



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 289–296



Géomatériaux

Les monchiquites de Tchircotché, vallée de la haute Bénoué (Nord du Cameroun)

The monchiquites from Tchircotché, Upper Benue valley (northern Cameroon)

Ismaila Ngounouno ^a, Bernard Déruelle ^{b,*}, Daniel Demaiffe ^c, Raymond Montigny ^d

^a *Département des sciences de la Terre, faculté des sciences, université de Ngaoundéré, BP 454, Ngaoundéré, Cameroun*

^b *Laboratoire de magmatologie et géochimie inorganique et expérimentale, CNRS-UMR 7047, IUFM, académie de Versailles & université Pierre-et-Marie-Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France*

^c *Laboratoire de géochimie isotopique, université libre de Bruxelles, 50, av. Franklin-Delano-Roosevelt, CP 160/02, 1050 Bruxelles, Belgique*

^d *École et observatoire de physique du globe, UMR CNRS 7516, université Louis-Pasteur, 5, rue Descartes, 67084 Strasbourg, France*

Reçu le 4 novembre 2002 ; accepté le 10 février 2003

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Des filons de monchiquites d'âge Cénozoïque ($37,5 \pm 2,3$ Ma) recoupent les grès crétacés à Tchircotché dans la vallée de la haute Bénoué (Nord du Cameroun). La différenciation de la série des monchiquites s'explique par la cristallisation fractionnée d'olivine, de clinopyroxène, de magnétite, d'ilménite et d'apatite. Une roche étudiée possède une faible valeur de rapport isotopique initial du strontium ($0,70369 \pm 10$), semblable à celles des basaltes de la Ligne du Cameroun. La croûte continentale ne semble pas avoir joué de rôle significatif dans la genèse des monchiquites.

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Dykes of monchiquites of Cainozoic age (37.5 ± 2.3 Ma) are intrusive in Cretaceous sandstones in the Tchircotché area, Upper Benue valley (northern Cameroon). The differentiation of the monchiquites is explained by crystal fractionation of olivine, clinopyroxene, magnetite, ilmenite and apatite. A studied rock has low Sr-isotope ratio (0.70369 ± 10), which is similar to those of the alkali basalts of the Cameroon Line. Therefore the continental crust appears to have no significant role in the genesis of the monchiquites.

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Ligne du Cameroun ; Vallée de la haute Bénoué ; monchiquite ; pétrogenèse

Keywords : Cameroon Line; Upper Benue valley; monchiquite; petrogenesis

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : deruelle@ccr.jussieu.fr (B. Déruelle), ddemaif@ulb.ac.be (D. Demaiffe), montigny@eopg.u-strasbg.fr (R. Montigny).

Abridged English version

The dykes of monchiquites studied here were found in the Upper Benue valley (northern Cameroon) (Fig. 1). They are of Cainozoic age (37.5 ± 2.3 Ma), between 0.5 and 1 m thick, with high dip ($>70^\circ$) and orientations between $N70^\circ E$ and $N135^\circ E$; the latter are similar to those of the great Panafrican fractures of northern Cameroon [13].

From a *petrographic point of view*, these monchiquites are alkali lamprophyres (Fig. 2). They have a porphyroblastic texture, with olivine and clinopyroxene phenocrysts (30% by volume), amphibole and/or biotite microcrysts (0.5×0.3 mm) in an analcitic groundmass, with possible feldspars. Ferro-titaniferous oxides and apatite (up to 5% per volume) are also observed as well as millimetric (<5 mm; 2–8% per volume) ocelli filled either by carbonates and feldspars or by carbonates and analcime.

From a *mineralogical point of view*, olivine is completely pseudomorphosed by carbonates and chlorite; clinopyroxene is an Al- and Ti-rich diopside [14], amphibole is a subsilicic kaersutite [10], biotite is rich in Ti (up to 10% TiO_2) – which indicates a crystallization temperature of around $1000^\circ C$ (7) – and in Ba (up to 4% BaO); the feldspars are in the form of microlites are sodic sanidine, oligoclase and albite; apatite is rich in fluorine (3.5%) and LREE (0.14 La_2O_3 and 0.31% Ce_2O_3).

