

Geomaterials (Petrology)
**Petrology of the Mio-Pliocene volcanism to the North
and East of Ngaoundéré (Adamawa, Cameroon)**

Oumarou F. Nkouandou^a, Ismaïla Ngounouno^a, Bernard Déruelle^{b,*},
Daniel Ohnenstetter^c, Raymond Montigny^d, Daniel Demaiffe^e

^a *Département des sciences de la Terre, faculté des sciences, université de Ngaoundéré, B.P. 454, Ngaoundéré, Cameroon*

^b *Laboratoire de magmatologie et géochimie inorganique et expérimentale, Institut de physique du Globe de Paris, UMR 7154, université Pierre-et-Marie-Curie et IUFM académie de Versailles, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France*

^c *Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, UFR A9046, 15, rue Notre-Dame-des-Pauvres, B.P. 20, 54501 Vandœuvre-les-Nancy cedex, France*

^d *École et observatoire des sciences de la Terre, UMR 7516, université Louis-Pasteur, 5, rue Descartes, 67100 Strasbourg, France*

^e *Laboratoire de géochimie isotopique, université libre de Bruxelles (U.L.B.), 50, avenue Franklin-Delano-Roosevelt, CP 160/02, 1050 Bruxelles, Belgium*

Received 2 July 2007; accepted after revision 15 October 2007

Available online 20 December 2007

Presented by Claude Jaupart

Abstract

Basaltic flows and thirty-five plugs of felsic alkaline volcanic rocks (phonolites and trachytes) of Mio-Pliocene age are exposed to the north and east of Ngaoundéré (Adamawa, Cameroon). The series is composed of alkaline basalts, hawaiites, mugearites, benmoreites, phonolites, and trachytes. Despite the gap between basaltic and felsic lavas, major- and trace-element distributions are in favour of a co-magmatic origin for the whole series. The basalts are similar in their chemical and isotopic compositions ($0.7031 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_i < 0.7041$; $+2.2 < \varepsilon_{\text{Nd}_i} < +5.0$) to basalts from the continental and oceanic sectors of the 'Cameroon Hot Line'. Peralkaline trachytes have a more radiogenic initial Sr isotopic composition (0.7064); they have probably been contaminated by crustal material. The Ngaoundéré basalts may derive from 1 to 2% partial melting of an infra-lithospheric source of the FOZO type (79% primitive mantle +20% altered MORB +1% pelagic sediments) at ~80-km depth in the garnet stability field. **To cite this article:** O.F. Nkouandou et al., *C. R. Geoscience* 340 (2007).

© 2007 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Résumé

Pétrologie du volcanisme mio-pliocène au nord et à l'est de Ngaoundéré (Adamaoua, Cameroun). Des coulées de laves basaltiques et trente-cinq necks de phonolites et trachytes d'âge Mio-Pliocène sont présents au nord et à l'est de Ngaoundéré (Adamaoua, Cameroun). La série est composée de basaltes alcalins, hawaiïtes, mugéarites, benmoreïtes, phonolites et trachytes. Les distributions des éléments majeurs et en traces indiquent une lignée co-magmatique pour l'ensemble de la série, en dépit du hiatus entre laves basaltiques et felsiques. Les basaltes ont les mêmes caractéristiques géochimiques et isotopiques ($0,7031 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_i < 0,7041$; $+2,2 < \varepsilon_{\text{Nd}_i} < +5,0$) que ceux de la « ligne chaude du Cameroun ». Seuls les trachytes hyperalcalins

* Corresponding author.

E-mail addresses: ofaarouk@yahoo.fr (O.F. Nkouandou), ngounouno@yahoo.fr (I. Ngounouno), deruelle@ccr.jussieu.fr (B. Déruelle), dohnen@crpg-cnrs-nancy.fr (D. Ohnenstetter), Raymond.Montigny@eost.u-strasbg.fr (R. Montigny), ddemaif@ulb.ac.be (D. Demaiffe).

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i \approx 0,7064$ semblent avoir été contaminés en Sr par du matériel crustal. Les basaltes de Ngaoundéré seraient issus de la fusion (1 à 2 %) d'une source mantellique de type FOZO (manteau primitif : 79 % + MORB altéré : 20 % + sédiments pélagiques : 1 %) à grande profondeur (80 km) dans le champ de stabilité du grenat. **Pour citer cet article : O. Nkouandou et al., C. R. Geoscience 339 (2007). Pour citer cet article : O.F. Nkouandou et al., C. R. Geoscience 340 (2007).**

© 2007 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords: Cameroon; Adamawa; Ngaoundéré; Volcanism; Mio-Pliocene; Petrogenesis

Mots clés : Cameroun ; Adamaoua ; Ngaoundéré ; Volcanisme ; Mio-pliocène ; Pétrogenèse

Version française abrégée

Introduction

La zone étudiée couvre environ 400 km² sur le plateau de l'Adamaoua, un horst orienté N70°E [6], Fig. 1). La croûte continentale est peu épaisse (23 km [24]) et la lithosphère amincie (80 km [5]) sur un manteau asthénosphérique de faible densité [24]. Le socle est constitué de roches métamorphiques et de granitoïdes liés à l'orogénèse panafricaine ou antérieurs [20,27,28]. Il est partiellement couvert de laves basaltiques (coulées et rares necks), trachytiques et phonolitiques (35 necks). Un basalte a été daté (K–Ar) à $7,8 \pm 1,4$ Ma, et quatre laves

felsiques entre $8,3 \pm 0,5$ et $10,9 \pm 0,4$ Ma, en conformité avec les données régionales [9,17]. Une série basaltique fortement latéritisée, d'âge Crétacé terminal [15], et une série basaltique récente (inférieur à 1 Ma [29]), avec cônes stromboliens et coulées associées (au sud de Ngaoundéré) sont aussi présentes sur le plateau de l'Adamaoua, où culminent deux stratovolcans alcalins miocènes : Tchabal Djinga [7] et Tchabal Nganha [21].

