



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1239–1244



COMPTES RENDUS

GEOSCIENCE

<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géomatériaux

L'hétérogénéité du manteau supérieur à l'aplomb du volcan de Nyos (Cameroun) révélée par les enclaves ultrabasiques

Robert Temdjim^a, Pierre Boivin^{b,*}, Gilles Chazot^b, Claude Robin^b, Émilie Rouleau^b

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

^b Laboratoire « Magmas et Volcans », université Blaise-Pascal, OPGC, CNRS & IRD, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand cedex, France

Reçu le 1^{er} juin 2004 ; accepté après révision le 13 juillet 2004

Présenté par Claude Jaupart

Résumé

Les dépôts volcaniques du lac Nyos (Cameroun) contiennent des enclaves ultrabasiques de natures variées : lherzolites, harzburgites et webstérites, dont certaines contiennent de l'amphibole. Les compositions en éléments majeurs et en éléments traces des amphiboles et des clinopyroxènes permettent de mettre en évidence un épisode ancien de fusion partielle. Deux épisodes d'enrichissement en éléments incompatibles sont identifiés, l'un riche en terres rares légères et affectant des échantillons préalablement appauvris, l'autre très riche en U et Th et plus pauvre en terres rares. La relation entre ces deux derniers épisodes n'est pas établie. **Pour citer cet article :** R. Temdjim *et al.*, *C. R. Geoscience* 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Upper-mantle heterogeneities beneath the Nyos volcano (Cameroon) from the study of ultramafic xenoliths. Volcanic deposits from the lake Nyos (Cameroon) contain ultrabasic xenoliths: lherzolites, harzburgites and websterites, sometimes containing amphibole. Major and trace element compositions of clinopyroxene and amphibole allow the recognition of an old depletion event followed by two episodes of incompatible-element enrichment. One is high in light rare-earth elements, while the other one is low in these elements, but high in U and Th. Their relative chronology is not yet established. **To cite this article:** R. Temdjim *et al.*, *C. R. Geoscience* 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Cameroun ; Nyos ; enclaves ultrabasiques ; géochimie ; métasomatisme

Keywords: Cameroon; Nyos; ultramafic xenoliths; geochemistry; metasomatism

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : p.boivin@opgc.univ-bpclermont.fr (P. Boivin).

1. Introduction

Le lac Nyos occupe un cratère de maar d'âge Holocène appartenant à la ligne volcanique du Cameroun. Au mois d'août 1986, il est devenu tristement célèbre à la suite d'un dégazage brutal de CO₂ qui a provoqué la mort de 1746 personnes [4]. Les dépôts de maar recèlent de nombreux xénolites d'origine crustale ou mantellique. Ces derniers présentent tous les intermédiaires depuis des péridotites jusqu'à des pyroxénites.

Des travaux préliminaires [6,10] décrivent en partie ces enclaves, mais un échantillonnage plus complet nous permet de présenter des résultats originaux sur la nature du manteau sous-jacent, impliqué dans la mise en place et le fonctionnement de la Ligne du Cameroun (Fig. 1), vaste structure linéaire magmatique et volcanique de plus de 1600 km de longueur [1,5].

L'origine de la Ligne du Cameroun a fait l'objet de nombreuses controverses. L'hypothèse selon laquelle elle serait l'expression en surface de la présence d'un panache mantellique ne s'accorde pas pleinement avec la distribution du volcanisme en fonction de l'âge [8] et le caractère encore actif du mont Cameroun. La présence d'un panache fossile, accrété sous la lithosphère et remobilisé au-dessus d'une anomalie thermique récente contrôlée tectoniquement est un des modèles les plus récents permettant de concilier les données géochimiques et géochronologiques disponibles [3,6,9].

2. Cadre géologique

Localisé dans la partie centrale de la ligne volcanique du Cameroun, le lac Nyos se trouve à 25 km à l'ouest de la ville de Wum (province du Nord-Ouest) et à environ 250 km au NNE du mont Cameroun.

Le cratère d'origine phréatomagmatique qu'il occupe, à parois très verticales, est entaillé dans le substratum granitique précambrien et cerné par des dépôts pyroclastiques. Un événement strombolien a émis une coulée basaltique vers le nord-ouest. La formation du maar a été datée à 400 ans BP par ¹⁴C sur des bois carbonisés associés aux scories stromboliennes [7], mais cet âge a été remis en cause et serait de plusieurs milliers d'années [2].

