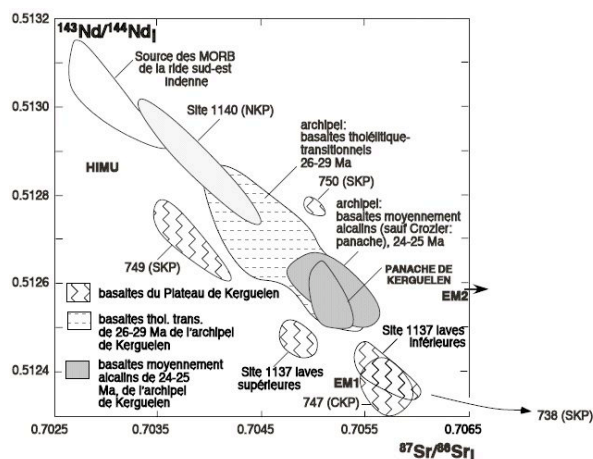


Figure 2

Diagramme des rapports isotopiques du Néodyme en fonction du Strontium pour les basaltes de l'archipel de Kerguelen (les basaltes tholéïtiques à transitionnels de plus de 26 Ma sont représentés avec un figuré différent de celui des basaltes moyennement alcalins de 24-25 Ma) (Weis *et al.*, 1993; Yang *et al.*, 1998; Frey *et al.*, 2000b, 2002b; Doucet *et al.*, 2002a), pour les basaltes forés sur le plateau de Kerguelen (Sites 1140, 1137, 738, 747, 759, 750) (Weis & Frey, 2002; Ingle *et al.*, 2002a; Mahoney *et al.*, 1995; Frey *et al.*, 2002a), et les basaltes de la ride sud-est indienne à proximité du point chaud de Kerguelen (Mahoney *et al.*, 2002). NKP, CKP et SKP signifient que les sites appartiennent au plateau Nord, Centre et Sud, respectivement.

La datation (U-Pb et Ar-Ar) des échantillons de gneiss à biotite et à grenat récupérés de façon inattendue sous forme de galets dans un conglomérat fluviatile intercalé dans les basaltes du Banc de l'Elan (Site 1137, localisation Figure 1) a fourni des âges protérozoïques qui impliquent une origine à partir des continents qui entouraient l'embryon de l'océan Indien il y a 110 Ma (Nicolaysen *et al.*, 2001). La composition en éléments majeurs, en éléments traces ainsi que la composition isotopique des éléments de ce conglomérat fluviatile démontrent les affinités de ce gneiss avec les roches crustales indiennes, et suggère que de la croûte continentale a été dispersée au sein de la lithosphère océanique indienne pendant la rupture du Gondwana (Ingle *et al.*, 2002a). D'autre part, l'étude géochimique et isotopique détaillée des basaltes du banc de l'Elan a permis d'établir le rôle de la contamination crustale dans ces laves ainsi que son évolution en fonction de l'âge et de la distance aux

continents. En particulier les similitudes avec les basaltes de plateau continentaux du Rajmahal en Inde et de Bunbury en Australie impliquent un rôle majeur du panache de Kerguelen lors de la dislocation du Gondwana (Ingle *et al.*, 2002b).

1.3.2.3. Interaction entre le panache de Kerguelen et la SEIR : ODP Site 1140

Les basaltes du site 1140, typiquement océaniques et qui se sont épanchés alors que la SEIR n'aurait été qu'à seulement 50 km de son site originel (Wallace *et al.*, 2002), ont des caractéristiques chimiques qui démontrent un mélange entre le composant enrichi, représentatif du panache de Kerguelen (Weis *et al.*, 1998, 2002) et la source des basaltes (N-MORB) de la SEIR, et qui témoignent d'une interaction panache/ride importante à 34 Ma (Weis & Frey, 2002).

1.3.2.4. Le Skiff Bank : ODP Site 1139

Le Skiff Bank, échantillonné au site 1139, représenterait un volcan bouclier qui s'est construit sur le plateau préexistant (Kieffer *et al.*, 2002). Ses compositions en éléments majeurs, traces et isotopes attestent de l'implication du panache de Kerguelen dans sa genèse, en revanche son âge de 68 Ma implique que le panache de Kerguelen ne peut être localisé en-dessous du Skiff Bank comme certaines reconstructions de l'océan Indien semblaient l'indiquer précédemment. Cette observation est en accord avec une étude récente des monts sous marins entre Heard et Kerguelen (Weis *et al.*, 2002).

2. L'archipel de Kerguelen: partie émergée

2.1. Généralités La place des études géochimiques dans la connaissance géologique de l'archipel

Bien que la plupart des basaltes du plateau de Kerguelen traduisent un volcanisme sub-aérien, excepté dans la partie Nord du plateau où le site 1140 est une succession de basaltes en coussins typiquement représentatifs d'éruptions sous-marines, les îles de Kerguelen, Heard et MacDonald dans la partie nord du plateau (NKP) sont les seules manifestations typiquement aériennes qui soient associées au panache de Kerguelen. L'île Heard est caractérisée par un

volcanisme récent et le magmatisme associé à cette île a été étudié par Barling et Goldstein (1990), Barling *et al.* (1994).

L'archipel Kerguelen, qui est parmi la plus récente expression du panache de Kerguelen, est le troisième plus grand complexe d'îles océaniques, 6500 km² (vs. 103.000 km² pour l'Islande et 10.500 km² pour la grande île de Hawaii), et représenterait approximativement un tiers de la durée de vie du panache. Il est situé dans la partie océanique de la plaque antarctique, au centre d'un triangle formé par les rides sud-est indienne et sud-ouest indienne et par le continent antarctique au sud-est. L'archipel présente 2.800 km de côtes et est constitué de 400 îles dont la

plus grande représente plus de 90% de la surface totale (Figure 3).