Pétrographie et minéralogie

La nomenclature repose sur la valeur de l'indice de différenciation (I.D. [30]) et la distribution des phénocristaux pour les phonolites et trachytes (voir Fig. 2). Les

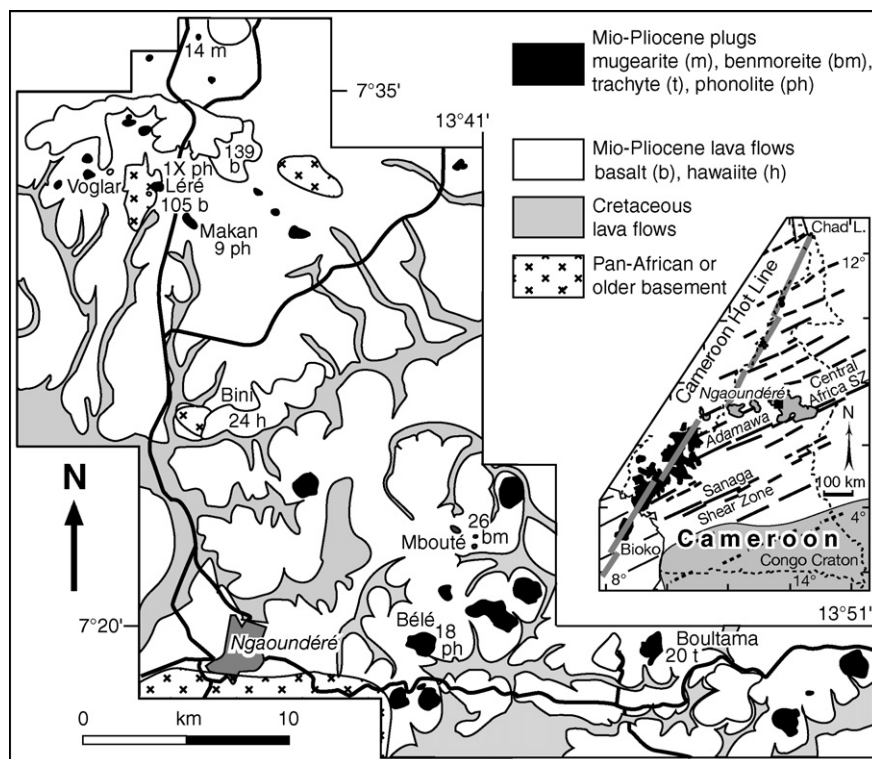


Fig. 1. Geological sketch map of the Ngaoundéré area. Inset: the 'Cameroon Hot Line' (grey lines) and the Adamawa horst (after [4]).

Fig. 1. Carte géologique des zones nord et est de Ngaoundéré. En cartouche, l'Adamaoua et la « ligne chaude du Cameroun » (lignes grises) (d'après [4]).

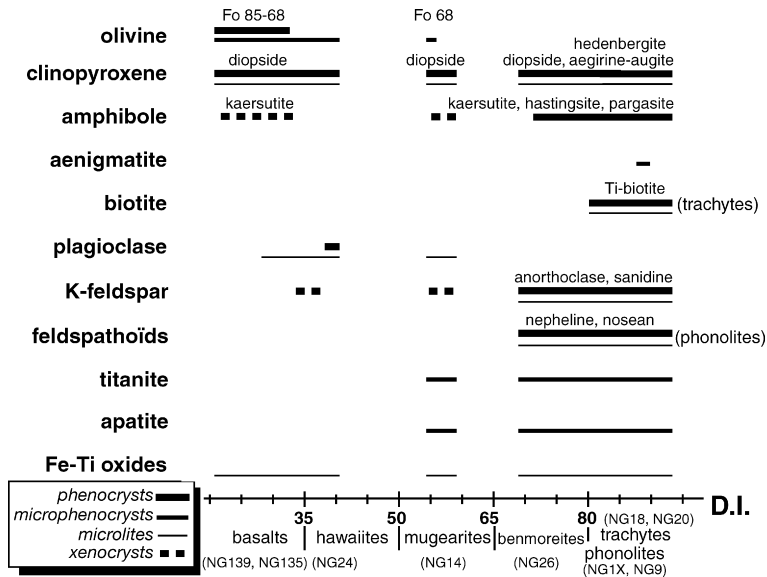


Fig. 2. Distribution of minerals in the Ngaoundéré lava series according to the D.I. [30] of the host lavas.

Fig. 2. Distribution des phénocristaux, microphénocristaux, microlites et xénocristaux des laves de Ngaoundéré en fonction de l'indice de différenciation I.D. [30].

laves basaltiques (basaltes, hawaiiites) et intermédiaires (mugéarites) ont une texture microlitique porphyrique plus ou moins fluidale. Les xénocristaux arrondis (inférieurs à 4 mm) de kaersutite sont déstabilisés en diopside et Ti-magnétite. Les laves felsiques (benmoréites, trachytes, phonolites) ont une texture trachytique. Le pyroxène des benmoréites est un diopside alumineux. Les phonolites (I.D. > 78) contiennent des phénocristaux de diopside à bordure d'hedenbergite sodique et accessoirement d'aenigmatite. Les trachytes (I.D. > 80) sont à phénocristaux de diopside et de hornblende brune (kaersutite, Mg-hastingsite et Fe-pargasite). Les phonolites et trachytes hyperalcalins contiennent de l'augite aegyrique et de l'aegyryne.