3. Nature des enclaves

Douze échantillons ont été analysés à la microsonde électronique (Camebax SX 100) en mode WDS. L'étude des textures a été conduite à partir des images de répartition de Na, Mg, Al et Ca corrélées avec le logiciel Multispec (© Purdue Research Foundation). La composition modale a été obtenue après une classification par maximum de vraisemblance. Les éléments en trace des clinopyroxènes et des amphiboles ont été dosés par ICP-MS, couplé à un système d'ablation laser.

Les incertitudes données ci-après sont calculées avec une confiance de 95 %.

Les enclaves mantelliques de Nyos possèdent une texture le plus souvent protogranulaire à gros grain (> 1 cm) ou à grain fin (< 5 mm); les cristaux d'olivine et d'enstatite ont des contours courbes et présentent parfois des sous-grains. Les joints des cristaux millimétriques sont souvent plans et délimitent des points triples, à la différence des minéraux de grande taille, qui ne montrent aucune fabrique. Quatre échantillons présentent cependant des caractères intermédiaires entre la structure protogranulaire et la structure porphyroclastique, avec des grains allongés et la présence de néoblastes autour des grands cristaux. Ces différentes textures ne semblent pas corrélées à la nature pétrographique de la roche.

Les enclaves sont de nature ultramafique. Elles présentent une large gamme de composition (Fig. 2) et se regroupent en deux catégories, avec quelques échantillons mixtes en cours d'étude : (i) des péridotites, représentées par des lherzolites et des harzburgites, et (ii) des pyroxénites, uniquement constituées de webstérites à olivine.

4. Composition en éléments majeurs des minéraux

À côté des minéraux cardinaux olivine, enstatite et diopside, la paragenèse est systématiquement complétée par du spinelle et, de façon fréquente, par de l'amphibole. Tous les minéraux tendent mutuellement à l'équilibre, puisqu'ils constituent ensemble des plages ayant une texture à joints triples. Les cristaux d'olivine (Fo 89-91) montrent peu de variations d'un type d'enclave à l'autre. L'orthopyroxène, qui contient occasionnellement de fines la-

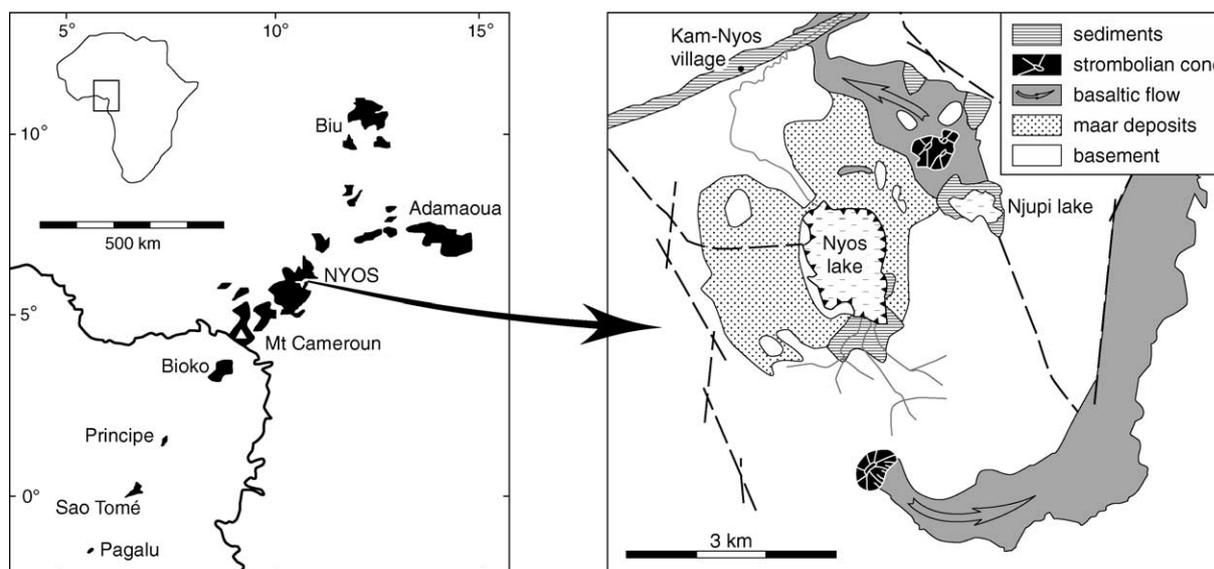


Fig. 1. Cadre géologique et localisation du lac de Nyos au sein de la Ligne volcanique du Cameroun.

Fig. 1. Geological map of the Nyos area.