L'archipel de Kerguelen est bien connu, en particulier grâce à la présence de roches plutoniques allant des gabbros aux granites et aux syénites néphéliniques (Watkins *et al.*, 1974; Giret & Lameyre, 1983; Giret, 1990; Weis & Giret, 1994). Cependant, la formation géologique dominante (>80% de la surface) est une épaisse séquence de coulées basaltiques, décrites dans la littérature comme des basaltes de plateau (ou traps) qui affleurent sous forme de puissants empilements (0.4 à 3 km), découpés par l'action des glaciers. Les ensembles basaltiques ont un

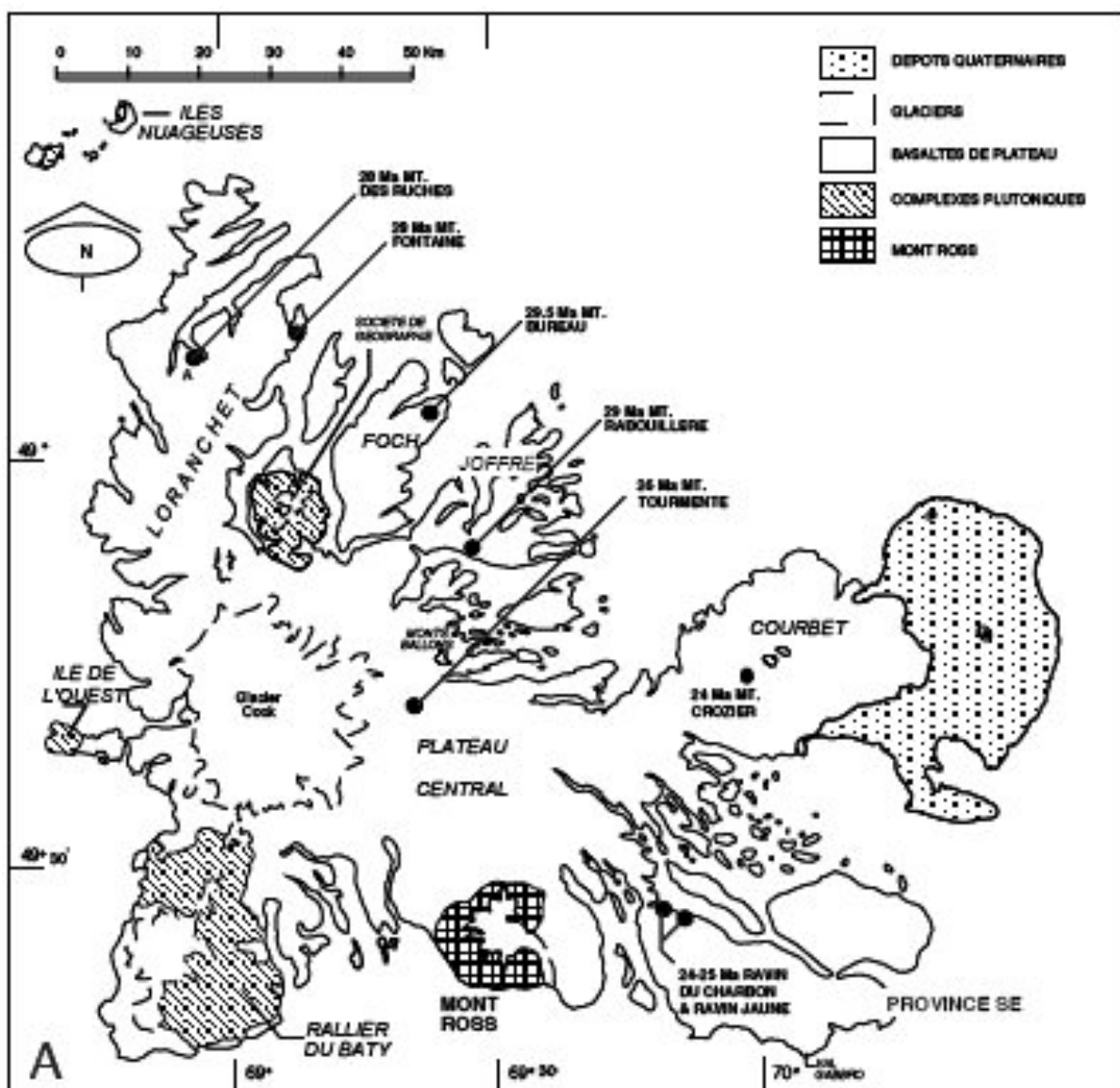


Figure 3

Carte de l'archipel modifiée d'après Nougier (1970) montrant que 85% de la surface de l'archipel est recouverte de basaltes de plateau (flood basalts) tandis que 5% de la surface est représentée par des complexes volcano-plutoniques et 10% de glaciers et dépôts quaternaires.

pendage d'environ 5° vers le Sud-Est (Giret *et al.* , 1992) qui s'observe sur toute la surface de l'archipel excepté à proximité des complexes plutoniques qui provoquent des déformations structurales locales.

Avant les années quatre-vingt dix, l'étude des laves réalisée sur des suites d'échantillons de reconnaissances, prélevés sur toute la surface de l'archipel (Watkins *et al.* , 1974, Storey *et al.* , 1988; Gautier , 1987, Gautier *et al.*, 1990; Weis *et al.* , 1993), a permis d'élaborer les premières hypothèses sur une évolution temporelle de la composition des laves de l'archipel. Depuis plus de dix ans, le programme de Cartographie (CartoKer: l'Université de Saint-Etienne / IPEV), a permis de tester ces premières hypothèses par l'étude pétrologique et géochimique détaillée d'un échantillonnage systématique de toutes les coulées d'empilements remarquables (Figure 3) (Gautier *et al.* , 1990; Weis *et al.* , 1993 ; 1998a ; Yang *et al.* , 1998; Frey *et al.* , 2000b; 2002b; Damasceno *et al.* , 2002 ; Doucet *et al.* , 2002a). D'autre part des systèmes particuliers, tel que le volcan Ross (sommet à 1850 m), qui représente l'activité la plus récente sur l'archipel de Kerguelen (< 0.1 Ma) ont pu être étudiés en détail (Giret *et al.*, 1988; Weis *et al.*, 1998b).

Les vitesses d'expansion de la ride sud-est-indienne (SEIR) (Royer & Sandwell, 1989) indiquent que l'archipel de Kerguelen coïncidait avec cette dorsale océanique il y a 40.1 Ma. Il a ensuite évolué vers sa position intraplaque actuelle, c'est-à-dire à 1400 km de la SEIR par éloignement relatif de cette dernière vers le Nord-Est. L'activité magmatique dans l'Archipel de Kerguelen se serait produite de ~40 à 0 Ma, avec des taux d'éruption maximum au cours de l'intervalle de temps 29 à 23 Ma (e.g., Nicolaysen *et al.*, 2000).

Les basaltes de plateau ont été datés par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 29 et 24 Ma (Yang *et al.* , 1998 ; Nicolaysen *et al.* , 2000 ; Doucet *et al.* , 2002a). Ces âges suggèrent que la mise en place des basaltes n'a duré que cinq millions d'années et qu'elle s'est déroulée pendant que la SEIR s'éloignait de ~225 à ~400 km de l'archipel, pour un demi-taux d'expansion de l'ordre de 35 mm.an⁻¹.