Le plagioclase des hawaiiites a cristallisé entre 925 et 1025 °C et à 0,1 GPa [23]. L'évolution de la composition des clinopyroxènes (nomenclature : [18]) est continue, des benmoréites (diopside) aux phonolites et trachytes (augite aegyrique, aegyryne), dans lesquelles les microlites sont riches en Na₂O (13,0 %) et en TiO₂ (6,0 %), témoignant d'une basse température (inférieure à 600 °C, [8]) et d'une faible f_{O_2} ([19]) lors de la cristallisation. La kaersutite s'est équilibrée à 900–1050 °C et à 0,42 GPa [22]. Les fortes teneurs en fluor (jusqu'à 4 % de F) de la Mg-hastingsite (nomenclature : [16]) des phonolites témoignent également d'une faible f_{O_2} lors d'une cristallisation tardi-magmatique [26]. Les fortes teneurs en TiO₂ (jusqu'à 9,3 %) de la biotite correspondent à une cristallisation en dessous de 1000 °C [12], à une f_{O_2} élevée et à une pression inférieure à

0,2 GPa. La néphéline (Ne81-60 Ks13-10 Qz6-30) a cristallisé à une température inférieure à 700 °C [11]. La noséane (Cl: 3,1 %, SO₃: 14,0 %) contient de nombreuses inclusions de pyrite. L'apatite est riche en fluor (3,5 %) et en terres rares légères (La₂O₃: 0,7 % et Ce₂O₃: 1,1 %). La titanite peut avoir des teneurs très élevées en Zr (17 000 ppm) et Nb (13 500 ppm).

Géochimie

Les variations des teneurs en éléments majeurs et en traces sont représentées en fonction des teneurs en Th qui a été choisi comme indice de différenciation (Figs. 3 et 4). Dans un diagramme normalisé au manteau primitif, de fortes anomalies négatives en K et Pb caractérisent les basaltes (Fig. 5), et des anomalies négatives en Ba, P, Sr et Ti les laves felsiques. La phonolite hyperalcaline NG9 a un spectre de terres rares en forme de cuillère.

Les compositions isotopiques initiales (recalculées à 9 Ma) du Sr et du Nd des laves, $0,7031 < (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i < 0,7041$ et $+5,0 > \varepsilon_{\text{Nd}_i} > +2,2$, sont comparables à celles des basaltes des domaines océanique et continental de la « ligne chaude du Cameroun » [4], excepté le trachyte hyperalcalin NG20 qui présente un rapport isotopique initial du Sr significativement plus radiogénique (0,7064) pour une composition du Nd normale ($\varepsilon_{\text{Nd}_i}$: +2,4). Les rapports isotopiques $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mesurés (19,0 à 20,2) se situent plutôt dans la gamme des valeurs (19,3–20,5) du réservoir

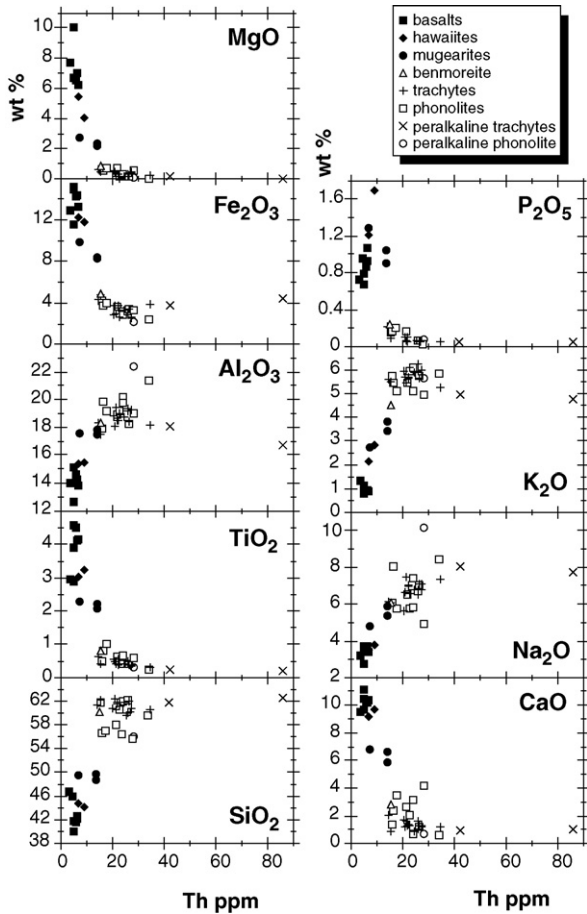


Fig. 3. Major-element distribution diagrams vs. Th for the Ngaoundéré lavas.

Fig. 3. Diagrammes Th (ppm)–éléments majeurs (en% masse) pour les laves de Ngaoundéré.

mantellique FOZO, récemment redéfini, que du réservoir HIMU (20,5–22,0) [25].

Discussion et conclusions

Évolution de la série par cristallisation fractionnée

Les laves basaltiques et les laves felsiques appartiennent vraisemblablement à la même suite évolutive, malgré la présence d'un hiatus (*Daly gap*) entre 47 et 55 % de SiO_2 (Fig. 3), comme en témoignent l'évolution progressive des compositions des phases minérales, les corrélations linéaires passant par l'origine (ou s'écartant peu de la linéarité) entre éléments incompatibles, la forte décroissance des teneurs en éléments de transition au cours de la différenciation (Figs. 3 et 4) et la modélisation du fractionnement des éléments majeurs (bilan de masse), avec des sommes des carrés des résidus, très faibles pour les laves basaltiques (inférieures à 0,07) et

faibles pour les évolutions mugéarite–phonolite et trachyte–trachyte hyperalcalin (inférieures ou égales à 0,3). Le fractionnement de l'ensemble kaersutite + apatite + titanite + clinopyroxène + feldspath potassique a contribué à la forme en cuillère du spectre de terres rares de la phonolite hyperalcaline NG9, qui contient toutes ces phases (Fig. 5).

Mélanges magmatiques lors de la genèse des mugéarites

Les mugéarites (NG14) se situent dans le hiatus entre laves basaltiques et felsiques (Figs. 2 et 3 : Th– SiO_2) et la présence simultanée de phases minérales typiques des laves basaltiques (olivine, plagioclase) et des laves felsiques (kaersutite, feldspath potassique, titanite, apatite), comme on l'a observé à Djinga [7], atteste des mélanges magmatiques lors de leur genèse.