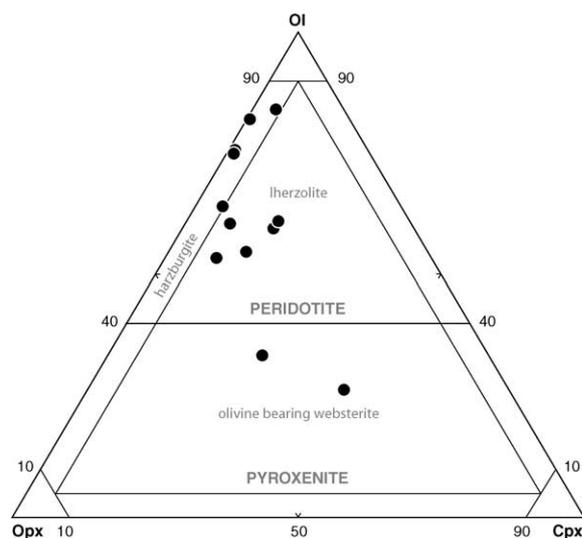


Fig. 2. Composition modale des enclaves étudiées.

Fig. 2. Modal composition of the studied xenoliths.

melles d'exsolution de clinopyroxène, ne varie pas davantage ($En = 91 \pm 0,5 \%$; $Al_2O_3 = 4 \pm 0,3 \%$), à l'inverse du clinopyroxène, un diopside chromifère dont la composition est significativement différente d'un faciès à l'autre. Ces variations concernent tous les éléments. Ainsi, les éléments majeurs Mg–Ca–Fe

(Fig. 3a) divisent les échantillons en trois groupes : les harzburgites (H, $En_{48,4 \pm 0,2} Wo_{47,3 \pm 0,3} Fs_{4,3 \pm 0,1}$), les webstérites (W), très similaires aux Iherzolites (L, $En_{49,2 \pm 0,3} Wo_{45,8 \pm 0,4} Fs_{5 \pm 0,2}$) et une Iherzolite (NY-23), avec $En_{49,9 \pm 0,2} Wo_{43,2 \pm 0,3} Fs_{6,8 \pm 0,1}$. Ces regroupements sont confirmés par un diagramme aluminium en fonction de $[Mg] = Mg / (Mg + Fe_t)$ (Fig. 3b), qui, en outre, sépare nettement les Iherzolites L des webstérites. La teneur en Al est croissante des harzburgites ($0,224 \pm 0,004$ afu) aux webstérites ($0,270 \pm 0,004$ afu), Iherzolites L ($0,280 \pm 0,004$ afu) et NY-23 ($0,294 \pm 0,04$ afu). Le comportement du chrome est globalement inverse : sa teneur est faible dans NY-23 ($0,71 \pm 0,03 \%$) et très élevée dans la harzburgite NY-08, avec $1,5 \pm 0,06 \%$. Une webstérite (NY-03) se distingue par son diopside très pauvre en chrome ($0,43 \pm 0,04 \%$).

Le spinelle, fréquemment associé à l'amphibole lorsque celle-ci est présente, montre lui aussi des variations de composition, cohérentes avec celles décrites précédemment : alumineux dans les Iherzolites ($Cr / (Cr + Al) = 0,10$), il devient de plus en plus chromifère des webstérites (0,18) aux harzburgites (0,33). Là encore, la webstérite NY-03 se distingue par un spinelle peu chromifère (0,06).