2.2. Géochimie et rapports isotopiques: la connaissance du manteau de ce secteur de l'océan Indien

2.2.1. Roches plutoniques

Les études isotopiques initiales de l'Archipel de Kerguelen ont été focalisées sur les roches plutoniques à cause de leur présence inattendue dans un environnement océanique. Elles ont démontré que ces roches grenues s'étaient formées par cristallisation à partir des mêmes sources magmatiques enrichies que les basaltes (Dosso *et al.* , 1979; Dosso & Murthy, 1980; Weis & Giret, 1994). Ces roches, souvent cumulatives, ne peuvent généralement pas être considérées comme représentatives de liquides magmatiques et on leur préfère les basaltes pour aborder les questions relatives à la fusion et à la composition du manteau.

2.2.2. Basaltes de plateau

Les premières études géochimiques et isotopiques sur les basaltes ont mis en évidence une augmentation de l'alcalinité (Figure 4) et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et une diminution des rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ en fonction de l'âge qui serait liée à l'évolution de l'environnement tectonique de l'archipel, initialement centré sur la ride lors de sa formation et actuellement en position intraplaque. Cela serait également lié à une diminution de l'influence des matières appauvries (composant de type MORB) dans les magmas dérivés du panache (Storey *et al.* , 1988; Gautier *et al.*, 1990).

Les études détaillées des sections basaltiques menées au cours de ces dix dernières années montrent en effet une distribution de l'alcalinité des basaltes sur l'archipel selon une organisation non seulement géographique mais aussi temporelle (Figure 4). Les basaltes les plus anciens sont caractérisés par un volcanisme de type tholéïitique-transitionnel cantonné au Nord - Nord Ouest jusqu'à 26 Ma tandis que les basaltes plus récents sont caractérisés par un volcanisme de type moyennement alcalin que l'on enregistre uniquement dans la partie sud est de

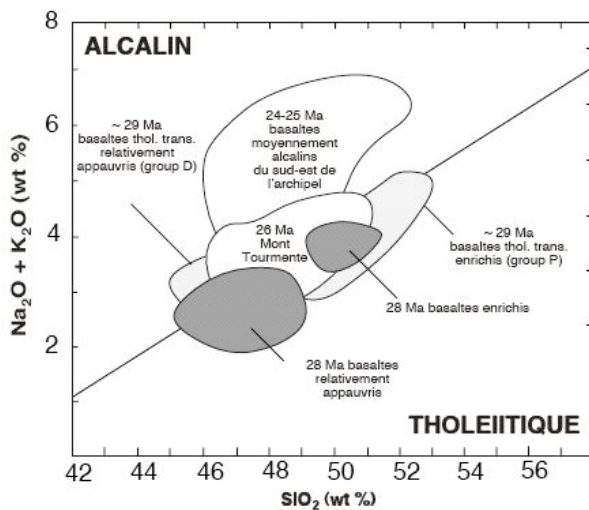


Figure 4

Diagramme $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (pourcentage en poids d'oxyde) en fonction de SiO_2 , exprimant le caractère tholéiitique à transitionnel des basaltes de l'archipel plus anciens qui se sont épanchés il y a 26 à 29 Ma, précédant le caractère moyennement alcalin des basaltes plus récents, formés il y a 24-25 Ma.

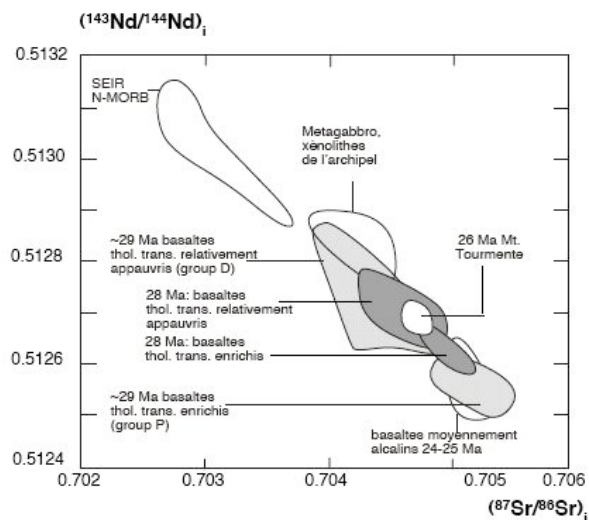


Figure 5

Diagramme des rapports isotopiques du Néodyme en fonction du Strontium pour les basaltes de l'archipel de Kerguelen avec un niveau de gris différent pour chaque section étudiée, et un champ différent pour les laves à caractère dit "enrichi", ou "appauvri". Références cf. Fig. 2.

L'archipel et après 26 Ma. Les basaltes tholéiitiques transitionnels de plus de 26 Ma ont un rapport Nb/Zr relativement faible de 0.10, proche de la gamme des valeurs des N-MORB, tandis que les basaltes moyennement alcalins les plus récents ont un rapport plus enrichi de 0.15 qui reflète clairement une caractéristique de la source du panache de Kerguelen comme le confirme les données isotopiques. L'évolution temporelle des compositions chimiques

dans les sections de basaltes de plateau de l'archipel de Kerguelen, depuis des compositions tholéiitiques-transitionnelles vers des compositions alcalines reflète, avec un enrichissement correspondant en terres rares légères, une diminution de l'apport de magma (Frey *et al.*, 2000b). Les deux sections de la Province du SE, le Ravin Jaune et le Ravin du Charbon (Figure 3), montrent distinctement ces caractéristiques. Les compositions isotopiques de ces laves alcalines indiquent une origine à partir du panache de Kerguelen sans contribution significative par d'autres composants mantelliques ou lithosphériques.

Au Nord-Ouest, l'étude de deux séquences stratigraphiques des basaltes de plateau constituant la croûte supérieure (Mt. Bureau et Rabouillère, Figure 3, Yang *et al.*, 1998) a abouti à une révision de cette interprétation puisque les laves tholéiitiques-transitionnelles de ces séquences présentent toute la gamme des rapports isotopiques Sr et Nd observés sur l'archipel (Figure 5). Ceci montre qu'il n'y a pas de tendance temporelle systématique dans la variation des proportions entre la composante de type « basaltes de ride médio-océanique (MORB) » et celle de la source du panache. D'autre part, les coulées relativement appauvries présentes dans ces deux sections sont interprétées comme reflétant l'interaction de ces laves avec un niveau de cumulat à plagioclase de la croûte océanique formée il y a 40 Ma, puis incorporé dans le panache.

