

Géomatériaux (Pétrologie)

Les basaltes éocènes à affinité transitionnelle du plateau Bamoun, témoins d'un réservoir mantellique enrichi sous la ligne volcanique du Cameroun

Amidou Moundi^a, Pierre Wandji^b, Jacques-Marie Bardintzeff^{c,d,*},
Jean-Jacques Ménard^c, Lise Carole Okomo Atouba^e, Oumar Farouk Mouncherou^f,
Éric Reusser^g, Hervé Bellon^h, Félix M. Tchoua^a

^a Département des sciences de la terre, faculté des sciences, université Yaoundé-1, BP 812, Yaoundé, Cameroun

^b Laboratoire de géologie, ENS, université Yaoundé-1, BP 47, Yaoundé, Cameroun

^c Laboratoire de pétrographie–volcanologie, bâtiment 504, université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

^d IUFM, université de Cergy-Pontoise, RP 815, 45, avenue des États-Unis, 78008 Versailles cedex, France

^e Institut de recherches géologiques et minières, centre de recherches volcanologiques, BP 4110, Nlongkak Yaoundé, Cameroun

^f Institut de recherches géologiques et minières, centre de recherches hydrologiques, BP 4110, Nlongkak Yaoundé, Cameroun

^g Institut für Mineralogie und Petrographie, ETH, CH-8092 Zürich, Suisse

^h UMR 6538, IUEM, université de Bretagne occidentale, 6, avenue Victor-Le-Gorgeu, CS 93637, 29238 Brest cedex 3, France

Reçu le 15 novembre 2006 ; accepté après révision le 2 avril 2007

Disponible sur Internet le 17 mai 2007

Présenté par René Blanchet

Résumé

Les basaltes transitionnels éocènes occupent plus de la moitié ouest des affleurements laviques du plateau Bamoun. Les basaltes de ce type restent exceptionnels dans la ligne volcanique du Cameroun (LVC). Ils possèdent des caractéristiques pétrographiques (basaltes sans olivine, BSO ; âge de $51,8 \pm 1,2$ Ma ; le plus vieux de la LVC) et géochimiques, différentes de celles des basaltes alcalins de ce même plateau (basaltes à olivine, BAO ; âge de $46,7 \pm 1,1$ Ma) et de tous les autres basaltes alcalins, classiques, de la LVC. Inversement, ils apparaissent plus proches des roches analogues des rifts est-africains et des îles Kerguelen. Ils se caractérisent par la rareté de l'olivine modale et par la valeur relativement élevée du rapport Y/Nb (égal à 1), mais faible de La_N/Yb_N (10) et de Ce_N/Yb_N (7). Les valeurs des rapports isotopiques initiaux $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0,7044) et $^{143}Nd/^{144}Nd$ (0,5126) des BSO sont respectivement plus élevées et plus faibles que celles relatives aux BAO (0,7034 et 0,5128). Ces résultats mettent en évidence l'existence d'un réservoir mantellique enrichi par un pôle de type EM lithosphérique à l'origine des basaltes transitionnels, différent du réservoir plus proche du pôle HIMU, à l'origine des basaltes alcalins. *Pour citer cet article : A. Moundi et al., C. R. Geoscience 339 (2007).* © 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Eocene transitional basalts of the Bamoun Plateau, evidences of an enriched mantle reservoir below the Cameroon volcanic line. Transitional basalts of Eocene age crop out on the western part of the Bamoun Plateau. Basalts of this type are rather scarce in the Cameroon Volcanic Line (LVC). These olivine-free basalts (BSO) lack olivine and have the oldest ages

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : jacques-marie.bardintzeff@u-psud.fr (J.-M. Bardintzeff).

(51.8 ± 1.2 Ma) of the entire LVC. They differ from the olivine-bearing basalts (BAO, 46.7 ± 1.1 Ma) on the same plateau, as well as from the typical alkali basalts found elsewhere on the LVC. They closely resemble the rocks of the East-African rifts and Kerguelen Island. They are characterized by the scarcity of modal olivine, a relatively high Y/Nb ratio (1), but low La_N/Yb_N (10) and Ce_N/Yb_N (7) ratios. Moreover, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7044) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.5126) isotopic ratios of BSO are respectively higher and lower than those of BAO (0.7034 and 0.5128) are. These data indicate a source in an enriched lithospheric mantle (EM) that produced the transitional basalts, in contrast to a source closer to HIMU, which could have produced alkali basalts. **To cite this article:** A. Moundi et al., C. R. Geoscience 339 (2007).

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Basalte transitionnel ; Plateau Bamoun ; Ligne volcanique du Cameroun (LVC) ; Âges K/Ar RT ; Isotopes (Sr, Nd) ; Réservoir mantellique ; EM ; HIMU

Keywords: Transitional basalts; Bamoun Plateau; Cameroon Volcanic Line; WR K/Ar Ages; Isotopes (Sr, Nd); Mantle reservoir; EM; HIMU

Abridged English Version

Introduction

Most lavas of the Cameroon Volcanic Line (LVC), including those of the islands in the Gulf of Guinea, are typical alkali basalts. They sometimes produced more evolved rocks by fractional crystallization. Crustal melting may also have played a role, because significant gaps are sometimes observed in the series. These rocks are related to an asthenospheric mantle reservoir close to HIMU.

Some of the basalts of the LVC are exceptional, because they have transitional affinities. Examples are described from the Bamoun Plateau [21–23], Mount Bangou [6], Mounts Bambouto and the Oku Massif [19], Bana [15], the Biu Plateau, and the Jos Plateau in Nigeria [32]. Their origin is discussed.

Geological setting

The Bamoun Plateau (including the Mbam Massif, 2333 m high, and the Nkogam Massif, 1960 m high, in its western part) extends over 40 km from north to south and over 30 km from west to east, and has an area of about 900 km² (Fig. 1). Lavas resting on the old Pan-African basement (granite, gneiss, and gabbro) include both basaltic and siliceous lavas (trachyrhyolites and rhyolites occur as domes and ignimbrites) [21].

Two types of basalts were emplaced during the Eocene. Basalts with olivine (BAOs) are typical alkali basalts and are found mainly on the eastern part of the plateau. Basalts without olivine (BSOs) outcrop in its western part, in the provinces of Mbam, Koutaba, and Fouban. These lavas are rather exceptional in the LVC. They differ significantly from the BAOs of the same plateau as well as from all the typical alkali basalts of the

LVC. BSOs are older than BAOs (a new whole-rock $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ analysis of a BSO yielded an age of 51.79 ± 1.21 Ma, which makes them the oldest unit of the whole LVC). A new analysis of a BAO yielded an age of 46.73 ± 1.14 Ma. Moreover, recent basanites (ankaramites) crop out in the area of Mamevouou. A new analysis of a basanite yielded an age of 0.82 ± 0.05 Ma.

Petrography and mineralogy

BSOs are commonly porphyric (in the Mbam and Fouban provinces), but in some other places, aphyric (in Koutaba province). They consist mainly of plagioclase, clinopyroxene, ilmenite, and magnetite¹. Crystals make up 70 to 90% of the rocks and the matrix 10 to 30%. Plagioclases (45 to 55% of the crystals by volume) are An 71 to 58 for phenocrysts (3–8 mm), An 62 to 52 for microcrysts (1–2 mm), and An 55 to 44 for microliths (0.2–0.8 mm). Clinopyroxenes account for 20 to 25% of the crystals. Augites up to 5 mm in length contain 38 to 40% Wo. Augites from Koutaba are notably less magnesian ($\text{En}_{34-38.5}\text{Fs}_{23.5-25.5}$) than those from Fouban and Mbam ($\text{En}_{41.5-42.5}\text{Fs}_{19-20}$). They contain 0.03–0.08 ^{IV}Al and no ^{VI}Al (the structural formulae were calculated based on six oxygen anions), and 0.02–0.04 Ti. The amounts of Ca + Na (0.7 to 0.9) in the clinopyroxenes are typical of transitional basalts according to [18] (Fig. 2a). Oxides (5–10% of the crystals) are ilmenite, magnetite, and Al-spinel. They give calculated subsolidus temperature between 860 and 920 °C for an oxygen fugacity of 10^{-11} to 10^{-13} (10^{-6} and 10^{-8} Pa) according to [33].