Caractéristiques de la source et fusion partielle

Les faibles teneurs en Ni (124 ppm) et MgO (10,5 %) des basaltes révèlent le caractère évolué de magmas parents issus de la fusion partielle d'une source mantellique lherzolitique. Pour les basaltes alcalins, le déficit en Pb (Fig. 5) peut résulter de l'altération hydrothermale de la croûte océanique et/ou de sa déshydratation lors d'une subduction [3], et les anomalies positives en Nb et Ta [32] peuvent provenir d'un enrichissement mantellique lors d'une subduction. La subduction vers l'est, le long du craton congolais, durant l'orogénèse panafricaine, entre 800 et 630 Ma [20,31], a pu fertiliser le manteau et être à l'origine du caractère enrichi du magma parental des laves de Ngaoundéré. Cette hypothèse est confirmée par les données isotopiques Sr–Nd–Pb de ces laves, en particulier les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ élevés (19,0–20,2). Une modélisation de la fusion partielle (valeurs des coefficients de partage selon [10]) a été réalisée : les basaltes de Ngaoundéré pourraient provenir de la fusion partielle (1 à 2 %) sous la lithosphère (profondeur supérieure à 80 km), dans le champ de stabilité du grenat, d'une source de type FOZO [25], de composition : manteau primitif [13]: 79 % + MORB altéré [14]: 20 % + sédiments pélagiques [14]: 1 %.

1. Geological setting

The Adamawa plateau is a N70°E horst bordered by the Djérem–Mbéré fault to the south and the Adamawa fault to the north. These faults belong to the Central Africa shear zone (CASZ). The CASZ, the Sanaga shear

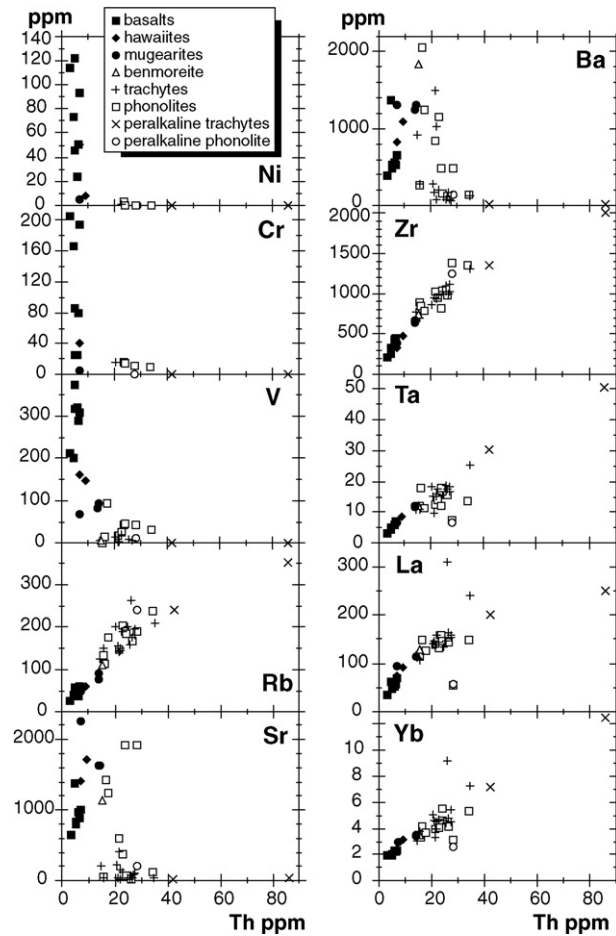


Fig. 4. Trace-element distribution diagrams vs. Th for the Ngaoundéré lavas.

Fig. 4. Diagrammes Th (ppm)–éléments en traces (ppm) pour les laves de Ngaoundéré.

zone, and their extensions into the South-American continent (Patos, Pernambuco) before the opening of the South Atlantic Ocean are major shear zones in Cameroon [6] inherited from the Pan-African [20] or Eburnean orogenies [27]. These shear zones and their extensions crosscut both the continental crust and the upper mantle down to a depth of 190 km [5]. They belong to the numerous N70°E shear zone swarms of the central Atlantic ocean and central Africa that segment the ‘Cameroon Hot Line’ (CHL), the unique example on Earth of an active intraplate alkaline tectono-magmatic alignment simultaneously developed into both oceanic and continental domains [4]. The CHL is oriented N30°E and crosses the Gulf of Guinea and Cameroon on more than 2000 km, from Pagalu Island to Lake Chad (Fig. 1). The CHL is a geostructure distinct from the central Africa and Sanaga shear zones and from the Adamawa horst.

The studied area covers about 400 km² on the Adamawa plateau. A large negative Bouguer gravity

anomaly on the Adamawa plateau combined with seismic data suggests a thin (23 km) continental crust and a thin lithosphere (80 km) on an abnormally low-density asthenospheric mantle [5,24]. North of Ngaoundéré, the basement is composed of metamorphic rocks and granitoids related to the Pan-African orogeny (615 ± 27 to 652 ± 10 Ma) or older (880 ± 44 to 1008 ± 65 Ma) [28]. It is partially covered with basaltic lavas (flows and rare necks) and by thirty-five plugs of trachytes and phonolites, which are presently studied (Fig. 1). K–Ar dates have been obtained for one basalt (7.8 ± 1.4 Ma) and four felsic lavas (8.3 ± 0.5 – 10.9 ± 0.4 Ma), in agreement with regional data [9,17]. A highly lateritised basaltic series of Upper Cretaceous age [15], two alkaline stratovolcanoes of Miocene age (Tchabal Djinga [7] and Tchabal Nganha [21]) and recent basaltic Strombolian cones and associated lava flows (less than 1 Ma, [29]) south of Ngaoundéré are also exposed on the Adamawa plateau.