L'étude récente de deux sections basaltiques situés au Nord-Ouest de l'archipel, Mont des Ruches et Mont Fontaine (Figure 3), datés à 28 Ma (Doucet *et al.*, 2002a), montre la plus large gamme de variations isotopiques enregistrée sur l'archipel. Pour expliquer l'hétérogénéité de ces basaltes (présence à la fois de compositions enrichies de type panache et de compositions moins enrichies, reflétant un mélange entre le composant enrichi du panache et la source des MORB de la SEIR), Doucet *et al.* (2002a) proposent un processus de mélange impliquant un flux bi-directionnel dans un conduit sublithosphérique provoquant un mélange de manteau appauvri localisé sous l'axe de la ride sud-est indienne et de source enrichie représentative du panache de Kerguelen (Doucet *et al.*; 2002a).

L'étude d'une succession de basaltes localisée dans la partie centrale de l'archipel, Mt. Tourmente, datée à 26 Ma (Frey *et al.*, 2002b) montre la transition d'un volcanisme tholéitique - transitionnel à la base vers un volcanisme moyennement alcalin au sommet. Les basaltes du Mont Tourmente sont caractérisés par des compositions isotopiques et géochimiques très homogènes, intermédiaires entre celles des basaltes tholéitiques les plus appauvris du nord de l'archipel et celles des séries alcalines du sud-est. Ces compositions sont cohérentes avec l'âge de ce volcan et avec l'hypothèse d'une augmentation de la profondeur de fusion associée à une diminution du degré de fusion avec le temps dans les basaltes de l'archipel. D'autre part, les variations isotopiques extrêmement limitées de ces basaltes du Mt. Tourmente, comparées aux autres sections de l'archipel conduisent Frey *et al.* (2002b) à suggérer, comme cela a pu être démontré dans le cas du panache Islandais (Fitton *et al.*, 1997 ; Kempton *et al.*, 2000), que l'homogénéité même de ces laves et leur composition isotopique reflète l'existence d'un composant appauvri, intrinsèque au panache de Kerguelen. Cette hypothèse est discutée par Doucet *et al.* (2002a) qui proposent au contraire que la composition relativement appauvrie et homogène des basaltes du Mt. Tourmente représenterait un simple mélange de magmas provenant des mêmes sources, enrichies (panache de Kerguelen) et appauvries (ride SE indienne). Ces mêmes sources, déjà exprimées dans les sections les plus anciennes (28-29 Ma), auraient ici produit des magmas ayant eu le temps et l'opportunité de s'homogénéiser dans une zone de stockage magmatique, avant l'éruption.

Une étude approfondie des basaltes et autres laves plus différenciées de l'archipel bien représentées par les laves du Mont Ross (point culminant de l'archipel à 1850 m) qui représente l'activité volcanique la plus récente (< 200.000 ans) a été menée afin de discuter de la composition du panache de Kerguelen (Weis *et al.*, 1993, 1998). Les résultats de cette étude confirment la composition proposée pour le composant enrichi représentatif du panache de Kerguelen ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7050$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.5127$, Figure 5) et permettent également une approche quantitative des processus de différenciation dans les chambres magmatiques océaniques conduisant à la formation de trachytes et autres roches différenciées.

D'après les interprétations précédentes, il est cohérent de dire que les compositions isotopiques dominantes enregistrées sur l'archipel représentent les caractéristiques isotopiques du Panache de Kerguelen lui-même; il n'y a aucun témoignage évident de l'existence d'un composant de lithosphère continentale dans la source des laves de l'Archipel de Kerguelen.

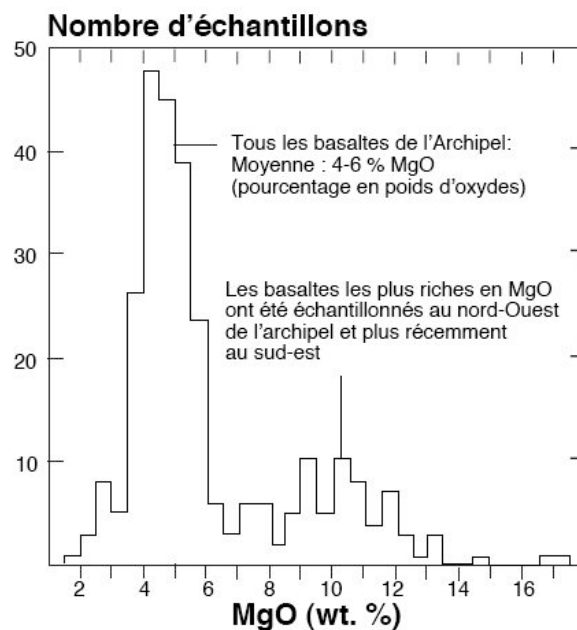


Figure 6

Histogramme de la distribution des basaltes de l'archipel de Kerguelen en fonction de leur composition en MgO (pourcentage en poids d'oxyde). Ce diagramme montre que l'essentiel des basaltes de l'archipel de Kerguelen a une composition moyenne de 4 à 6 % MgO, ce qui est très peu par rapport à d'autres îles océaniques comme par exemple Hawaï.

Le Mont Crozier est la section la plus importante en développement vertical (1000 m) qui ait été étudiée. C'est également la succession basaltique la plus récente enregistrée sur l'archipel. Le Mont Crozier a des compositions isotopiques en plomb indiquant une origine à partir du panache de Kerguelen sans contamination par de la croûte continentale ou la lithosphère (correspondant au plateau de Kerguelen). Il représente donc une occasion unique d'étudier les caractéristiques du panache (Weis *et al.*, 1998, 2002). D'autre part, la modélisation P-T des conditions de formation de ces laves, grâce à l'étude minéralogique des phénocristaux particulièrement abondants dans cette section basaltique de l'archipel a permis d'apporter les premières contraintes quant à l'environnement de cristallisation des phénocristaux, c'est-à-dire, la profondeur à laquelle les magmas se

concentrent, en l'occurrence à la limite lithosphère/manteau (Damasceno *et al.*, 2002). Par ailleurs, les larges variations en composition des phénocristaux de plagioclase et de pyroxène apportent des informations quant aux processus de fractionnement et de mélange de différentes venues de magma dans la chambre magmatique.