All these characteristics are close to those of the rocks of the East-African rifts and some oceanic islands,

¹ All analytical results are available at jacques-marie.bardintzeff@u-psud.fr.

such as Kerguelen [7], the Fangataufa atoll [2,9], and Hawaii.

Geochemistry

BSOs contain 48 to 52 wt% SiO₂, 2 to 3 wt% TiO₂, and 4 to 5 wt% Na₂O + K₂O, whereas BAOs have the same amount of Na₂O + K₂O (4 to 5 wt%), but less SiO₂ (46 wt%), and more TiO₂ (4 wt%) (Fig. 3)¹. BSOs are basalts and trachybasalts according to [17]. Representative compositions plot in the overlap between alkaline and subalkaline fields. BSOs never contain normative nepheline, but have small amounts of normative olivine (less than 4 wt%) or normative quartz (less than 5 wt%) and up to 17 wt% of normative hypersthene. Mg (=100 Mg/[Mg + Fe]) ratios range between 37 and 46 for BSOs (54 for BAOs), which demonstrates a weak differentiation, as confirmed by low contents of Ni and Co (Ni < 115, Co < 50).

Transitional basalts are characterized by low Ba and La contents. Lavas from Foumban and Mbam contain 250 to 400 ppm Ba (compared to 750 ppm for BAOs) and 20 to 30 ppm La (compared to 50 ppm for BAOs). On the other hand, rocks from Koutaba seem very different, as they contain about 50 ppm La and huge amounts of Ba (700 to 1000 ppm), which are linked to the presence of plagioclase megacrysts up to 6 cm long.

Low Nb contents (less than 50 ppm) and large ratios of K/Nb (253–552), Y/Nb (0.9–2), Rb/Nb (0.6–1), and Zr/Nb (9–10) are typical of transitional lavas (Fig. 2b). These ratios are larger than those of the BAOs and alkali basalts of LVC (0.4, 0.5, and 5 respectively). Zr/Y ratios of BSOs (6–11), lower than those of BAOs (11), and Nb/Y ratios indicate contributions of HIMU and EM components (Fig. 4).

REE distributions of BSOs are very close to those of Ti-rich basalts from Ethiopia. LREE/HREE ratios are always low, 7.6 to 10.1 for La_N/Yb_N and 6.3 to 7.7 for Ce_N/Yb_N (Fig. 5) compared to 32.7 and 22.4 respectively for BAOs. These ratios are very close to those obtained for the East-African rifts (8.5–9.9 and 6.3–8.5) [38], and Kerguelen Island (9.3–10.9 and 6.5–8.5) [2,7], but are moderately higher than those obtained for Parana in Brazil and Deccan in India (3.5 and 4) [12].

Initial isotopic ratios have been calculated for BSOs: 0.704472 for ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and 0.512528 for ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd for Mbam, 0.704240 and 0.512589 for Foumban. These ratios are respectively higher and lower than those of BAOs (0.703343 and 0.512774). Note that the average values for LVC range between 0.7028 and 0.7037 and

0.5128 and 0.5130 [10,11,19,32]. Isotopic ratios of BSOs are close to those of tholeiitic lavas of Ahaggar or the Kerguelen Islands [1,7]. They indicate a mixture of HIMU and EM mantle components, in accord with their Zr, Nb, Rb, Ba, and La contents [37,40] (Table 1, Fig. 6).

Discussion and conclusion

BSOs are the oldest lavas of the LVC. They are characterized by the lack of modal olivine, the occurrence of normative quartz and hypersthene, and low La_N/Yb_N and Ce_N/Yb_N ratios.

Assimilation cannot explain the observed isotopic ratios, as no xenoliths have been discovered. Conversely, for transitional basalts (BSOs), a relatively shallow source in the lithospheric mantle, enriched, and close to the EM pole, plays a significant role. This is different from the reservoir closer to HIMU, which could produce the alkali basalts (BAOs).

1. Introduction

Dans la ligne volcanique du Cameroun (LVC), les laves sont essentiellement basiques, et plus rarement acides. Les laves basiques sont, dans leur grande majorité, des basaltes alcalins typiques. Mais ont été décrits aussi quelques basaltes à affinité transitionnelle, précoces dans la LVC : au plateau Bamoun [21–23], au mont Bangou [6], aux monts Bambouto et au massif d'Oku [19], au complexe volcano-plutonique de Bana [15], aux plateaux de Biu et Jos au Nigeria [32].

Les roches acides peuvent dériver des roches basiques par cristallisation fractionnée. Mais la présence d'une lacune (*gap*) entre les laves basiques et les laves acides semble impliquer aussi une origine crustale pour certaines roches acides [3,13,19,21].

Les valeurs moyennes des rapports isotopiques initiaux du ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (0,7032–0,7034), obtenues par la plupart des auteurs sur les basaltes alcalins, indiquent une source mantellique unique (réservoir proche du pôle HIMU) pour l'ensemble des basaltes alcalins de la LVC [10,11,24,30]. Cela est vrai pour les basaltes de la partie continentale de la LVC, mais aussi pour la partie océanique (îles du golfe de Guinée) [5].

Cependant, l'importance spatiotemporelle du magmatisme, la complexité structurale, la variété des types pétrographiques, mais aussi les différences observées pour certains rapports isotopiques dans cette méga-structure volcanotectonique de 2000 km, ont amené d'autres auteurs à s'intéresser à la nature hétérogène du manteau sous-jacent. C'est, par exemple, le cas des

travaux de Marzoli et al. [19] sur les roches volcaniques des monts Bambouto, du massif d'Oku et du plateau de l'Adamaoua, et de Rankenburg et al. [32] sur les basaltes des plateaux de Biu et de Jos.

L'ensemble de ces travaux a identifié le manteau asthénosphérique comme source des roches basiques alcalines, qui ne montrent pas de variations géochimiques significatives. Pour Marzoli et al. [19] et Rankenburg et al. [32], certaines faibles variations géochimiques observées peuvent être liées, soit à la contamination crustale des magmas mantelliques, soit à la provenance de certains magmas, localement à partir d'un manteau moins profond, lithosphérique.

Dans la présente note, les données géochimiques et isotopiques (Sr, Nd) des basaltes transitionnels du plateau Bamoun sont analysées pour identifier la nature de la source magmatique. Il s'agit des premières coulées volcaniques de cette province volcanique, d'une composition chimique relativement exceptionnelle dans la LVC.

2. Cadre géologique

Le plateau Bamoun s'étend sur près de 900 km² (Fig. 1), soit sur des distances nord-sud et est-ouest de l'ordre de 40 et 30 km, respectivement. Il comprend, dans sa partie ouest, les massifs du Mbam et du Nkogam, alignés nord-sud.

Le massif bordier du Mbam (2333 m d'altitude) est constitué d'une centaine de dômes de volcanites acides (rhyolites, rhyolites ignimbrétiques et tuffacées, trachyrhyolites) et de quelques lambeaux de basaltes. Ces laves reposent sur un substratum panafricain de granito-gneiss et de gabbros anorthositiques dépourvus d'olivine, affleurant dans sa partie sud [21]. Le massif bordier du Nkogam (1960 m d'altitude) comprend des roches plutoniques (granites, granites micropegmatiques) et volcaniques (ignimbrites et basaltes), de nature alcaline [14].