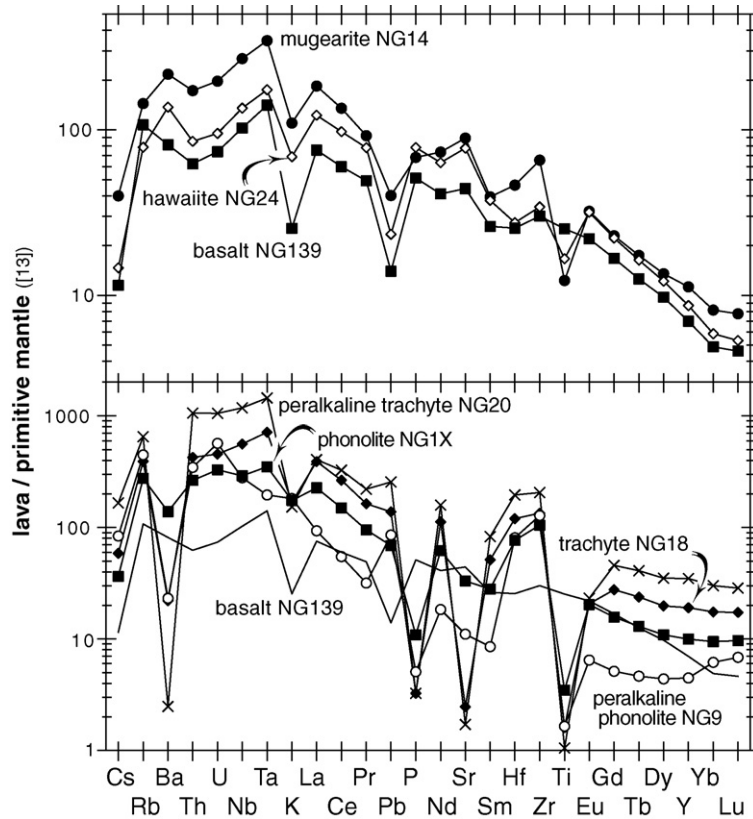


Fig. 5. Primitive mantle-normalized multi-element diagrams for the Ngaoundéré lavas; primitive mantle data after [13].

Fig. 5. Spectres multiéléments normalisés des laves de Ngaoundéré ; manteau primitif selon [13].

2. Petrography and mineralogy

The lava series includes basalts, hawaiites, mugearites, benmoreites, phonolites, and trachytes. Nomenclature is based upon the D.I. [30] and the phenocryst distribution (see Fig. 2). Basaltic (basalts: NG105, NG139; hawaiites: NG24) and intermediate (mugearites: NG14) lavas display a microlitic porphyritic texture. They contain kaersutite xenocrysts (less than 4 mm) that are often destabilized into diopside and Ti-magnetite. Al-rich diopside is present in benmoreites. The benmoreites (NG26) and phonolites (NG1X, NG9) commonly show trachytic flow or microlitic porphyritic textures. Diopside phenocrysts in phonolites are rimmed by a Na-hedenbergite \pm aenigmatite corona. Aegyrine-augite and aegyrine may occur in peralkaline phonolites (NG9). Trachytes (NG18, NG20) have the classical trachytic texture.

Olivine (Fo85-Fo68), diopside, Ti-magnetite ($47 < \text{Usp}\% < 73$) and ilmenite ($37 < \text{TiO}_2 \text{ wt.}\% < 50$) in basalts are similar to the corresponding phases in the basalts from the CHL [4]. The clinopyroxene composition (nomenclature after [18]) of the felsic lavas ranges

from diopside (benmoreites) to aegyrine-augite and aegyrine (phonolites and trachytes). The Na_2O (13.0 wt.%) content of the aegyrine microlites in phonolites and trachytes is noteworthy. High TiO_2 (6.0 wt.%) contents in aegyrine microlites indicate low crystallization temperatures (less than 600 °C, [8]) and low oxygen fugacity [19]. Kaersutite crystals equilibrated at 900–1050 °C at 0.42 GPa [22]. Mg-hastingsite (nomenclature after [16]) is rich in fluorine (4 wt.%) and crystallized under low oxygen fugacity in a late magmatic (subsolidus) stage [26]. Biotite is Ti-rich and crystallized at approximately 1000 °C [12]. The most calcic (An 62–38) plagioclases occur in basalts and hawaiites and crystallized at 925–1025 °C and 0.1 GPa [23]. In mugearites, the Ab content of the K-feldspar evolves progressively from Ab58 to Ab71. Benmoreites, phonolites and trachytes contain anorthoclase (Or50 to Or10). Nepheline crystallized below 700 °C, according to [11]. Nosean (3.1 Cl and 14.0 SO_3 wt.%) contains numerous inclusions of pyrite. Apatite is rich in fluorine (3.5 wt.%) and LREE (La_2O_3 : 0.7 and Ce_2O_3 : 1.1 wt.%). Titanite is enriched in Zr (4200–17,000 ppm) and Nb (6500–13,500 ppm).

3. Geochemistry

Major- and trace-element contents are represented vs. Th content (used as differentiation index) (Figs. 3 and 4). MgO, Fe₂O₃, TiO₂, CaO contents decrease, whereas SiO₂, Al₂O₃, Na₂O and K₂O contents increase from basaltic to felsic lavas. P₂O₅ contents first increase from basalts to hawaiites, then strongly decrease to very low values in trachytes and phonolites. Transition element contents (Ni, Cr, V, Fig. 4) strongly decrease from basalts to felsic lavas. Rb contents increase from basalts (26 ppm) to peralkaline trachytes (350 ppm). Sr and Ba contents first strongly increase from basaltic lavas to mugearites, then strongly decrease in the felsic lavas. Zr (and Hf) contents increase regularly from basalts to trachytes and phonolites and Zr/Hf ratios are high (38 to 57); peralkaline trachyte NG20 has a very high Zr content (greater than 2000 ppm). Ta (and Nb) contents increase regularly for basaltic lavas, but the correlation is poorly defined for felsic lavas and some phonolites plot off the trend. La and Yb contents increase from basalts to peralkaline trachytes; however, some phonolites and trachytes do not plot on the correlation trend. Compared to other felsic lavas, peralkaline phonolite has a high Nb/Ta ratio (25; felsic lavas ≈ 13–15) and low MREE contents. In a primitive-mantle multi-element normalized diagram (Fig. 5), basalts display strong negative K and Pb anomalies.