Les datations Ar-Ar (Nicolaysen *et al.*, 2000) de chacune des sections étudiées de l'archipel indiquent que leur durée de mise en place est toujours inférieure au million d'années, ce qui est très rapide à l'échelle des temps géologiques. La dynamique et la cinétique des échanges entre le panache de Kerguelen, qui apporte du matériel dérivant du manteau inférieur, et le réservoir appauvri (SEIR), alimenté par le manteau supérieur, sont ainsi documentées précisément. Les liquides riches en MgO et riches en olivine sont particulièrement rares aux Kerguelen (figure 6) et à ce jour n'ont pas été répertoriés dans les laves du plateau de Kerguelen. De rares exemples ont cependant été observés dans la partie Nord-Ouest de l'archipel de Kerguelen (Yang *et al.*, 1998 ; Doucet *et al.*, 2002a) et plus récemment, à l'état de blocs de basaltes riches en MgO (6-10 wt.% MgO) ou de picrites (13-17 wt.% MgO), dans le Sud-Est de l'archipel (mission Cartoker 1999-2000). Leur genèse, vraisemblablement commune d'après leur composition en majeur, traces et isotopes, associée à leur présence rare mais systématique sur de longues distances (~ 50 km), suggère que ces basaltes riches en MgO et ces picrites proviennent à l'origine de coulées de laves importantes, tant en épaisseur qu'en extension horizontale (Doucet *et al.*, 2002b).

2.2.3. Les enclaves basiques et ultrabasiques

Des études géochimiques et pétrologiques récentes des xénolites basiques et ultrabasiques échantillonnés dans les laves alcalines de la partie Sud-Est de l'archipel (Grégoire *et al.*, 1994; Mattielli *et al.*, 1996; Mattielli, 1996) ont montré de très larges variations pétrographiques associées à de grandes variations de compositions. Un travail sismique détaillé a été effectué dans l'archipel et le Plateau de Kerguelen (Recq *et al.*, 1994; Charvis *et al.*, 1995; Operto et Charvis, 1995) et les vitesses des ondes sismiques suggèrent que la croûte inférieure aurait une

composition semblable à celle des xénolites basiques (Grégoire *et al.*, 2001).

La majorité de ces xénolites basiques sont d'anciens cumulats (Grégoire *et al.*, 1995; Mattielli, 1996) qui ont enregistré des températures et des pressions élevées correspondant à un métamorphisme de faciès granulite (Grégoire *et al.*, 1994). La mise en évidence du rôle que ces cumulats a pu jouer dans l'appauvrissement en MgO des laves de l'archipel (Marsh, 1995) nécessite de démontrer la relation cogénétique de ces deux groupes de roches, ce que la géochimie isotopique est la seule à pouvoir faire. Les caractéristiques isotopiques de la plupart des xénolites témoignent de l'influence du Panache de Kerguelen qui se traduit par des processus métasomatiques comme cela a été mis en évidence dans les xénolites de type dunite et harzburgite. Un échantillon xénolitique, unique jusqu'à présent, montre clairement une signature de lithosphère continentale.

Les caractères isotopiques des enclaves basiques et ultrabasiques des îles Kerguelen reflètent les deux sources qui ont été mises en évidence dans les basaltes, l'une de type tholeiitique-transitionnel, l'autre alcaline. Toutefois des processus métasomatiques mantelliques ont imprimé la marque du panache de Kerguelen que l'on retrouve dans la quasi totalité des enclaves de dunites et harzburgites, et celle d'une lithosphère continentale qui a été clairement définie dans un échantillon, unique jusqu'à présent. Mattielli *et al.* (1999) ont montré que parmi l'arsenal isotopique dont on dispose, seule la géochimie isotopique du plomb permettait de déceler l'origine du métasomatisme; en l'occurrence, pour les xénolites mantelliques des îles Kerguelen, il s'agit de métasomatisme induit, plus généralement par un manteau alcalin et carbonatitique correspondant au panache de Kerguelen, ou, plus exceptionnellement, par un fragment de lithosphère continentale ancienne (1,2 Ga).

3. Les Monts sous marins qui relient l'archipel de Kerguelen et l'île Heard, témoins d'un début de recyclage de la jeune lithosphère océanique.

Les monts sous-marins situés entre les îles Heard et Kerguelen ont été datés à 18-20 Ma. Ils présentent des compositions isotopiques comparables à celles qui ont été définies dans les séries alcalines de l'archipel de Kerguelen, c'est-à-dire qu'ils ont les caractéristiques du panache de Kerguelen. Ces hauts fonds volcaniques correspondent donc à la trace tertiaire du panache de Kerguelen (Weis *et al.*, 2002).

Parmi les échantillons dragués, des basaltes picritiques ont été sélectionnés pour une étude thermobarométrique et géochimique des inclusions fluides et vitreuses des phénocristaux d'olivine. Borisova *et al.* (2002) ont ainsi établi que :

- 1) le magma parental a cristallisé de façon polybarique, d'abord entre 2 et 4 Kbars, puis à des pressions inférieures à 1 kbar qui correspondent à des profondeurs superficielles,
- 2) la genèse de ces picrites résulte d'un mélange binaire entre un liquide riche en potassium, dérivé de la fusion du panache de Kerguelen et un liquide subalcalin dérivé de la fusion du plateau de Kerguelen (lithosphère).

4. Conclusions

Un échantillonnage suffisamment fin a permis la caractérisation géochimique de la composition enrichie actuelle du panache de Kerguelen. Par ailleurs les résultats principaux obtenus aux cours des trois programmes de forage ODP leg 119, 120, 183 ont permis d'établir le rôle du panache de Kerguelen dans la formation de l'océan Indien, c'est-à-dire depuis la rupture du Gondwana et dans la présence d'anomalies géochimiques spécifiques à cet océan. L'extrême hétérogénéité géochimique et isotopique des basaltes du plateau de Kerguelen et, à une autre échelle, celle de l'archipel lui-même, témoignent de l'évolution géotectonique tout à fait exceptionnelle rencontrée par le panache au cours de sa longue existence (>120 Ma). Les laves et les basaltes du plateau et de l'archipel de Kerguelen témoignent de mélanges, en proportions

variables, du panache avec différents réservoirs géochimiques depuis la fragmentation du Gondwana, il y a ~130 Ma. D'abord à proximité d'une dorsale lors de la migration rapide de l'Inde vers le nord, le nord du plateau de Kerguelen coïncide ensuite avec l'axe de la ride sud-est Indienne, pour se situer enfin à sa position actuelle, franchement intraplaque. Le panache est apparemment aujourd'hui localisé sous l'archipel, ou juste au sud.

Malgré l'échelonnement des âges enregistrés il apparaît évident que le plateau de Kerguelen a été édifié en plusieurs étapes correspondant à d'importantes périodes éruptives impliquant la mise en place de grands volumes de magma dans des intervalles de temps relativement courts. La partie sud du Plateau de Kerguelen s'est formée vers ~120-110 Ma, la partie centrale du plateau et Broken Ridge vers ~100-95 Ma, une grande partie de l'Archipel de Kerguelen et la portion la plus au nord du Plateau de Kerguelen entre 30 et 24 Ma. L'échantillonnage par forage en d'autres sites à travers le plateau est nécessaire pour déterminer si la formation de cette Grande Province Magmatique (LIP : pour Large Igneous Province) a été réellement épisodique ou s'il y a eu une diminution continue de l'activité volcanique en fonction de l'âge du sud vers le nord ou en d'autres termes si le panache de Kerguelen est en voie d'extinction.