Le plateau Bamoun est recouvert par des basaltes fissuraux éocènes, qui reposent sur les roches du socle

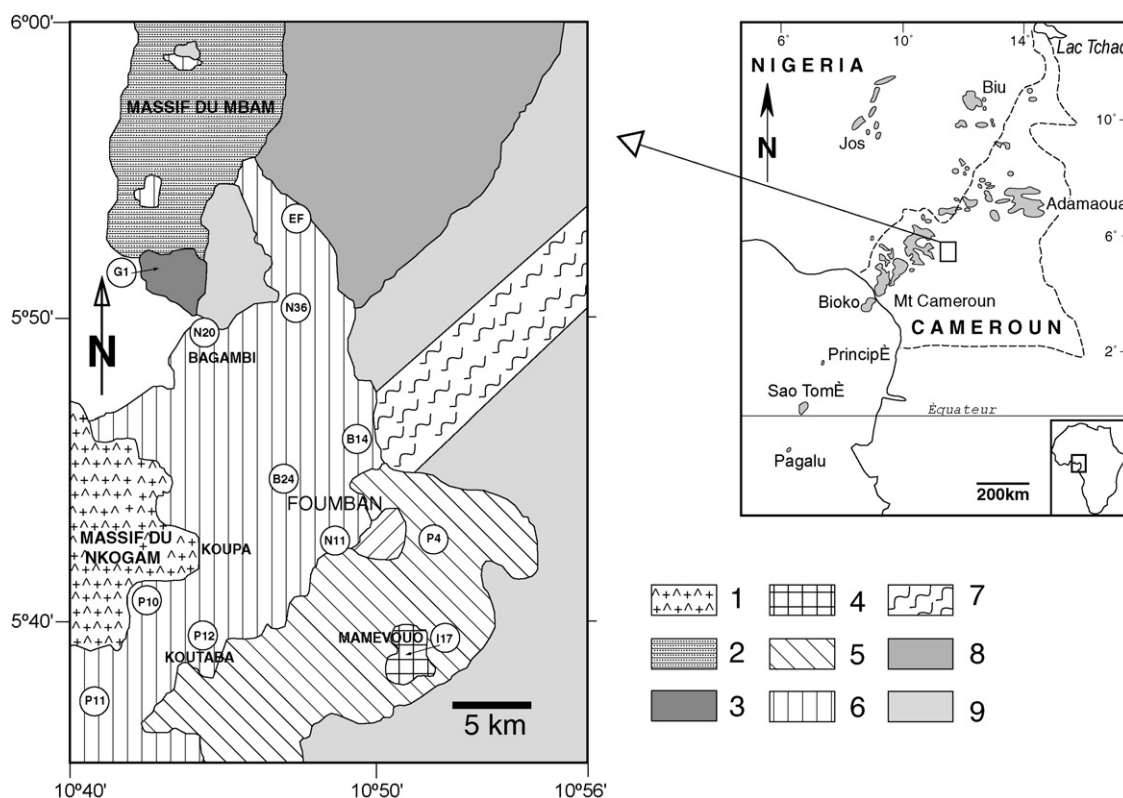


Fig. 1. Le plateau Bamoun, situé sur la LVC. Les massifs bordiers : (1) massif du Nkogam, (2) massif du Mbam, (3) leucogabbros. Les laves : (4) basanites (ankaramites) de Mamevouo, (5) basaltes alcalins du plateau Bamoun (BAO), (6) basaltes transitionnels du plateau Bamoun (BSO). Le socle panafricain : (7) bande de cisaillement à mylonites, (8) orthogneiss, (9) granites. Les échantillons sont localisés.

Fig. 1. The Bamoun Plateau is situated on the LVC. The massifs: (1) Nkogam Massif, (2) Mbam Massif, (3) leucogabbros. Lavas: (4) basanites (ankaramites), (5) alkali basalts from the Bamoun Plateau (BAOs), (6) transitional basalts from the Bamoun Plateau (BSOs). Panafrican basement: (7) mylonite shear zone, (8) orthogneiss, (9) granites. Sample locations are shown.

panafricain. Parmi ceux-ci ont été identifiés des basaltes sans olivine (BSO), à caractère transitionnel, et des basaltes à olivine (BAO), à caractère alcalin. Les BSO apparaissent plus âgés (une datation nouvelle $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ sur roche totale à $51,8 \pm 1,2$ Ma ; il s'agit de l'âge le plus ancien connu de la LVC) que les BAO (une datation nouvelle à $46,7 \pm 1,1$ Ma). Des basanites (ankaramites) récentes (une datation nouvelle à $0,82 \pm 0,05$ Ma) affleurent dans le secteur de Mamevouo.

Les BAO affleurent sur la partie est du plateau. Les BSO, objets de cette note, affleurent dans la partie ouest (soit 60 % en surface), dans les provinces du Mbam, de Koutaba et de Foumban (Fig. 1). Le relief des provinces du Mbam et de Koutaba, situées à 1100 m d'altitude, est relativement plat, alors que celui de Foumban (1200 m d'altitude) est constitué d'inselbergs taillés par des vallées plus ou moins profondes.

Dans tous ces espaces, les BSO affleurent, soit sous forme de petites coulées ou en fenêtres sous les dépôts ignimbritiques du massif du Mbam (où ils ont été découverts en premier [21,23]), soit en coulées débitées en blocs et boules dans les vallées (et les tranchées routières) à Koutaba et à Foumban.

3. Pétrographie et minéralogie

Les basaltes transitionnels du plateau Bamoun sont à texture microlitique porphyrique (massif du Mbam ou Foumban) ou microlitique aphyrique (Koutaba). Plus localement, à Koupa dans la province de Koutaba, certains basaltes montrent des mégacristaux de plagioclase pouvant atteindre 6 cm de long.

Dans l'ensemble, la composition minéralogique de ces roches reste assez constante. Les principales phases minérales (plagioclase, clinopyroxène et minéraux opaques) représentent 70–90 % de la roche et la mésostase constitue les 10–30 % restants. L'olivine est absente ou exceptionnelle. Les résultats analytiques relatifs aux compositions chimiques des minéraux sont disponibles sur demande à l'adresse électronique de l'auteur correspondant.

Les plagioclases (45–55 % des minéraux) forment des phénocristaux (3–8 mm), des microcristaux (1–2 mm) et des microlites (0,2–0,8 mm) à composition de labrador et, plus rarement, de bytownite. La teneur en anorthite, plus importante pour les BSO du massif du Mbam (An_{71}), est continue dans l'ensemble des cristaux, des phénocristaux (An_{71} – An_{58} ; $\text{Si}_{2,44}\text{Al}_{1,52}\text{Fe}_{0,03}\text{Ca}_{0,59}\text{Na}_{0,38}\text{K}_{0,02}\text{O}_8$, soit $\text{An}_{59,2}$) aux microcristaux et microlites (An_{64} – An_{52} et An_{55} – An_{44} , respectivement ; $\text{Si}_{2,45}\text{Al}_{1,50}\text{Fe}_{0,01}\text{Ca}_{0,66}\text{Na}_{0,35}\text{K}_{0,02}\text{O}_8$, soit $\text{An}_{64,1}$ pour un microcristal).