The initial (recalculated at 9 Ma) Sr isotopic composition of most Ngaoundéré lavas ($0.7031 < (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_I > 0.7041$) is roughly comparable to that of the basalts of the oceanic and continental sectors of the ‘Cameroon Hot Line’ [4], whereas the initial Nd isotopic composition is slightly lower ($+5.0 < \varepsilon_{\text{Nd}_i} < +2.2$). Only one peralkaline trachyte (NG20) has a significantly more radiogenic initial Sr isotopic composition (0.7064), with a normal $\varepsilon_{\text{Nd}_i}$ value (+2.4). The measured $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isotopic ratios (19.0 à 20.2) are closer to those of the recently redefined FOZO reservoir (19.3 to 20.5 [25]) than to those of the HIMU reservoir (20.5–22.0).

4. Discussion and conclusions

4.1. Differentiation of the lava series by crystal fractionation

Basaltic and felsic lavas are probably co-magmatic, despite a small compositional ‘Daly gap’ ($47 < \text{SiO}_2 \text{ wt.}\% < 55$) observed between these two lava groups (Fig. 3). Mineralogical data (progressive evolution of mineral compositions with increasing differentiation)

and geochemical data (regular and progressive major and trace element evolution) suggest that fractional crystallization had a major role in the differentiation of the Ngaoundéré lava series. Mass balance modelling for major elements gave results that are consistent with the distribution of mineralogical phases present as phenocrysts in the lavas. For example, basalt NG139 → hawaiite NG24 (ol: 5.1; cpx: 15.2; pl: 16.0; ox: 9.0; $\Sigma r^2 = 0.01$) → mugearite NG14 (ol: 1.4; cpx: 15.6; pl: 6.3; ox: 6.3; $\Sigma r^2 = 0.07$) → benmoreite NG26 (cpx: 8.3; K-felds: 12.0; ox: 0.8; $\Sigma r^2 = 0.17$) or → phonolite NG1X (cpx: 0.8; hb: 20.0; pl: 9.1; ox: 3.2; apatite: 2.7; $\Sigma r^2 = 0.56$) → peralkaline phonolite NG9 (K-felds: 39.0; ox: 12.0; titanite: 0.1; $\Sigma r^2 = 0.06$) and phonolite NG1X → trachyte NG18 (cpx: 8.0; K-felds: 6.0; ox: 1.0; hauyne: 8.0; $\Sigma r^2 = 0.06$) and trachyte NG18 → peralkaline trachyte NG20 (cpx: 1.0; K-felds: 10.0; ox: 0.2; $\Sigma r^2 = 0.31$). The least-square mass-balance values are low for basaltic lavas and acceptable for the evolutions to benmoreite NG9. The evolution in felsic lavas suggests that magma mixing and/or interaction with fluids were of minor importance during the magma differentiation. Fractional crystallization involving titanite is the most likely explanation for the increase of Nb/Ta ratio and the low MREE contents in peralkaline phonolite NG20. Fractionation of kaersutite + apatite + titanite + clinopyroxene + K-feldspar during the differentiation of felsic lavas (the peralkaline phonolite NG9 contains all these phases as phenocrysts or microphenocrysts) contributed to the spoon shape of their REE patterns and to the negative anomalies in Ti, P, Sr and Ba (Fig. 5) (Table 1).

4.2. Evidence of magma mixing for mugearites

Mugearites ($\sim 49 \pm 1 \text{ wt.}\% \text{ SiO}_2$; i.e. NG14) plot inside the gap between basaltic and felsic magmas. Magma mixing between these two magmas is attested by the occurrence of mineral phases characteristic of both basaltic (olivine, plagioclase) and felsic (kaersutite, K-feldspar, titanite, apatite) lava groups. Similar mugearites from Djinga have been interpreted [7] as products of mixing between basaltic and trachytic magmas.

4.3. Characteristics of the source and partial melting

Rather low Ni (124 ppm) and MgO (10.5 wt.%) contents attest to the evolved character of the parental magmas generated by partial melting of a lherzolitic mantle source. Negative K and Pb anomalies (Fig. 5)

Table 1

Chemical analyses of representative lavas from Ngaoundéré area by ICP-AES (major elements) and ICP-MS (trace elements) at CRPG, Nancy, France. Analytical precision: see [2]; Sr, Nd and Pb isotope: mass spectrometry (VG Sector 54 TIMS), 'université libre de Bruxelles', Brussels, Belgium [1]

Tableau 1

Analyses chimiques (majeurs et traces) et compositions isotopiques Sr–Nd–Pb des laves représentatives des zones nord et est de Ngaoundéré. Les analyses ont été réalisées par ICP-AES (majeurs) et ICP-MS (traces), au CRPG, Nancy, France ; procédure analytique : voir [2]. Les rapports isotopiques du strontium, du néodyme et du plomb ont été déterminés par spectrométrie de masse (VG Sector 54 TIMS) à l'université libre de Bruxelles [1]