Bibliographie

- Barling, J., Goldstein, S.L., 1990** : Extreme isotopic variations in Heard Island lavas and the nature of mantle reservoirs. *Nature*, v. 348, pp. 59-62.
- Barling, J., Goldstein, S.L., and Nicholls, I.A., 1994** : Geochemistry of Heard Island (Southern Indian Ocean): characterization of an enriched mantle component and implications for enrichment of the sub-Indian Ocean mantle. *Journal of Petrology*, v. 35, pp. 1017-1053.
- Borisova A.Y., Nikogosian I.K., Scoates J.S., Weis D., Damasceno D., Shimizu N., Touret J.L., 2002** : Melt, fluid and crystal inclusions in olivine phenocrysts from Kerguelen plume-derived picritic basalts: evidence for interaction with the Kerguelen Plateau lithosphere. *Chem. Geol.*, v. 183, pp. 195-220.
- Charvis, P., Recq, M., Operto, S., and BREFORT, D., 1995** : Deep structure of the northern Kerguelen Plateau and hotspot-related activity. *Geophys J Int*, v. 122, pp. 899-924.

- Coffin, M.F., Davies, H.L., Haxby, W.F., 1986** : Structure of the Kerguelen Plateau province from Seasat altimetry and seismic reflection data. *Nature*, v. 324, pp. 134-136.
- Coffin, M. F., Pringle, M. S., Duncan, R. A., Gladczenco, T. P., Storey, M., Müller, R. D., Gahagan, L. A., 2002** : Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1121-1139.
- Damasceno D., Scoates, J. S., Weis, D., Frey, F. A., Giret, A., 2002** : Mineral chemistry of mildly alkalic basalts from the 25 Ma Mont Crozier section, Kerguelen Archipelago: constraints on phenocrysts crystallization environments. *J. Petrol.*, v. 43, p. 1389-1413.
- Davies, H.L., Sun, S.-s., Frey, F.A., Gautier, I., McCulloch, M.T., Price, R.C., Bassias, Y., Klootwijk, C.T., Leclaire, L., 1989** : Basalt basement from the Kerguelen Plateau and the trail of a Dupal plume. *Contr. Mineral. Petrol.*, v. 103, pp. 457-469.
- Dosso, L., Murthy, V.R., 1980** : A Nd isotopic study of the Kerguelen Islands: inferences on enriched oceanic mantle sources. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 48, pp. 268-276.
- Dosso, L., Vidal, P., 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.*, v. 43, pp. 46-60.
- Doucet, S., Scoates, J. S., Weis, D., Giret, A., 2002b** : High-MgO basalts and picrites from the Kerguelen Archipelago: inferences for the composition of the Kerguelen mantle plume. *Goldschmidt Conference, Davos*.
- Doucet, S., Weis, D., Scoates, J. S., Nicolaysen, K., Frey, F. A., Giret, A., 2002a** : The depleted mantle component in Kerguelen Archipelago basalts: petrogenesis of tholeiitic-transitional basalts from the Loranchet Peninsula. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1341-1366.
- Duncan, R., 2002** : A time frame for construction of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1109-1119.
- Duncan, R. A., Richards, M. A., 1991** : Hotspots, mantle plumes, flood basalts, and true polar wander. *Reviews of Geophysics*, v. 29, pp. 31-50.
- Fitton, J. G., Saunders, A. D., Norry, M. J., Hardarson, B. S., Taylor, R. N., 1997** : Thermal and chemical structure of the Iceland plume. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 153, pp. 197-208.
- Frey, F. A., Coffin, M. F., Wallace, P. J., Weis, D., et al. , 2000a** : Origin and evolution of a submarine large igneous province: the Kerguelen Plateau and Broken Ridge, southern Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 176, pp. 73-89.
- Frey, F.A., Jones, W.B., Davies, H., Weis, D., 1991** : Geochemical and petrologic data for basalts from Sites 756, 757, and 758: implications for the origin and evolution of Ninetyeast Ridge. in *Weissel, J., Peirce, J., Taylor, E., Alt, J., et al. , eds., Proc. ODP Sci. Results, 121, Volume 121: College Station, TX, Ocean Drilling Program, pp. 611-659*.
- Frey F.A., Nicolaysen K., Kubit B.K., Weis D. and Giret A., 2002b.** : Flood basalts from Mont Tourmente in the Central Kerguelen Archipelago: the change from tholeiitic/transitional to alkalic basalts at ~25 Ma, *Jour. Petrol.* 43, pp. 1367-1387.
- Frey, F.A., Weis, D., 1995** : Geochemical constraints on the origin and evolution of the Ninetyeast Ridge: a 5000 km hotspot trace in the eastern Indian Ocean. *Contr. Mineral. Petrol.*, v. 121, pp. 18-28.
- Frey, F. A., Weis, D., Borisova, A. Y., Xu, G., 2002a** : Involvement of continental crust in the formation of the Cretaceous Kerguelen Plateau : new perspectives from ODP Leg 120 sites. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1207-1239.
- Frey, F. A., Weis, D., Yang, H-J., Nicolaysen, K., Leyrit, H. & Giret, A., 2000b** : Temporal geochemical trends in the Kerguelen archipelago basalts: evidence for decreasing magma supply from the Kerguelen plume. *Chemical Geology*, v. 164, pp. 61-80.
- Gautier, I., 1987** : Les basaltes des îles Kerguelen (T.A.A.F.). [Unpublished Ph.D. dissertation], Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 383p.
- Gautier, I., Weis, D., Mennessier, J.-P., Vidal, P., Giret, A., Loubet, M., 1990** : Petrology and geochemistry of Kerguelen basalts (South Indian Ocean): evolution of the mantle sources from ridge to an intraplate position. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 100, pp. 59-76.
- Giret, A., 1990** : Typology, evolution and origin of the Kerguelen plutonic series, Indian Ocean: a review. *Geol Journal*, v. 25, p. 239-247.
- Giret, A., Chotin, P., Verdier, O., 1988** : Des laves aux roches plutoniques : exemple du Mont Ross, îles Kerguelen. *C. R. Acad. Sci. Paris, 306, II*, pp. 381-386
- Giret, A., Lameyre, J., 1983** : A study of Kerguelen plutonism: petrology, geochronology and geological implications. in *Oliver et al. , ed., Antarctic Earth Science, Cambridge University Press, pp. 646-651*.
- Giret, A., Verdier, O., Nativel, P., 1992** : The zeolitisation model of Kerguelen Islands, southern Indian Ocean. in *Yoshida, Y., et al. , eds., Recent Progress in Antarctic Earth Science: Tokyo, Terra Scientific Publishing Company, pp. 457-463*.
- Grégoire, M., Cottin, J., Mattielli, N., Nicollet, C., Weis, D., Giret, A., 1995** : The Kerguelen Archipelago: a hypothetic continental mafic protolith. *Terra Antarctica*, v. 2, pp. 1-6.
- Grégoire M., Jackson I., O'Reilly S.Y., Cottin J.Y., 2001** : The lithospheric mantle beneath the Kerguelen Islands (Indian Ocean): petrological and petrophysical characteristics of mantle mafic rock types and correlation with seismic profiles. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 142, pp. 244-259.
- Grégoire, M., Mattielli, N., Nicollet, C., Cottin, J.-Y., Leyrit, H., Weis, D., Shimizu, N., Giret, A., 1994** : Oceanic mafic granulite xenoliths from the Kerguelen Archipelago. *Nature*, v. 367, pp. 360-363.
- Houtz, R.E., Hates, D.E., Markl, R.G., 1977** : Kerguelen Plateau bathymetry, sediment distribution, and crustal structure. *Mar. Geology*, v. 25, pp. 95-130.
- Ingle S, Weis D, Frey F, Scoates JS, 2002a** : Relationship between the early Kerguelen plume and continental flood basalts of