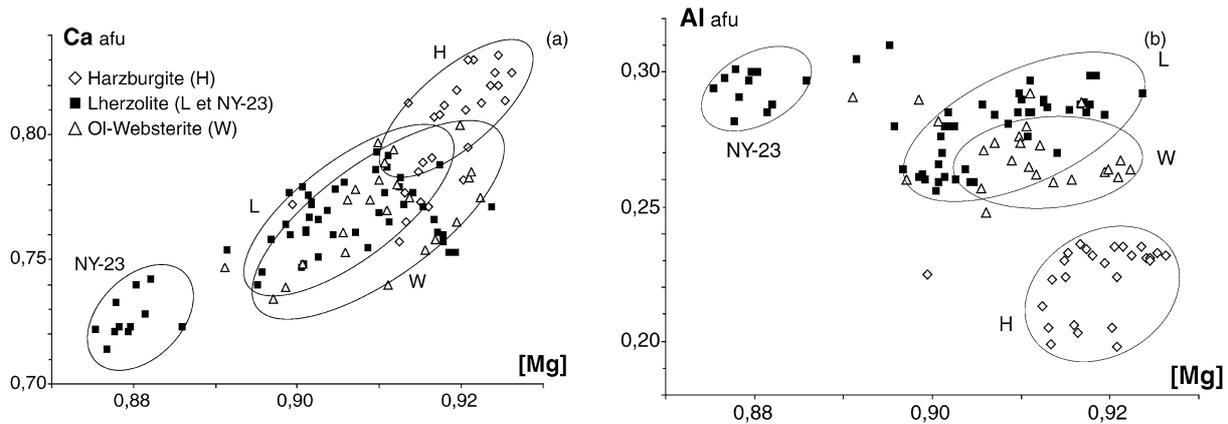


Fig. 3. Composition des clinopyroxènes des enclaves de Nyos.

Fig. 3. Clinopyroxene composition from the Nyos xenoliths.

Les amphiboles sont des paragasites qui présentent des variations de composition d'un faciès à l'autre, analogues à celles des autres minéraux. Elles sont relativement ferrifères, titanifères et pauvres en chrome dans la lherzolite NY-23 ($Mg^* = 86\%$, $TiO_2 = 3,1\%$, $Cr_2O_3 = 1\%$), ou bien magnésiennes, chromifères et pauvres en titane dans les harzburgites ($Mg^* = 89\%$, $TiO_2 = 0,35\%$, $Cr_2O_3 = 2,3\%$).

5. Composition en éléments traces

La composition en éléments traces des clinopyroxènes et des amphiboles, lorsqu'elles sont présentes, a été déterminée dans six échantillons, deux pyroxénites et quatre lherzolites. Aucune différence systématique dans les teneurs en éléments traces n'a été relevée entre ces deux types de roches.

Les compositions en terres rares des minéraux sont présentées sur la Fig. 4 et montrent une grande hétérogénéité d'un échantillon à l'autre.

À l'exception des échantillons NY-05 et NY-23, tous les minéraux présentent des spectres de terres rares lourdes plats, avec des valeurs environ 10 fois supérieures à celles de la chondrite et un appauvrissement en terres rares légères plus ou moins marqué. Ces compositions appauvries ont déjà été observées dans d'autres localités du Cameroun [5]. Pour les échantillons NY-03 et NY-10, les teneurs en terres rares des clinopyroxènes et des amphiboles sont très voisines, montrant ainsi que ces minéraux sont à l'équilibre,

comme cela a déjà été mis en évidence dans un échantillon de webstérite à grenat et amphibole provenant d'une autre localité [5].

Parmi les échantillons appauvris en terres rares légères, plusieurs d'entre eux sont aussi caractérisés par un enrichissement en terres rares les plus incompatibles (La, Ce, éventuellement Pr). Cet enrichissement est visible dans un grain de clinopyroxène de l'échantillon NY-10, mais apparaît surtout caractéristique de tous les clinopyroxènes de l'échantillon NY-07.

La pyroxénite NY-03 montre un enrichissement en terres rares légères, variable dans les différents grains analysés. Visible uniquement sur le lanthane pour certains clinopyroxènes, cet enrichissement affecte aussi le cérium et éventuellement le praséodyme dans certains clinopyroxènes et certaines amphiboles. Il est similaire, mais moins prononcé, que les clinopyroxènes de lherzolites à spinelle analysés par Lee et al. [5].

Les échantillons NY-05 et NY-23 diffèrent par un enrichissement très marqué en terres rares légères et intermédiaires, alors que les concentrations en terres rares lourdes sont identiques à celles des autres échantillons.

6. Discussion

La nature variée des enclaves et les compositions en éléments majeurs et en éléments traces de leurs minéraux mettent en évidence une grande hétérogénéité du manteau à l'aplomb du lac Nyos. L'appauvrisse-