From a *geochemical point of view*, the monchiquites studied are undersaturated in silica (38.4–41% SiO_2) (Table 2). There are good correlations between MgO and the other major elements (except Na_2O and P_2O_5); correlations are also clear for trace elements, except Ba (Fig. 4). The normalized trace element spectra (Fig. 5) show negative anomalies for Rb and K and positive anomalies for Ba, Th, Nb, La, Ce, Zr, and Ti. The Sr-isotope ratio obtained from monchiquite 6 (0.70369 ± 10) is low.

These different characteristics of the monchiquites of Tchircotché support the hypothesis that the continental crust does not seem to have played a significant role in their genesis; the monchiquites are supposed to have their origin in a magma generated by a metasomatized lherzolitic sublithospheric mantle, as suggested for the alkali basalts of the Cameroon line.

1. Introduction

À proximité de Tchircotché (Fig. 1), dans la vallée de la haute Bénoué (Nord du Cameroun), de petits affleurements de filons d'une roche noire, compacte, porphyrique, brièvement décrite en 1959 [9] comme « une monchiquite sans feldspaths, à phénocristaux d'augite, de barkévicite et d'olivine dans une pâte indéterminable » ont été observés, épars dans un rayon de 300 m.

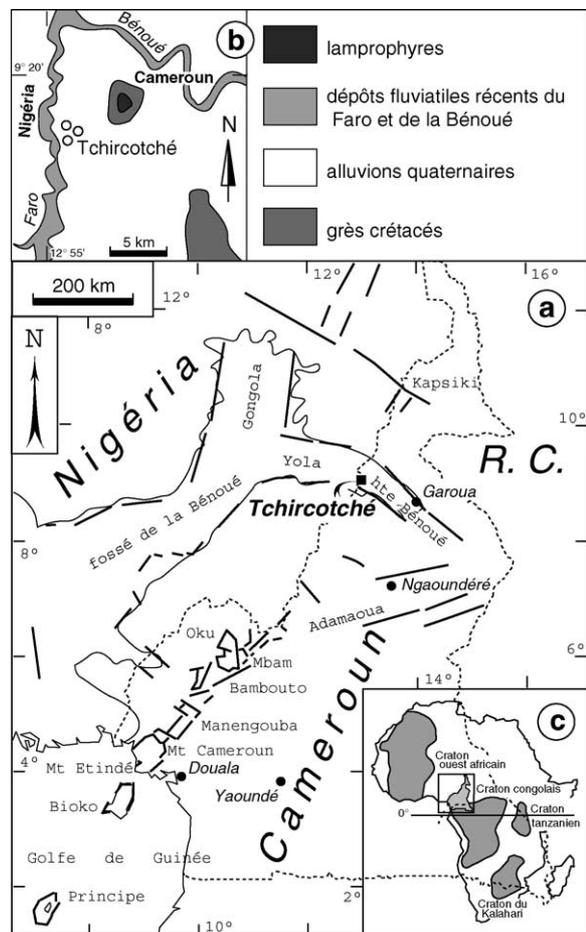


Fig. 1. (a) Localisation des filons de monchiquite de Tchircotché dans la vallée de la haute Bénoué, dans le nord de la Ligne du Cameroun (d'après [4]). (b) Carte géologique de la région de Tchircotché (d'après [15]). (c) Localisation de la Fig. 1a en Afrique.

Fig. 1. (a) Location of the monchiquite dikes from the Tchircotché area, Upper Benue Valley, northern Cameroon, according to [4]. (b) Geological map of the Tchircotché area, according to [15]. (c) Location of Fig. 1a in Africa.

2. Cadre géologique

Les monchiquites se situent à l'intersection du fossé de Garoua, prolongement au Cameroun de la branche de Yola du fossé de la Bénoué et de la Ligne du Cameroun (N30°E). Le fossé de Garoua, limité par des failles normales N120–N130°E (Fig. 1) est rempli de grès crétacés. Des necks et dômes de mugéarites, phonolites, trachytes et rhyolites et des necks et coulées de laves basaltiques oligocènes sont épars dans le fossé [15,16].