- the paleo-Eastern Gondwanan margins. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 197, pp. 35-50.
- Ingle S, Weis D, Frey F. A., 2002b** : Indian continental crust recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODP Leg 183, site 1137). *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1241-1257.
- Kempton, P. D., Fitton, J. G., Saunders, A. D., Nowell, G. M., Taylor, R. N., Hardarson, B. S. & Pearson, G., 2000** : The Iceland plume in space and time: a Sr-Nd-Pb-Hf study of the North Atlantic rifted margin. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 177, pp. 255-271.
- Kieffer, B., Arndt, N. T., Weis, D., 2002** : A bimodal alkalic shield volcano on Skiff Bank: its place in the evolution of the Kerguelen Plateau. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1259-1286.
- Könnecke, L., Coffin, M.F., 1994** : Tectonics of the Kerguelen Plateau, Southern Indian Ocean. *EOS*, v. 75, p. 154.
- Leclaire, L., Bassias, Y., Denis-Clocchiatti, M., Davies, H., Gautier, I., Wannesson, J., 1987** : Lower Cretaceous basalt and sediment from the Kerguelen Plateau. *Geo-marine Lett.*, v. 7, p. 169-176.
- Mahoney, J.J., Jones, W.B., Frey, F.A., Salters, V.J.M., Pyle, D.G., Davies, H.L., 1995** : Geochemical characteristics of lavas from Broken Ridge, the Naturaliste Plateau and southernmost Kerguelen plateau: Cretaceous plateau volcanism in the southeast Indian Ocean. *Chemical Geology*, v. 120, pp. 315-345.
- Mahoney, J. J., Graham, D. W., Christie, D. M., Johnson, K. T. M., Hall, L. S., VonderHaar, D. L., 2002** : Between a hotspot and a cold spot: isotopic variation in the Southeast Indian Ridge asthenosphere, 86°E-118°E. *J. Petrol.*, v. 43 pp. 1155-1176.
- Marsh, B., 1995** : Solidification fronts and magmatic evolution. *Mineralogical Magazine*, v. 60, pp. 5-40.
- Mattielli, N., 1996** : Magmatisme et Métasomatisme associés au panache des Kerguelen: Contribution de la géochimie des enclaves basiques et ultrabasiques. [Unpublished Ph.D. dissertation], Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium. 278p.
- Mattielli N., Weis D., Grégoire M., Mennessier J.-P., Cottin J.Y. Giret A., 1996** : Kerguelen basic and ultrabasic xenoliths: Evidence for long-lived Kerguelen hotspot activity. *Lithos*, v. 37, pp. 261-280.
- Mattielli N., Weis D., Shimizu N., Mennessier J.-P., Cottin J.-Y., Giret A. Grégoire M., 1999** : Identification of different mantle components associated with the Kerguelen Plume. *Journal of Petrology*, v. 40, pp. 1721-1744.
- Munsch, M., Rotstein, Y., Schlich, R., Coffin, M., 1993** : Structure and tectonic setting of the 77°E and 75°E grabens, Kerguelen Plateau, South Indian Ocean: *Journal of Geophysical Research*, v. 98, pp. 6367-6382.
- Munsch, M., Schlich, R., 1987** : Structure and evolution of the Kerguelen-Heard Plateau (Indian Ocean) deduced from seismic stratigraphy studies. *Mar. Geol.*, v. 76, pp. 131-152.
- Mutter, J.C., Cande, S.C., 1983** : The early opening between Broken Ridge and Kerguelen Plateau. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 65, pp. 369-376.
- Nicolaysen, K., Bowring, S., Frey, F., Weis, D., Ingle, S., Pringle, M. S., Coffin, M. F., 2001** : Provenance of proterozoic garnet-biotite gneiss recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau, southern Indian ocean. *Geology*, v. 29, pp. 235-238.
- Nicolaysen K., Frey F.A., Weis D., Hodges K. Giret A., 2000** : ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology of Flood Basalts from the Kerguelen Archipelago, southern Indian Ocean: Implications for post-Eocene Eruptive Rates of the Kerguelen Plume. *Earth Planet. Sci Lett.*, v. 174, pp. 313-328.
- Nougier, J., 1970** : Carte géologique des îles Kerguelen au 1/200.000. *I.G.N., Paris, 1 feuille*.
- Operto, S., Charvis, P., 1995** : Kerguelen Plateau: a volcanic passive margin fragment ? *Geology*, v. 23, p. 137-140.
- Pringle, M.S., Storey, M., Wijbrans, J., 1994** : ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of mid-cretaceous Indian ocean basalts: constraints on the origin of large flood basalt provinces. *EOS*, v. 75, p. 728.
- Recq, M., Operto, S., Charvis, P., 1994** : Kerguelen Plateau: a hot-spot related oceanic crust. *EOS*, v. 75, p. 583.
- Rhodes, J.M., Hart, S.R., 1995** : Episodic trace element and isotopic variations in Mauna Loa lavas: implications for magma and plume dynamics., in *Rhodes, J.M., and Lockwood, J.P., eds., Mauna Loa revealed: structure, composition, history and hazards*, v. 92: Washington, American Geophysical Union, pp. 263-288.
- Royer, J.-Y., Sandwell, D. T., 1989** : Evolution of the eastern Indian Ocean since the late Cretaceous: constraints from Geosat altimetry. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, pp. 13,755-13,782.
- Royer, J.-Y., Coffin, M.F., 1992** : Jurassic to Eocene plate tectonic reconstructions in the Kerguelen Plateau region. in *Wise, S.W.J., Schlich, R., et al., eds., Proc. ODP, Sci. Res.*, v. 120: College Station, TX, Ocean Drilling Program, pp. 917-928.
- Saunders, A.D., Storey, M., Gibson, I.L., Leat, P., Hergt, J., Thompson, R.N., 1991** : Chemical and isotopic constraints on the origin of the basalts from the Ninetyeast Ridge, Indian Ocean: results from DSDP Legs 22 and 26 and ODP Leg 121. in *Weissel, J.K., Peirce, J.W., Taylor, E., Alt, J., et al., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Sci. Results, 121, Volume 121: College Station, Ocean Drilling Program*, pp. 559-590.
- Schlich, R., Rotstein, Y., Schaming, M., 1993** : Dipping basement reflectors along volcanic passive margins - new insight using data from the Kerguelen Plateau. *Terra Nova*, v. 5, pp. 157-163.
- Schlich, R., Wise, S.W.J., 1992** : The geologic and tectonic evolution of the Kerguelen Plateau: an introduction to the scientific results of Leg 120. in *Wise, S.W.J., Schlich, R., et al., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Volume 120: College Station, Texas, ODP*, pp. 5-30.
- Storey, M., Kent, R., Saunders, A.D., Salters, V.J., Hergt, J., Whitechurch, H., Sevigny, J.H., Thirwall, M.F., Leat, P., Ghose, N.C., Gifford, M., 1992** : Lower Cretaceous