Les clinopyroxènes (20–25 % des minéraux), trapus (2–4 mm) ou allongés (0,3–5 mm de longueur) ont une composition d'augite. Il s'agit d'augites, avec des proportions en wollastonite assez constantes, en général comprises entre Wo_{38} et Wo_{40} . Les augites de Koutaba sont statistiquement moins magnésiennes ($\text{En}_{34-38,5}\text{Fs}_{23,5-25,5}$; $\text{Si}_{1,92}\text{Ti}_{0,04}\text{Al}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,42}\text{Fe}^{3+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,68}\text{Ca}_{0,79}\text{Na}_{0,02}\text{O}_6$) que celles de Foumban et du Mbam ($\text{En}_{41,5-42,5}\text{Fs}_{19-20}$; $\text{Si}_{1,90}\text{Ti}_{0,03}\text{Al}_{0,07}\text{Fe}^{2+}_{0,29}\text{Fe}^{3+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,83}\text{Ca}_{0,76}\text{Na}_{0,02}\text{O}_6$ à Foumban). D'après les formules structurales calculées sur la base de six oxygènes, l'ensemble des augites ont des teneurs cationiques moyennes de 0,03–0,08 en $^{\text{IV}}\text{Al}$ (absence de $^{\text{VI}}\text{Al}$) et 0,02–0,04 en Ti. En particulier, elles présentent des sommes Ca + Na de l'ordre de 0,7–0,9, correspondant à celles des pyroxènes des basaltes transitionnels (Fig. 2a), définies par [18]. Elles apparaissent ainsi bien différentes des clinopyroxènes des BAO et de l'ensemble des basaltes alcalins de la LVC qui, plus riches en Ca + Na (>0,9), correspondent à des augites alcalines et à des diopsides [4,36].

Les minéraux opaques (5–10 % des minéraux) observés sont l'ilménite dominante ($\text{Ti}_{7,26}\text{Al}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{6,59}\text{Fe}^{3+}_{1,44}\text{Mn}_{0,10}\text{Mg}_{0,55}\text{Ca}_{0,02}\text{O}_{24}$ à Koutaba), la titanomagnétite ($\text{Ti}_{3,79}\text{Al}_{1,46}\text{Fe}^{2+}_{9,37}\text{Fe}^{3+}_{6,96}\text{Mn}_{0,11}\text{Mg}_{2,25}\text{Ca}_{0,05}\text{O}_{32}$ à Koutaba) et le spinelle alumineux. Les associations ilménite-titanomagnétite en interdigitations sont fréquentes. Elles ont permis un calcul des températures et des f_{O_2} d'après la méthode de [33]. Les températures d'équilibre obtenues, comprises entre 860 et 920 °C, correspondent probablement à des phases de démixtion en domaine subsolidus. Les fugacités d'oxygène sont comprises entre 10^{-11} et 10^{-13} atm (10^{-6} et 10^{-8} Pa).

Des assemblages minéralogiques semblables ont été observés dans d'autres basaltes transitionnels du Cameroun : monts Bambouto et massif d'Okou [19], mont Bangou [6]. Ils ont été aussi retrouvés dans d'autres séries transitionnelles typiques, en contexte d'ouverture : rifts est-africains, mais aussi en contexte intraplaque : îles Hawaii (île Molokai et volcan Kohala sur Big Island), îles Kerguelen [2,7], atoll de Fangataufa [2,9].

4. Géochimie

Les analyses chimiques (éléments majeurs, en traces et terres rares) représentatives des BSO sont disponibles sur demande à l'adresse électronique de l'auteur correspondant. Les teneurs sont relativement élevées en SiO_2 (48–52 %), moyennes en TiO_2 (2–3 %) et $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (4–5 %). Il s'agit de basaltes et de

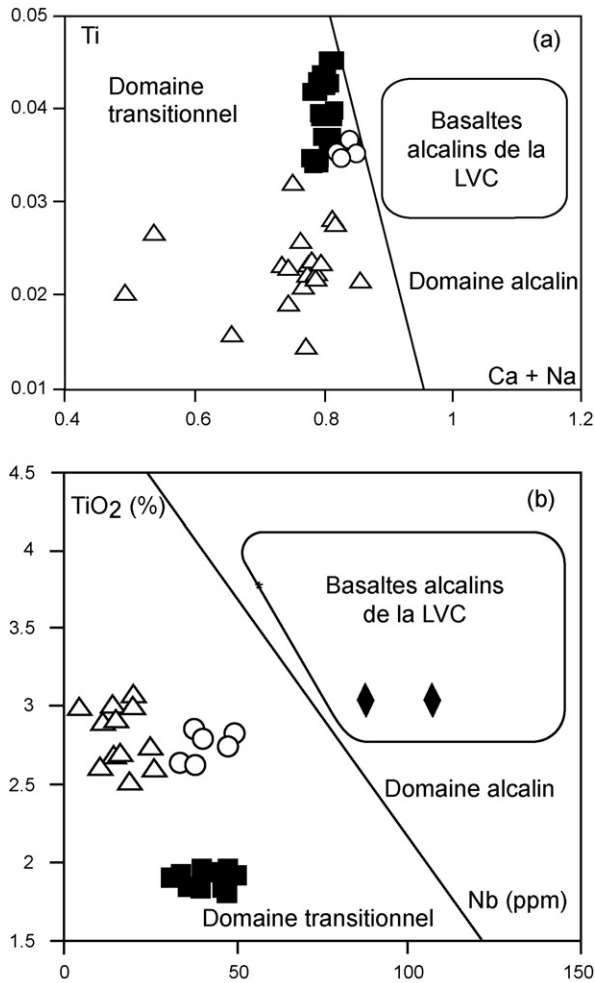


Fig. 2. (a) Répartition des clinopyroxènes des basaltes transitionnels du plateau Bamoun (triangles, basaltes du massif du Mbam, cercles, basaltes de Foumban, carrés, basaltes de Koutaba), comparée à celle des basaltes alcalins de la LVC [4,36] dans le diagramme discriminant de [18]. (b) Distribution des basaltes transitionnels du plateau Bamoun dans le diagramme TiO₂ (en %) versus Nb (en ppm), selon [20]. Mêmes symboles qu'en (a). Basaltes alcalins situés à titre comparatif : P4-BAO du plateau Bamoun (étoile) et basalte de l'éruption de 1999 du mont Cameroun (losange) décrit par [4].

Fig. 2. (a) Distribution of clinopyroxene of transitional basalt of Bamoun Plateau (triangle, basalts of the Mbam Massif, circle, basalts of Foumban, square, basalts of Koutaba) compared with those of the alkali basalts of the LVC [4,36] in the diagram of Leterrier et al. [18]. (b) Distribution of transitional basalts of the Bamoun Plateau in TiO₂ (in wt%) versus Nb (in ppm) diagram according to [20]. Same symbols as in Fig. 2a. Alkali basalts are shown for comparison: P4-BAO of Bamoun Plateau (star) and basalt of 1999 eruption of Mount Cameroon (diamond), described by [4].

trachybasaltes, à la limite des trachyandésites basaltiques, selon la classification de [17] (Fig. 3). Les points représentatifs se situent juste dans la zone de recouvrement des champs alcalin et subalcalin, con-

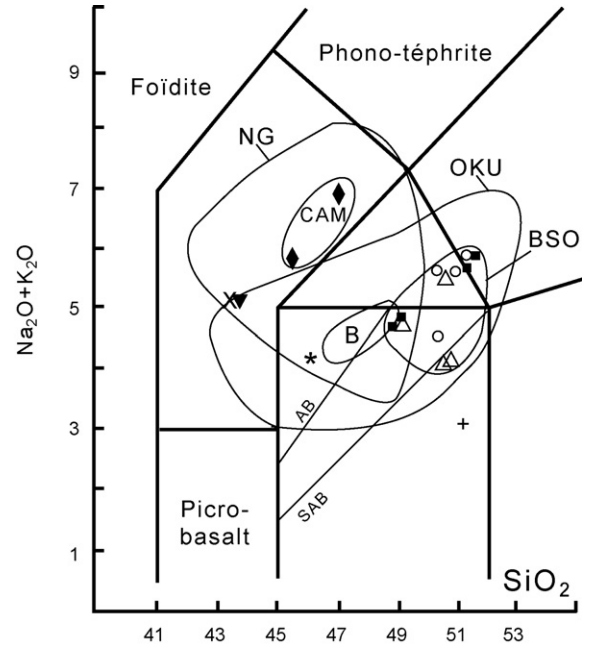


Fig. 3. Diagramme TAS (d'après [17]). AB, Basaltes alcalins, SAB, basaltes sub-alcalins. Mêmes symboles que sur la Fig. 2. Autres roches du plateau Bamoun : croix inclinée, basanite (ankaramite ANK), cercle plein, gabbro G1. Triangle inversé, basalte alcalin récent du mont Bangou [6], croix, basalte tholéiitique crétacé de Mayo Oulo-Léré, Cameroun [26]. Champs des laves du mont Oku (OKU) et de Ngaoundéré (NG) [19], des basaltes transitionnels du mont Bangou (B) [6] et des basaltes alcalins du mont Cameroun 1999 (CAM) [4].