Lava type	Basalt	Basalt	Hawaïite	Mugearite	Benmoreite	Phonolite	Peralkaline phonolite	Trachyte	Peralkaline trachyte
Sample nb	NG139	NG105	NG24	NG14	NG26	NG1X	NG9	NG18	NG20
SiO ₂ wt. %	41.76	41.66	44.74	48.78	60.20	57.99	56.01	60.63	62.58
TiO ₂	4.58	4.50	3.01	2.23	0.79	0.63	0.30	0.29	0.19
Al ₂ O ₃	14.00	14.59	15.39	17.51	18.35	18.90	22.43	18.19	16.75
Fe ₂ O ₃ *	14.94	14.23	12.20	8.40	4.85	3.59	2.13	3.86	4.43
MnO	0.22	0.20	0.21	0.23	0.25	0.24	0.18	0.42	0.57
MgO	6.72	6.57	5.42	2.21	0.85	0.75	0.09	0.22	0.03
CaO	10.41	10.20	9.17	6.60	2.85	2.68	0.72	1.17	1.02
Na ₂ O	3.60	3.55	3.53	5.87	6.07	6.50	10.16	7.38	7.71
K ₂ O	0.79	0.92	2.14	3.42	4.53	5.45	5.66	5.25	4.76
P ₂ O ₅	0.79	0.87	1.21	1.05	0.25	0.17	0.08	0.05	0.05
I.L.	1.31	1.78	2.44	3.01	1.26	2.07	1.39	1.62	1.48
Sum	99.12	99.07	99.45	99.31	100.25	98.97	99.14	99.08	99.57
D.I.	27.7	29.2	37.4	58.3	78.1	80.4	93.1	87.9	90.1
Be (ppm)	1.5	1.9	1.9	3.0	4.4	4.9	7.0	9.3	19.0
Rb	58	45	42	77	111	148	240	210	350
Sr	806	967	1413	1623	1140	604	201	45	31
Cs	0.31	0.44	0.39	1.07	1.01	0.98	2.25	1.57	4.45
Ba	493	564	830	1314	1834	840	140	133	15
V	318	319	163	95	7	17	11		
Cr	86.4	25.5	41.0			< D.L.	< D.L.		
Co	47.9	43.1	30.3	11.5	1.8	1.6	0.4	0.3	0.2
Ni	45.8	23.6	50.9			< D.L.	< D.L.		
Cu	28	31	30	5	4	< D.L.	< D.L.		
Zn	143	159	154	158	161	157	141	245	406
Y	27.5	32.1	34.3	44.4	39.7	39.2	17.6	75.1	137.5
Zr	293	435	333	638	748	1021	1244	1307	2004
Nb	63	87	84	166	175	180	172	347	725
Hf	6.8	9.3	7.4	12.4	14.4	20.5	21.7	32.1	52.4
Ta	4.95	5.86	6.14	12.16	11.93	12.33	6.88	25.16	50.51
Th	5.08	6.12	6.93	14.04	15.36	21.56	28.19	34.66	85.86
U	1.50	1.77	1.93	4.00	4.13	6.70	11.57	9.27	21.29
Pb	2.4	3.2	4.1	7.0	11.3	12.1	15.0	24.2	44.9
La	46.3	53.1	75.4	113.0	128.9	139.5	57.4	239.7	249.8
Ce	96	115	157	216	240	240	88	426	524
Pr	11.9	12.8	18.9	22.3	23.9	23.0	7.7	39.6	53.5
Nd	49	56	75	87	89	74	22	133	189
Sm	10.1	11.4	14.5	15.3	13.9	10.9	3.3	19.8	32.1
Eu	3.20	3.56	4.63	4.70	4.23	2.96	0.94	3.01	3.38
Gd	8.60	9.67	11.40	11.76	10.20	8.07	2.63	14.20	23.49
Tb	1.18	1.31	1.54	1.64	1.43	1.22	0.44	2.24	3.85
Dy	6.22	6.88	7.78	8.63	7.67	6.95	2.79	12.64	22.37
Ho	1.06	1.16	1.30	1.53	1.37	1.30	0.58	2.44	4.29
Er	2.55	2.91	3.19	3.90	3.71	3.77	1.85	7.02	12.29
Tm	0.33	0.37	0.40	0.54	0.53	0.57	0.33	1.07	1.89
Yb	2.03	2.29	2.43	3.38	3.54	3.93	2.56	7.24	12.46
Lu	0.29	0.34	0.34	0.49	0.55	0.62	0.44	1.10	1.82
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _{9Ma}		0.70312		0.70331		0.70400	0.70317	0.70434	0.70685
ε _{Nd9Ma}		+5.03		+4.39		+2.20	+3.80	+2.16	+2.38
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb		19.976		19.985		19.502	20.235	19.038	19.296
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb		15.686		15.706		15.681	15.726	15.686	15.695
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		39.563		39.777		39.700	39.805	39.011	39.423

have been interpreted as resulting either from hydrothermal alteration of oceanic crust or from dehydration at great depth (~110 km) during subduction [3]. The Nb and Ta positive anomalies presumably result from the enrichment of these elements in the mantle source during subduction [32]. Subduction towards the east along the Congo craton (northern Cameroon–south-eastern Chad) occurred between 800 and 630 Ma [20,31] during the Pan-African orogeny or earlier [28], and could have fertilized the mantle, generating a FOZO-type reservoir as sources of the Ngaoundéré parental magma. This hypothesis is confirmed by Sr–Nd–Pb isotope data of lavas from Ngaoundéré, in particular the high (19.0–20.2) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios. Modelling points out that the magmas from which the Ngaoundéré basalts are issued could result from 2% partial melting (partition coefficients after [10]) of a FOZO-type [25] source composed of 79% primitive mantle [13] +20% altered MORB [14] +1% pelagic sediments [14]. Melting should have taken place below the lithosphere, at great depth (>80 km) in the garnet stability field.

Acknowledgements

The French ‘ministère de la Coopération’ is acknowledged for providing a grant to O.N. for a nine-month stay in France in the ‘Laboratoire de magmatologie et de géochimie inorganique et expérimentale, université Pierre-et-Marie-Curie’, Paris, and to B.D. for financial support to field work in Cameroon. Stay of B.D. in Ngaoundéré has been substantially supported by the University of Ngaoundéré. The isotopic measurements at Brussels (ULB) were financially supported by FNRS grants to D.D. This article is contribution IPGP No. 2283.