- volcanic rocks along continental margins and their relationship to the Kerguelen Plateau, in *Wise, S.W., Jr, and Schlich, R., eds., Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Res., Volume 120: College Station, TX, ODP, pp. 33-53.*
- Storey, M., Mahoney, J.J., Kroenke, L.W., Saunders, A.D., 1991 :** Are oceanic plateaus sites of komatiite formation ? *Geology*, v. 19, pp. 376-379.
- Storey, M., Saunders, A.D., Tarney, J., Gibson, I.L., Norry, M.J., Thirlwall, M.F., Leat, P., Thompson, R.N., Menzies, M.A., 1989 :** Contamination of Indian Ocean asthenosphere by the Kerguelen-Heard mantle plume. *Nature*, v. 338, p. 574-576.
- Storey, M., Saunders, A.D., Tarney, J., Leat, P., Thirlwall, M.F., Thompson, R.N., Menzies, M.A., Marriner, G.F., 1988 :** Geochemical evidence for plume-mantle interactions beneath Kerguelen and Heard Islands, Indian Ocean.: *Nature*, v. 336, pp. 371-374.
- Wallace, P. J., Frey, F. A., Weis, D., Coffin, M. F., 2002 :** Origin and evolution of the Kerguelen Plateau, Broken Ridge and Kerguelen Archipelago. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1105-1108.
- Watkins, N.D., Gunn, B.M., Nougier, J., Baksi, A.K., 1974 :** Kerguelen: continental fragment or oceanic island. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 85, pp. 201-212.
- Weis, D., Giret, A., 1994 :** Kerguelen plutonic complexes: Sr, Nd, Pb isotopic study and inferences about their sources, ages and geodynamic setting. *Bull. Soc. Géol. France*, v. 166, pp. 47-59.
- Weis, D., Bassias, Y., Gautier, I., Mennessier, J.-P., 1989a :** Dupal anomaly in existence 115 Ma ago: evidence from isotopic study of the Kerguelen Plateau (South Indian Ocean). *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 53, pp. 2125-2131.
- Weis, D., Frey, F. A., 2002 :** Submarine basalts of the Northern Kerguelen Plateau: interaction between the Kerguelen plume and the Southeast Indian Ridge revealed at ODP Site 1140. *J. Petrol.*, v. 43, pp. 1287-1309.
- Weis, D., Damasceno, D., Frey, F. A., Nicolaysen, K. & Giret, A., 1998a :** Temporal isotopic variations in the Kerguelen plume: evidence from the Kerguelen Archipelago. *Mineralogical Magazine*, v. 62A, pp. 1643-1644.
- Weis, D., Frey, F. A., Giret, A., Cantagrel, J. M., 1998b :** Geochemical characteristics of the youngest volcano (Mount Ross) in the Kerguelen Archipelago: inferences for magma flux and composition of the Kerguelen Plume. *Journal of Petrology*, v. 39, pp. 973-994.
- Weis, D., Frey, F.A., Leyrit, H., Gautier, I., 1993 :** Kerguelen Archipelago revisited: geochemical and isotopic study of the SE Province lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 118, pp. 101-119.
- Weis, D., Frey, F.A., Saunders, A., Gibson, I., Party, Leg 121 Shipboard Scientist Party , 1991 :** Ninetyeast Ridge (Indian Ocean): a 5000 km record of a Dupal mantle plume. *Geology*, v. 19, pp. 99-102.
- Weis, D., Frey, F. A., Schlich, R., Schaming, M., Montigny, R., Damasceno, D., Mattielli, N., Nicolaysen, K. N., Scoates, J. S., 2002 :** Trace of the Kerguelen mantle plume: Evidence from seamounts between the Kerguelen Archipelago and Heard Island, Indian Ocean. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 3, 10.1029/2001GC000251
- Weis, D., White, W.M., Frey, F.A., Duncan, R.A., Dehn, J., Fisk, M., Ludden, J., Saunders, A., Storey, M., 1992 :** The influence of mantle plumes in generation of Indian Oceanic crust. in *Duncan, R.A., Rea, D.K., Kidd, R.B., von Rad, U., and Weissel, J.K., eds., Synthesis of results from the Scientific Drilling in the Indian Ocean, Volume Geophysical monograph 70: Washington, American Geophysical Union, pp. 57-89.*
- Whitechurch, H., Montigny, R., Sevigny, J., Storey, M., Salters, V., 1992 :** K-Ar and ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of central Kerguelen Plateau basalts. in *Wise, S.W., Jr, and Schlich, R., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Volume 120: College Station, ODP, pp. 71-78.*
- Yang, Y. J., Frey, F. A., Weis, D., Giret, A., Pyle, D. & Michon, G., 1998 :** Petrogenesis of the flood basalts forming the Northern Kerguelen Archipelago: implications for the Kerguelen Plume. *Journal of Petrology*, v. 39, pp. 711-748.