Fig. 3. TAS diagram (according to [17]). AB, Alkali basalts, SAB, subalkali basalts. Same symbols as in Fig. 2. Other rocks of the Bamoun Plateau: inclined cross, basanite (ankaramite ANK), full circle, gabbro G1. Reversed triangle, recent basalt of Mount Bangou [6], cross, Cretaceous tholeiite basalt of Mayo Oulo-Léré, Cameroon [26]. Fields of lavas of Mount Oku (OKU) and Ngaoundéré (NG) [19], of transitional basalts of Mount Bangou (B) [6], and of alkali basalts of Mount Cameroon 1999 (CAM) [4].

firmant l'affinité transitionnelle de ces laves. À titre comparatif, l'analyse du BAO (basalte typique selon cette même classification) montre une teneur en Na₂O + K₂O peu différente pour une teneur en silice significativement plus faible (46 %) et une plus forte teneur en TiO₂ (4 %). Dans les BSO, cela se traduit à la norme par la présence d'hypersthène en fortes proportions (10–17 %), de quartz (jusqu'à 5 %) ou d'olivine en faibles proportions (0–4 %) et par l'absence systématique de la néphéline. Ces caractéristiques diffèrent beaucoup de celles des basaltes alcalins de la LVC, dans lesquels l'olivine modale et normative et la néphéline normative sont ubiquistes [3,28,36].

Les rapports mg (=100 Mg/[Mg + Fe]) compris entre 37 et 46 pour les BSO (54,4 pour le BAO) témoignent du caractère non primaire de ces roches, qui ont subi un

début de différenciation. Cela est confirmé par les faibles teneurs en éléments de transition ($Ni < 115$, $Co < 50$).

De façon générale, les basaltes transitionnels sont aussi caractérisés par de faibles teneurs en Ba et La. Cela se confirme bien pour les roches de Foumban et Mbam : 250–400 ppm de Ba (750 ppm pour le BAO) et 20–30 ppm de La, à comparer aux 50 ppm du BAO. En revanche, les laves de Koutaba se distinguent par leur teneur en La (proche de 50 ppm) mais surtout par leur importante teneur en Ba (700–1000 ppm). Cette richesse en Ba est en rapport avec la présence de mégacristaux de plagioclases, systématiquement observée. Mais remarquons que, par ailleurs, ces laves de Koutaba présentent toutes les autres caractéristiques minéralogiques et géochimiques des basaltes à affinité transitionnelle.

Les teneurs en Nb inférieures à 50 ppm caractérisent aussi l'affinité transitionnelle des BSO du plateau Bamoun (Fig. 2b). Cela se traduit par des rapports élevés en K/Nb (253–552), Y/Nb (0,9–2), Rb/Nb (0,6–1), Zr/Nb (9–10), comme pour les basaltes équivalents du mont Bangou au Cameroun [6] et les basaltes transitionnels des rifts est-africains. Ces rapports sont supérieurs à ceux du BAO (respectivement 198, 0,4, 0,5, 5) et plus généralement à ceux de l'ensemble des basaltes alcalins de la LVC [3,14,26,28,29,35,36]. Les valeurs du rapport Zr/Y des BSO (6–11) apparaissent nettement inférieures à celles relatives aux BAO (13). En prenant en compte également les rapports Nb/Y (Fig. 4), les rôles des pôles mantelliques HIMU et EM apparaissent significatifs.

Les rapports LREE/HREE des BSO sont bas par rapport à ceux des basaltes alcalins, ce qui se traduit par une pente plus faible (Fig. 5). Par exemple, La_N/Yb_N est compris entre 7,6 (massif du Mbam) et 10,1 (Foumban) et Ce_N/Yb_N entre 6,3 (massif du Mbam) et 7,7 (Foumban). Ces valeurs sont bien inférieures à celles obtenues sur la plupart des basaltes alcalins de la LVC (en moyenne 32 et 22 respectivement [26,30]), roches issues de la fusion à un taux faible d'un manteau asthénosphérique à grenat résiduel. Ces valeurs sont de 32,7 et 22,4 pour le basalte à olivine BAO P4 et de 23,9 et 18,6 pour le basalte de l'éruption de 1999 du mont Cameroun, décrit par [4]. Ces rapports sont du même ordre que ceux des basaltes transitionnels des rifts est-africains (8,5–9,9 pour La_N/Yb_N et 6,3–8,5 pour Ce_N/Yb_N [38]) et des îles Kerguelen (9,3–10,9 pour La_N/Yb_N et 6,5–8,5 pour Ce_N/Yb_N [2,7,39]). En revanche, ils restent supérieurs aux rapports La_N/Yb_N des tholéiites typiques du Parana au Brésil et du Deccan, en Inde, compris entre 3,5 et 4 [12].

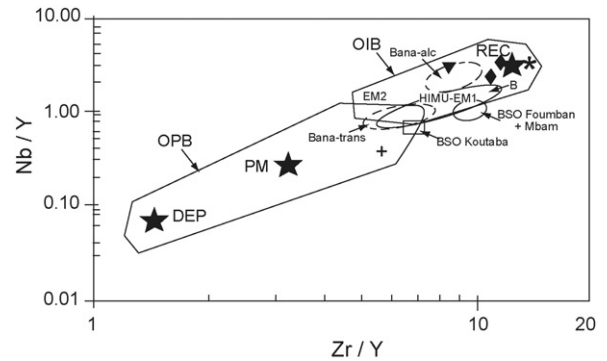


Fig. 4. Diagramme Nb/Y versus Zr/Y (d'après [15,37], modifié et complété). Mêmes symboles que sur les Figs. 2 et 3. Champs des basaltes alcalins et transitionnels de Bana [15]. OIB, Basaltes des îles océaniques, OPB, basaltes des plateaux océaniques, PM, manteau primitif, DEP, manteau fortement appauvri, REC, composant recyclé ; pôles mantelliques HIMU (rapport $^{238}U/^{204}Pb$ élevé), EM1 et EM2 (enrichis).

Fig. 4. Nb/Y versus Zr/Y diagram (adapted from [15,37]). Same symbols as in Figs. 2 and 3. Fields of alkali and transitional basalts of Bana [15]. OIB, Oceanic island basalt, OPB, oceanic plateau basalt, PM, primitive mantle, DEP, deep depleted mantle, REC, recycled component; mantle poles HIMU (high $^{238}U/^{204}Pb$ ratio), EM1, and EM2 (enriched).

Les spectres des BSO (Fig. 5) se rapprochent de ceux des basaltes riches en Ti des plateaux d'Éthiopie [31]. Ils montrent, en revanche, une plus forte teneur systématique en toutes terres rares par rapport aux basaltes pauvres en Ti de ces mêmes plateaux, lesquels se rapprochent de la série tholéiitique crétacée de Mayo Oulo-Léré au Cameroun [26].