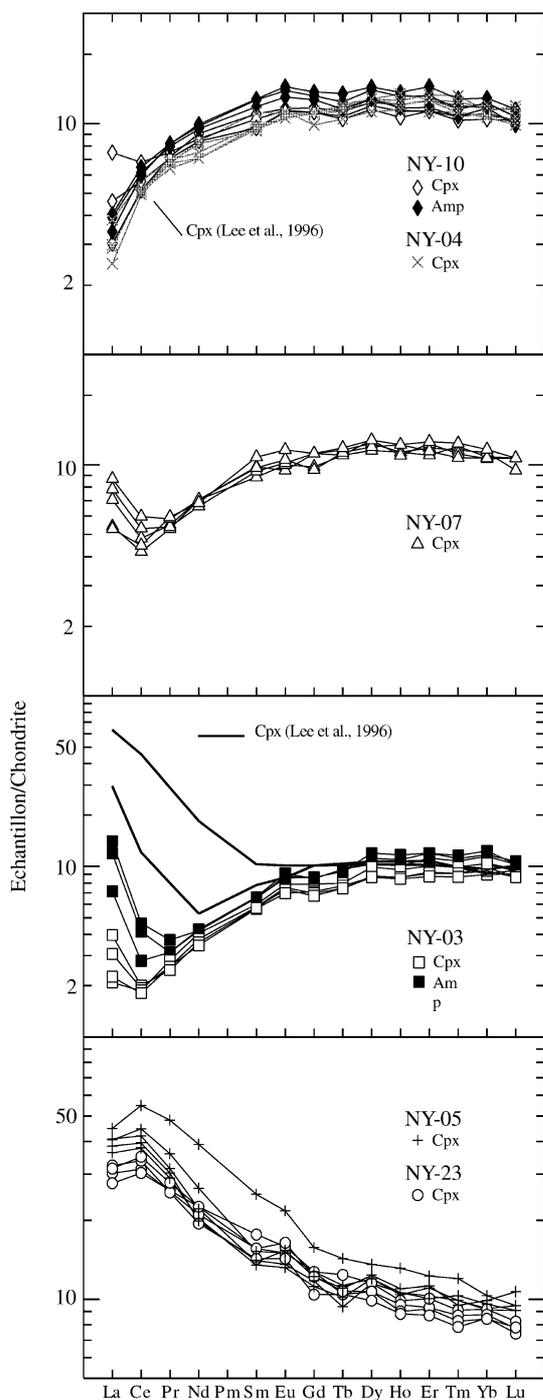


Fig. 4. Composition en terres rares des clinopyroxènes et des amphiboles, comparée aux échantillons de Lee et al. [5].

Fig. 4. Rare earth composition of clinopyroxenes and amphiboles compared to samples from Lee et al. [5].

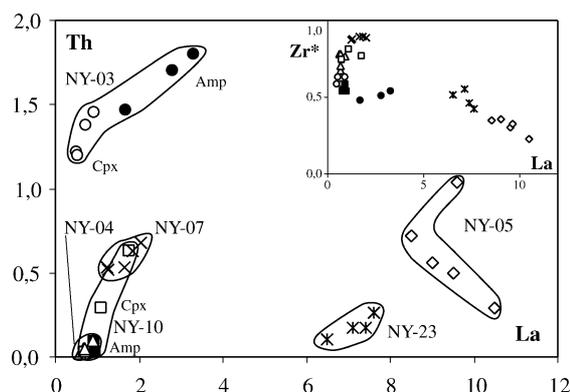


Fig. 5. Teneurs en Th et La des minéraux des roches de Nyos. Les symboles ouverts représentent les clinopyroxènes, les symboles fermés représentent les amphiboles. Le diagramme en médaillon représente $Zr^* = Zr_n / ((Nd_n + Sm_n) / 2)$ en fonction de La.

Fig. 5. Th and La composition of minerals. Open symbols: clinopyroxenes; closed symbols: amphiboles. The diagram in insert represents $Zr^* = Zr_n / ((Nd_n + Sm_n) / 2)$ vs La.

ment en terres rares légères, présent dans la plupart des échantillons, résulte sans doute d'un épisode antérieur de fusion partielle. L'absence de fractionnement chimique au niveau des terres rares lourdes indique que cette fusion s'est produite dans le faciès des lherzolites à spinelle. Elle a permis l'appauvrissement de certains échantillons en clinopyroxène et la formation de harzburgites contenant des clinopyroxènes appauvris en Al. Cette fusion partielle, produite à un taux élevé et à relativement faible profondeur, a déjà été mise en évidence dans quelques autres xénolites du Cameroun et pourrait être liée aux événements panafricains [6]. Le fait que les webstérites soient aussi affectées par cette fusion montre que leur formation est antérieure à ces événements panafricains.

L'enrichissement plus ou moins important des clinopyroxènes et des amphiboles en terres rares les plus incompatibles témoigne de l'interaction de ces roches avec un fluide métasomatique lui-même enrichi en ces éléments. Les variations de composition entre les différents grains de clinopyroxène ou d'amphibole, observées par exemple dans l'échantillon NY-03, indiquent l'existence d'hétérogénéités chimiques d'échelle centimétrique, sans doute liées à l'évolution de la composition chimique du fluide au cours de la percolation à travers le manteau.