References

- [1] L.D. Ashwal, D. Demaiffe, T.H. Torsvik, Petrogenesis of Neoproterozoic granitoids and related rocks from the Seychelles: the case for an Andean-type arc origin, *J. Petrol.* 43 (2002) 45–83.
- [2] J. Carignan, P. Hild, G. Mével, J. Morel, D. Yeghicheyan, Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure on-line liquid chromatography coupled to ICP-MS: a study of geochemical reference materials BR, DR-N, UB-N, AN-G and GH, *Geostandards Newslett.* 25 (2001) 187–198.
- [3] C. Chauvel, A.W. Hofmann, P. Vidal, HIMU-EM: The French Polynesian connection, *Earth Planet. Sci. Lett.* 110 (1992) 99–119.
- [4] B. Déruelle, I. Ngounouno, D. Demaiffe, The ‘Cameroon Hot Line’ (CHL): A unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres, *C. R. Geoscience* 339 (2007) 589–600.
- [5] L. Dorbath, C. Dorbath, G. Stuart, D. Fairhead, Structure de la croûte sous le plateau de l’Adamaoua (Cameroun), *C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. II* 298 (1984) 539–542.
- [6] J.-F. Dumont, Étude structurale des bordures nord et sud du plateau de l’Adamaoua : influence du contexte atlantique, *Géodynamique* 2 (1987) 55–68.
- [7] J. Ézangono, B. Déruelle, J.-J. Ménard, Benmoreites from Tchabal Djinga volcano (Adamaoua, Cameroon): products of kaersutite + plagioclase assimilation by a trachytic magma, *Terra Abstr. Suppl. 1, Terra Nova* 7 (1995) 161.
- [8] A.K. Ferguson, The natural occurrence of aegyrine-neptunite solid solution, *Contrib. Mineral. Petrol.* 60 (1977) 247–253.
- [9] J. Gouhier, J. Nougier, D. Nougier, Contribution à l’étude volcanologique du Cameroun (« ligne du Cameroun » – Adamaoua), *Ann. Fac. Sci. Cameroun* 17 (1974) 3–48.
- [10] T.H. Green, Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis – Sedona 16 years later, *Chem. Geol.* 117 (1994) 1–36.
- [11] D.L. Hamilton, Nephelines as crystallization temperature indicators, *J. Geol.* 69 (1961) 321–329.
- [12] K. Hansen, Lamprophyres and carbonatitic lamprophyres related to rifting in the Labrador Sea, *Lithos* 13 (1980) 145–153.
- [13] A.W. Hofmann, Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, oceanic crust, *Earth Planet. Sci. Lett.* 90 (1988) 297–314.
- [14] K.A. Kelley, T. Plank, J. Ludden, H. Staudigel, Composition of altered oceanic crust at ODP sites 801 and 1149, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4 (2003), doi:10.1029/2002GC000435.
- [15] M. Lasserre, Contribution à l’étude géologique de l’Afrique. Étude de la partie orientale de l’Adamaoua (Cameroun central), *Bull. Dir. Min. Geol.* 4 (1961) 1–131.
- [16] B.E. Leake and 20 co-authors, Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names, *Mineral. Mag.* 61 (1997) 295–321.
- [17] A. Marzoli, P.R. Renne, E.M. Piccirillo, C. Francesca, G. Bellieni, A.J. Melfi, J.B. Nyobe, J. N’ni, Silicic magmas from the continental Cameroon Volcanic Line (Oku, Bambouto and Ngaoundere): ^{40}Ar – ^{39}Ar dates, petrology, Sr–Nd–O isotopes and their petrogenetic significance, *Contrib. Mineral. Petrol.* 135 (1999) 133–150.
- [18] N. Morimoto, J. Fabriès, A.K. Ferguson, I.V. Ginzburg, M. Ross, F.A. Seifert, J. Zussman, K. Aoki, G. Gottardi, Nomenclature of pyroxenes, *Mineral. Mag.* 52 (1988) 535–550.
- [19] T.F.D. Nielsen, The occurrence and formation of Ti-aegyrines in peralkaline syenites. An example from the Tertiary ultramafic alkaline Gardiner complex, East Greenland, *Contrib. Mineral. Petrol.* 69 (1979) 235–244.
- [20] E. Njonfang, V. Ngako, M. Kwekam, P. Affaton, Les orthogneiss calco-alcalins de Foumban–Bankim : témoins d’une zone interne de marge active panafricaine en cisaillement, *C. R. Geoscience* 338 (2006) 606–616.
- [21] 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.
- [22] T. Oba, K. Yagi, Y. Hariya, Stability relations of kaersutite reinvestigated and natural and synthetic samples, *Congr. I.M.A.* (1982) Karma 282.
- [23] I. Parsons, W.L. Brown, Sidewall crystallization in the Klokken intrusion: Zoned ternary feldspars and coexisting minerals, *Contrib. Mineral. Petrol.* 98 (1988) 431–443.

- [24] Y.H. Poudjom Djomani, M. Diament, M. Wilson, Lithospheric structure across the Adamawa plateau (Cameroon) from gravity studies, *Tectonophysics* 273 (1997) 317–327.
- [25] A. Stracke, A.W. Hofmann, R.S. Hart, FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6 (2005), doi:10.1029/2004GC000824, Q05007.
- [26] D.F. Strong, R.P. Taylor, Magmatic-subsolidus and oxidation trends in composition of amphiboles from silica-saturated per-alkaline igneous rocks, *Tschemaks, Mineral. Petrol. Mitt.* 32 (1984) 211–222.
- [27] J.N. Tchakounté, S.F. Toteu, W.R. Van Schmus, J. Penaye, É. Deloule, J. Mvondo Ondoua, M.B. Houketchang, A.A. Ganwa, W.M. White, Evidence of ca 1.6-Ga detrital zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implication for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt north of the Congo craton, *C. R. Geoscience* 339 (2007) 132–142.
- [28] R. Tchameni, A. Pouclet, J. Penaye, A.A. Ganwa, S.F. Toteu, Petrography and geochemistry of the Ngaoundéré Pan-African granitoids in central North Cameroon: implications for their sources and geological setting, *J. Afr. Earth Sci.* 44 (2006) 511–529.
- [29] R. Temdjim, I.K. Njilah, P. Kamgang, C. Nkoumbou, Données nouvelles sur les laves felsiques de Ngaoundéré (Adamaoua, ligne du Cameroun) : chronologie K–Ar et pétrologie, *Afr. J. Sci. Technol.* 5 (2004) 113–123.
- [30] C.P. Thornton, O.F. Tuttle, Chemistry of igneous rocks, I. Differentiation Index, *Am. J. Sci.* 258 (1960) 664–684.
- [31] S.F. Toteu, Geochemical characterization of the main petrographical and structural units of Northern Cameroon: implications for Pan-African evolution, *J. Afr. Earth Sci.* 10 (1990) 615–624.
- [32] B.L. Weaver, The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints, *Earth Planet Sci. Lett.* 104 (1991) 381–397.