En ce qui concerne les isotopes, les valeurs des rapports initiaux du Sr et du Nd, établis pour deux BSO, donnent des résultats assez semblables. Pour les BSO du massif du Mbam, les valeurs sont de 0,704472 pour $^{87}Sr/^{86}Sr$ et 0,512528 pour $^{143}Nd/^{144}Nd$. Les rapports des BSO de Foumban sont de respectivement 0,704240 et 0,512589. Ces valeurs sont significativement différentes de celles obtenues pour un BAO (0,703343 et 0,512774), de celles des basaltes alcalins de la LVC, dont les moyennes se situent autour de 0,7028–0,7037 et 0,5128–0,5130, respectivement [10,11,19,32], ou bien de celles des districts alcalins de l'Ahaggar, dans le Sahara algérien [1] (Fig. 6).

Les rapports isotopiques $^{87}Sr/^{86}Sr$ et $^{143}Nd/^{144}Nd$ des BSO montrent certaines similitudes avec ceux des laves tholéiitiques du Taharaq dans l'Ahaggar, et se rapprochent de celles de Kerguelen [7] (Fig. 6). Ces valeurs sont également proches de celles des basaltes transitionnels du Deccan [8] et du Parana [12]. Les points se situent sur une droite de mélange entre deux

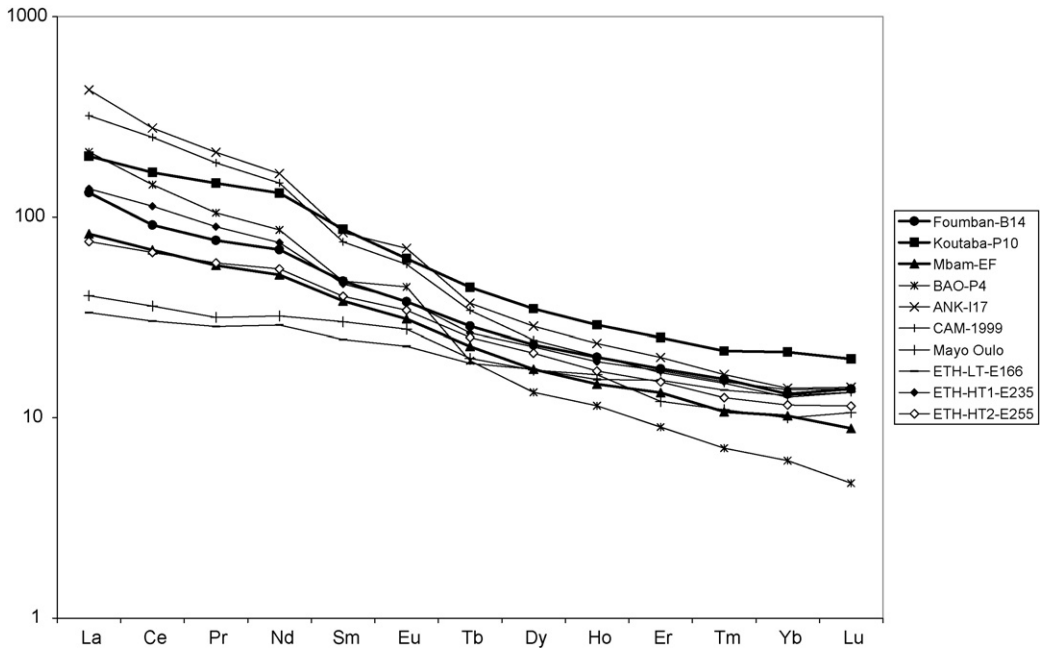


Fig. 5. Spectres des REE de basaltes transitionnels (BSO), d'un BAO et d'une basanite (ankaramite ANK) du plateau Bamoun (valeurs normalisées avec une chondrite selon [34]). D'autres spectres sont ajoutés pour comparaison : basalte de l'éruption 1999 du mont Cameroun [4], basalte tholéiitique de Mayo Oulo-Léré, Cameroun [26], basaltes d'Éthiopie (ETH), pauvre en Ti (LT) ou riches en Ti (HT) [31].

Fig. 5. REE distribution of transitional basalts (BSO), BAO and basanite (ankaramite ANK) of the Bamoun Plateau (using normalizing values to a chondrite according to [34]). Other examples added for comparison: basalt of 1999 eruption of Mount Cameroon [4], tholeiite basalt of Mayo Oulo-Léré, Cameroon [26], basalts of Ethiopia (ETH), low-Ti (LT) or high-Ti (HT) [31].

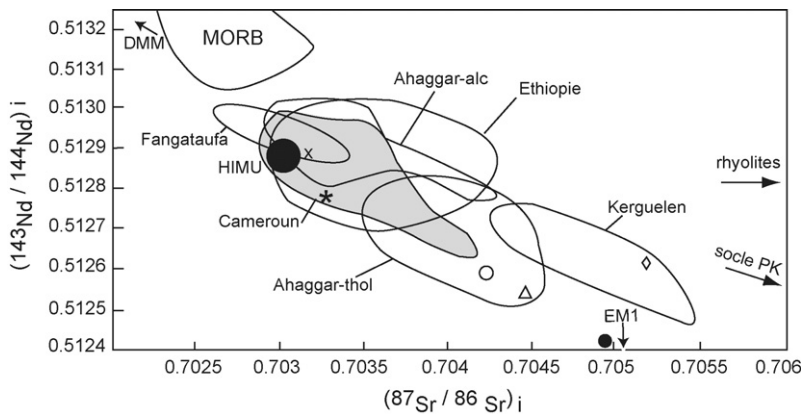


Fig. 6. Diagramme isotopique Nd/Sr (d'après [1], modifié et complété). Analyses nouvelles : B14 de Fouban (cercle), EF de Mbam (triangle), P4-BAO (étoile), basanite ANK (croix inclinée), gabbro G1 (cercle plein) ; champ des autres laves de la LVC (mont Cameroun et mont Manengouba, [11]) ; mugéarite des Bamboutos (losange, [19]), la flèche horizontale indique la composition des rhyolites du plateau Kapsiki [25] ; champs relatifs à Fangataufa [2], à l'Ahaggar (Taharaq) tholéiitique et à d'autres districts alcalins de l'Ahaggar [1], d'Éthiopie [31], de Kerguelen [2,7]. MORB et pôles mantelliques DMM (appauvri), EM1 (enrichi), HIMU définis par [40], PK, Précambrien.

Fig. 6. Nd/Sr isotopic diagram (adapted from [1]). New analyses: B14 from Fouban (circle), EF from Mbam (triangle), P4-BAO (star), basanite ANK (inclined cross), gabbro G1 (full circle); field of other lavas from LVC (Mount Cameroon and Mount Manengouba, [11]); mugearite of Bamboutos (open diamond, [19]), horizontal arrow indicates compositions of rhyolites of the Kapsiki Plateau [25]; fields of Fangataufa [2], of tholeiite lavas of Ahaggar (Taharaq) and alkaline lavas of Ahaggar [1], of Ethiopia [31], of Kerguelen [2,7]. MORB and mantle compositions DMM (depleted), EM1 (enriched), HIMU following [40], PK, Precambrian.

composants majeurs : HIMU (rapport $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ élevé) et EM (manteau enrichi) (voir infra).

5. Discussion et conclusion

Les basaltes transitionnels du plateau Bamoun sont les plus vieux de la LVC. Ils se caractérisent par l'absence d'olivine modale, par la présence d'hypersthène et de quartz normatifs et par de faibles rapports $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ et $\text{Ce}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$.