Les fortes teneurs en Al des clinopyroxènes de l'échantillon NY-23 et, dans une moindre mesure, de

NY-05 indiquent que ces échantillons n'ont pas été affectés par un important degré de fusion partielle avant leur enrichissement en éléments incompatibles. Ces deux échantillons ont des caractéristiques chimiques tout à fait singulières, qui les distinguent nettement de tous les autres. Dans le diagramme $Th = f(La)$ (Fig. 5), ils montrent de très fortes valeurs de La (> 6 ppm) pour des teneurs en Th inférieures à 0,5 ppm pour NY-23, et comprises entre 0,2 et 1 ppm pour NY-05. À l'opposé, les autres échantillons analysés présentent de faibles teneurs en La (< 4 ppm), corrélées à des concentrations en Th qui peuvent dépasser 1,5 ppm dans NY-03.

Ces données mettent donc en évidence deux types d'enrichissements en éléments traces dans cette portion du manteau ouest-africain. La plupart des échantillons présentent un faible enrichissement en terres rares légères, mais de fortes teneurs en U et Th. NY-05 et NY-23 ont, au contraire, été enrichis par des fluides très riches en terres rares, mais moins riches en U et Th et appauvris en Zr et Hf, comme le montre le diagramme $Zr^* = f(La)$ en médaillon dans la Fig. 5.

Dans leur étude de quelques xénolites provenant de différentes localités du Cameroun, Lee et al. [6] ont mis en évidence l'existence d'un métasomatisme postérieur à l'épisode de fusion partielle, qu'ils ont relié à la fragmentation précoce de la Pangée. Ces deux épisodes sont enregistrés sous le lac Nyos par l'appauvrissement en terres rares légères, suivi du métasomatisme riche en U et Th des échantillons NY-03, 04, 07 et 10.

En revanche, les compositions atypiques des lherzolites NY-05 et NY-23 n'avaient jamais été reportées et pourraient être reliées aux épisodes volcanotectoniques récents ayant conduit à la mise en place de la ligne volcanique du Cameroun.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à une bourse ESCD attribuée par l'IRD et un support financier du ministère français de la Coopération. M. Veschambre et

J.-L. Devidal sont remerciés pour leur aide dans l'acquisition des données et J. Touret et D. Demaiffe pour leurs commentaires sur la première version de ce manuscrit.

Références

- [1] B. Déruelle, C. Moreau, C. Nkoumbou, R. Kambou, J. Lissom, E. Njonfang, R.T. Ghogomu, A. Nono, The Cameroon Line: a review, in: A.B. Kampunzu, R.T. Lubala (Eds.), *Magmatism in Extensional Structural Setting*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1990, pp. 274–328.
- [2] S.J. Freeth, D.C. Rex, Constraints on the age of Lake Nyos, Cameroon, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 97 (2000) 261–269.
- [3] A.N. Halliday, A.P. Dickin, A.E. Fallick, J.G. Fitton, Mantle dynamics: a Nd, Sr, Pb and O isotopic study of the Cameroon Line volcanic chain, *J. Petrol.* 29 (1988) 181–211.
- [4] G.W. Kling, M.A. Clark, H.R. Compton, J.D. Devine, W.C. Evans, A.M. Humphrey, E.J. Koenigsberg, J.P. Lookwood, M.L. Tuttle, G.N. Wagner, The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa, *Science* 236 (1987) 125–232.
- [5] 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 (1994) 119–138.
- [6] D.C. Lee, A.N. Halliday, G.R. Davies, E.J. Essene, G. Fitton, R. Temdjim, Melt enrichment of shallow depleted mantle: a detailed petrological, trace element and isotopic study of mantle-derived xenoliths and megacrysts from Cameroun line, *J. Petrol.* 37 (1996) 415–437.
- [7] J.P. Lockwood, M. Rubin, Origin and age of the Lake Nyos maar, Cameroon, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 39 (1989) 117–124.
- [8] A. Marzoli, P.R. Renne, E.M. Picirillo, 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.
- [9] A. Marzoli, E.M. Picirillo, 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.
- [10] R. Nana, C. Nkoumbou, J.-P. Tchouankoue, C. Tabod, F.-M. Tchoua, Preliminary studies of some peridotite xenoliths from Nyos volcanoes (Cameroon); implications for the evaluation of volcanic hazards, *Curr. Res. Volcanic Lakes* 9 (1996) 21–24.