Ils révèlent des rapports isotopiques initiaux relativement forts en Sr et faibles en Nd. Ces faits peuvent difficilement être interprétés comme une contamination du magma alcalin avec des xénolites granito-gneissiques du substratum. L'hypothèse de la contamination est émise pour des rapports supérieurs à 0,7045 pour $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et inférieurs à 0,5123 pour $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. C'est le cas pour certaines roches du Deccan [8] et du Parana [12], pour lesquelles ces valeurs atteignent 0,706 et 0,5121. De telles données isotopiques sont généralement soutenues par des arguments pétrographiques, comme la présence des enclaves du socle [27,32], ou des arguments géochimiques (forte anomalie négative en Nb, par exemple). Cela n'est pas observé dans les BSO. L'acquisition d'un caractère transitionnel par la seule contamination d'un magma alcalin avec des xénolites du substratum granito-gneissique paraît peu probable pour les BSO, presque totalement dépourvus d'enclaves. Quant aux laves acides de la LVC, telles les rhyolites alcalines du plateau Kapsiki [25], elles diffèrent sensiblement de l'ensemble par leur rapport élevé $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0,512821) relativement à leur rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,71540) (Fig. 6).

En revanche, l'hypothèse d'une source mantellique moins profonde, au niveau lithosphérique, est proposée pour les cas où les rapports isotopiques montrent des

valeurs inférieures à 0,7045 pour $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et supérieures à 0,5123 pour $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Par exemple, le manteau lithosphérique a été mis en évidence comme source des magmas pour les basaltes transitionnels des monts Bambouto au Cameroun [19], Biu au Nigeria [16], d'Afrique de l'Est [31], du Parana au Brésil [12], de Fangataufa et de Kerguelen [2]. Ces basaltes montrent des rapports initiaux du Sr et du Nd compris entre 0,7038 et 0,7065 et entre 0,5122 et 0,5128 respectivement.

Comme pour ceux-ci, le manteau lithosphérique apparaît comme une source importante des magmas des basaltes transitionnels du plateau Bamoun. Le réservoir est proche du pôle EM (plus particulièrement EM1), défini par [40] (Tableau 1), c'est-à-dire un manteau enrichi de sédiments ou de fragments lithosphériques réinjectés et/ou ayant également conservé des caractères de manteau primitif. La nature de la source des BSO est donc différente de celle des BAO, qui, comme pour les autres basaltes alcalins de la LVC, correspond plutôt à un réservoir où le pôle HIMU (caractérisé par un rapport $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ élevé, mais dont l'origine reste encore énigmatique) joue le plus grand rôle. Remarquons également que les rapports Rb/Nb des BSO, proches de 1, caractérisent bien le pôle EM, alors que la valeur de 0,5 pour le BAO est plus proche du pôle HIMU [37].

Les basaltes transitionnels du plateau Bamoun apparaissent ainsi assez exceptionnels, de par leur âge et leur composition, et bien différents des basaltes alcalins classiques de la LVC. Ils montrent des caractéristiques pétrographiques et géochimiques semblables à celles des rares laves analogues de la LVC et à celles de rifts et de certaines îles océaniques. Ils proviendraient d'une fusion partielle, à taux relativement élevé, (suivi d'une légère différenciation)

Tableau 1

Teneurs comparées en éléments incompatibles d'un basalte transitionnel (BSO) du plateau Bamoun avec celles d'un basalte alcalin (BAO) du même plateau [22], de la croûte et de certains réservoirs du manteau [40]

Table 1

A comparison of incompatible elements of a transitional basalt (BSO) from the Bamoun Plateau with those of an alkali basalt (BAO) from the same plateau [22], the crust, and some mantle reservoirs [40]

	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Rb/Nb	K/Nb	Ba/La
BSO (EF)	10,84	0,63	8,13	0,58	364	12,9
BAO (P4)	5,15	0,91	13,84	0,49	198	15,19
Croûte continentale	16,2	2,2	54	4,7	1341	25
Manteau primitif	14,8	0,94	9,0	0,91	323	9,6
N-MORB	46,2	1,07	1,7–8,0	0,36	280	4,0
E-MORB	14,07	1,05	4,9–8,5	nd	215	nd
HIMU–OIB	3,2–5,6	0,66–0,77	4,9–6,9	0,35–0,38	120	6,8–8,7
EM1–OIB	4,2–11,5	0,86–1,19	11,4–17,8	0,88–1,77	300	13,2–16,9
EM2–OIB	4,5–7,3	0,89–1,11	7,3–13,3	0,59–0,85	280	8,3–11,3

d'une source mixte : le pôle HIMU asthénosphérique joue un rôle secondaire (alors que le pôle appauvri DM a un rôle quasi nul) et le manteau lithosphérique peu profond, enrichi, proche du pôle EM, joue un rôle majeur.

Remerciements

A.R. McBirney, B. Bonin, J.-M. Dautria et L. Reisberg sont remerciés pour leurs remarques constructives, ainsi que L. Daumas et L. Delabesse pour leurs dessins. J. Touret et un rapporteur anonyme ont permis d'améliorer significativement le manuscrit.

Références

- [1] F. Aït-Hamou, J.-M. Dautria, J.-M. Cantagrel, J. Dostal, L. Briquieu, Nouvelles données géochronologiques et isotopiques sur le volcanisme cénozoïque de l'Ahaggar (Sahara algérien) : des arguments en faveur de l'existence d'un panache, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila 330 (12) (2000) 829–836.
- [2] J.-M. Bardintzeff, H. Leyrit, H. Guillou, G. Guille, B. Bonin, A. Giret, R. Brousse, Transition between tholeiitic and alkali basalts: Petrographical and geochemical evidence from Fangataufa, Pacific Ocean, and Kerguelen, Indian Ocean, *Geochem. J.* 28 (1994) 489–515.
- [3] B. Déruelle, C. Moreau, C. Nkoumbou, R. Kambou, J. Lissom, E. Njonfang, R.T. Ghogomou, A. Nono, The Cameroon Line: A review, in : A.B. Kampunzu, R.T. Lubala (Eds.), *Magmatism in extensional structural settings – The Phanerozoic African plate*, Springer-Verlag, 1991, pp. 274–327.
- [4] B. Déruelle, J.-M. Bardintzeff, J.-L. Cheminée, I. Ngounouno, J. Lissom, C. Nkoumbou, J. Etamé, J.V. Hell, G. Tanyileke, J. N'ni, B. Ateba, N. Ntepe, A. Nono, P. Wandji, J. Fosso, D.G. Nkouathio, Éruptions simultanées de basalte alcalin et de hawaïite au mont Cameroun (28 mars–17 avril 1999), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila 331 (2000) 525–531.
- [5] J.G. Fitton, H.M. Dunlop, The Cameroon line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt, *Earth Planet. Sci. Lett.* 72 (1985) 23–38.
- [6] J. Fosso, J.-J. Ménard, J.-M. Bardintzeff, P. Wandji, F.M. Tchoua, H. Bellon, Les laves du mont Bangou : une première manifestation volcanique éocène, à affinité transitionnelle, de la Ligne du Cameroun, C. R. Geoscience 337 (2005) 315–325.
- [7] I. Gautier, D. Weis, J.-P. Mennessier, P. Vidal, A. Giret, M. Loubet, Petrology and geochemistry of the Kerguelen Archipelago basalts (South Indian Ocean): Evolution of the mantle sources from ridge to intraplate position, *Earth Planet. Sci. Lett.* 100 (1990) 59–76.
- [8] S.A. Gibson, R.N. Thompson, P.T. Leat, A.P. Dickin, M.A. Morrison, G.L. Hendry, J.G. Mitchell, Asthenosphere-derived magmatism in the Rio Grande rift, western USA: Implications for continental break-up, in: *Magmatism and the causes of continental break-up*, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 68 (1997) 61–89.
- [9] H. Guillou, G. Guille, R. Brousse, J.-M. Bardintzeff, Évolution des basaltes tholéïtiques vers des basaltes alcalins dans le substratum volcanique de Fangataufa (Polynésie française), *Bull. Soc. geol. France* 8 (VI) 3 (1990) 537–549.
- [10] A.N. Halliday, A.P. Dickin, A.E. Fallick, J.G. Fitton, Mantle dynamics: A Sr, Nd, Pb and O isotopic study of the Cameroon Line volcanic chain, *J. Petrol.* 29 (1) (1988) 181–211.
- [11] A.N. Halliday, J.P. Davidson, P. Holden, C. Dewolf, D.C. Lee, J.G. Fitton, Trace-element fractionation in plumes and the origin of HIMU mantle beneath the Cameroon Line, *Nature* 347 (6293) (1990) 523–528.
- [12] C.J. Hawkesworth, K. Gallagher, S. Kelley, M. Mantovani, D.W. Peate, M. Regelous, N.W. Rogers, Parana magmatism and the opening of the South Atlantic, in: *Magmatism and the causes of continental break-up*, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 68 (1992) 221–240.
- [13] Z. Itiga, P. Wandji, J.-M. Bardintzeff, Volcanology, petrology and geochemistry of Tchabal Gangdaba massif (North Cameroon) in the extensional structure of the Cameroon Volcanic Line (Central Africa), in : *Proc. Int. Conf. on The East African Rift System: Development, Evolution and Resources*, International Commission for Earth Sciences in Africa (ICESA), Addis Ababa, Ethiopia, 2004 (5 p.).
- [14] P. Kamgang, Contribution à l'étude géochimique et pétrologique du massif de Nkogam (pays Bamoun : Ouest-Cameroun), thèse de 3^e cycle, université de Yaoundé, Cameroun, 1986 (315 p.).
- [15] G. Kuepouo, J.P. Tchouankoue, T. Nagao, H. Sato, Transitional tholeiitic basalts in the Tertiary Bana volcano-plutonic complex, Cameroon Line, *J. Afr. Earth Sci.* 45 (3) (2006) 318–332.
- [16] D.C. Lee, A.N. Halliday, J.G. Fitton, G. Poli, Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon Line: evidence for a mantle plume origin, *Earth. Planet. Sci. Lett.* 123 (1–4) (1994) 119–138.
- [17] R.W. Le Maitre (Ed.), *Igneous Rocks, A Classification and Glossary of Terms*. (Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002 (236 p.).
- [18] J. Leterrier, R.C. Maury, P. Thonon, D. Girard, M. Marchal, Clinopyroxenes as method of identification of the magmatic affinities of paleovolcanic series, *Earth. Planet. Sci. Lett.* 59 (1982) 139–154.
- [19] A. Marzoli, E.M. Piccirillo, P.R. Renne, G. Bellieni, M. Iacumin, J.B. Nyobe, A.T. Tongwa, The Cameroon Volcanic Line revisited: Petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources, *J. Petrol.* 41 (2000) 87–109.
- [20] E.A.K. Middlemost, The basalt clan, *Earth Sci. Rev.* 11 (1975) 337–364.
- [21] A. Moundi, Le massif du Mbam (pays Bamoun, Ouest Cameroun) : volcanologie, pétrologie et géochimie, thèse de 3^e cycle, université Yaoundé-1, Cameroun, 1993 (130 p.).
- [22] A. Moundi, Les basaltes des plateaux du plateau Bamoun : pétrologie, géochimie et géochronologie – Implications sur les sources des magmas, leurs contextes et évolutions géodynamiques, thèse d'État, université Yaoundé-1, Cameroun, 2004 (259 p.).
- [23] A. Moundi, J.-J. Ménard, E. Reusser, F.M. Tchoua, V.J. Dietrich, Découverte de basaltes transitionnels dans le secteur continental de la ligne du Cameroun (massif du Mbam, Ouest-Cameroun), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila 322 (1996) 831–837.
- [24] I. Ngounouno, B. Déruelle, D. Demaiffe, R. Montigny, Données nouvelles sur le volcanisme cénozoïque du fossé de Garoua (Nord du Cameroun), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila 325 (1997) 87–94.
- [25] I. Ngounouno, B. Déruelle, D. Demaiffe, Petrology of the bimodal Cenozoic volcanism of the Kapsiki plateau (northern-

- most Cameroon, Central Africa), *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 102 (2000) 21–44.
- [26] I. Ngounouno, B. Déruelle, R. Guiraud, J.-P. Vicat, Magmatismes tholéiitiques et alcalins des demi-grabens créacés de Mayo Oulo-Léré et de Babouri-Figuil (Nord du Cameroun–Sud du Tchad) en domaine d’extension continentale, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 333 (2001) 201–207.
- [27] E. Njonfang, C. Moreau, F.M. Tchoua, Caractères pétrographiques et géochimiques des petites coulées basaltiques au Nord de Fouban (plateau Bamoun, Ouest Cameroun), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 322 (1996) 277–283.
- [28] D.G. Nkouathio, J.-J. Ménard, P. Wandji, J.-M. Bardintzeff, The Tombel graben (West Cameroon): A recent monogenetic volcanic field of the Cameroon Line, *J. Afr. Earth Sci.* 35 (2002) 285–300.
- [29] J. N’ni, B. Bonin, R. Brousse, Migration de l’activité magmatique de la ligne du Cameroun : réactivation de segments de failles anciennes du socle panafricain, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 302 (7) (1986) 453–456.
- [30] A. Nono, B. Déruelle, D. Demaiffe, R. Kambou, Tchabal Nganha volcano in Adamawa (Cameroon): Petrology of a continental alkaline lava series, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 60 (1994) 147–178.
- [31] R. Pik, C. Deniel, C. Coulon, G. Yirgu, B. Marty, Isotopic and trace element signatures of Ethiopian flood basalts: Evidence for plume–lithosphere interactions, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63 (15) (1999) 2263–2279.
- [32] K. Rankenburg, J.-C. Lassiter, G. Brey, The role of continental crust and lithospheric mantle in the genesis of Cameroon Volcanic Line lavas: Constraints from isotopic variations in lavas and megacrysts from the Biu and Jos Plateaux, *J. Petrol.* 46 (2005) 169–190.
- [33] K.J. Spencer, D.H. Lindsley, A solution model for coexisting iron-titanium oxides, *Am. Mineral.* 66 (1981) 1189–1201.
- [34] S.S. Sun, N.F. McDonough, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 42 (1989) 313–345.
- [35] P. Wandji, Le volcanisme récent de la plaine du Noun (Ouest Cameroun). *Volcanologie, pétrologie, géochimie et pouzzolanité*, thèse d’État, université Yaoundé-1, Cameroun, 1995 (295 p.)
- [36] P. Wandji, J.-M. Bardintzeff, J.-J. Ménard, F.M. Tchoua, The alkaline fassaita-bearing volcanic province of the Noun Plain (West-Cameroon), *N. Jahrb. Miner. Monatsh.* 1 (2000) 1–14.
- [37] B.L. Weaver, The origin of ocean basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints, *Earth Planet. Sci. Lett.* 104 (1991) 381–397.
- [38] B.L. Weaver, J. Tarney, Lewisian geochemistry and Archean crustal development models, *Earth Planet. Sci. Lett.* 55 (1981) 171–180.
- [39] D. Weis, F.A. Frey, H. Leyrit, I. Gautier, Kerguelen Archipelago revisited: Geochemical and isotopic study of the Southeast Province lavas, *Earth Planet. Sci. Lett.* 118 (1993) 101–119.
- [40] A. Zindler, S.R. Hart, Chemical geodynamics, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 14 (1986) 493–571.