Les filons de monchiquites, d'épaisseur comprise entre 0,5 et 1 m, ont des pendages forts (>70°). Leurs orientations sont comprises entre N70°E et N135°E, directions qui coïncident avec celles des grandes fractures panafricaines du Nord du Cameroun [13]. Les grès sont parfois légèrement métamorphisés au contact avec les monchiquites. Une monchiquite de Tchircotché a un âge K–Ar de $37,5 \pm 2,3$ Ma, comparable à ceux d'autres laves alcalines de la vallée de la haute Bénoué, compris entre $39,7 \pm 0,9$ et $34,8 \pm 0,8$ Ma [16].

3. Pétrographie

Les lamprophyres de Tchircotché (Fig. 2) sont de type alcalin [23,26]. Ils ne contiennent pas de phénocristaux de feldspath. Ce sont donc des monchiquites à texture porphyrique à phénocristaux d'olivine, de clinopyroxène (30% en volume), et à microphénocristaux ($0,5 \times 0,3$ mm) d'amphibole et/ou de biotite, dans une matrice analcitique qui peut contenir du feldspath. Les oxydes ferrotitanés et l'apatite (jusqu'à 5% en volume) sont présents. Ces monchiquites contiennent aussi des ocelles millimétriques (<5 mm ; 2–8% en volume), remplis, soit par des carbonates et du feldspath, avec quelquefois des microphénocristaux de clinopyroxène et d'amphibole, soit par des carbonates et de l'analcime. Ces ocelles sont semblables à ceux des lamprophyres alcalins d'Otago, Nouvelle-Zélande [3] et du complexe alcalin de Coldwell, Ontario, Canada [12].

4. Minéralogie

Les principales phases minérales des monchiquites de Tchircotché ont été analysées au microanalyseur

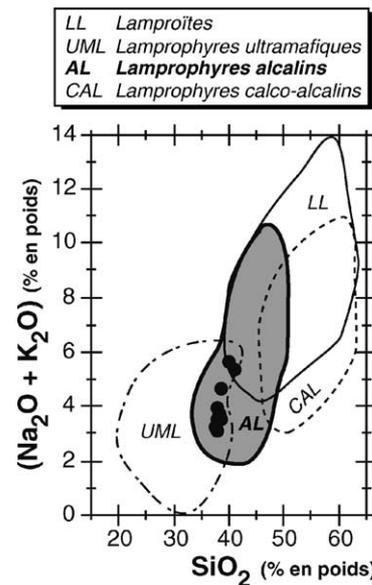


Fig. 2. Diagramme alcalins–silice pour les monchiquites de Tchircotché. Les monchiquites sont des lamprophyres alcalins [23].

Fig. 2. Diagram of alkalis versus silica for the monchiquites from the Tchircotché area. Monchiquites are alkaline lamprophyres [23].

électronique Camebax à l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris (Tableau 1).

L'olivine est complètement pseudomorphosée par des carbonates et de la chlorite. Le clinopyroxène est un diopside (selon [14], riche en Al ($4,1 < Al_2O_3\% < 10,1$) et Ti ($1,8 < TiO_2\% < 4,3$), avec les teneurs les plus élevées en bordure des phénocristaux. Les valeurs des rapports Al^{VI}/Al^{IV} varient davantage dans les cœurs ($0,18–0,72$) qu'en bordure ($0,13–0,46$). Des xénocristaux de diopside ($Wo_{49}En_{48}Fs_3$), craquelés et arrondis, ont des cœurs riches en magnésium ($Mg^\# : 90–94$) et en chrome (jusqu'à 0,3% de Cr_2O_3) et pauvres en Ti et en Al (Fig. 3). L'amphibole est une kaersutite subsilicique (Si : $5,5–5,8$; $Mg^\# : 52–67$) selon [10]. Les températures et pression d'équilibre estimées d'après [20] sont respectivement comprises entre 950 et 1050 °C (± 40 °C) et de l'ordre de 4 kbar (avec $P_{H_2O} < P_{totale}$, d'après [19]). La biotite ($58 < Mg^\# < 68$) est riche en Ti (jusqu'à 10,0% de TiO_2), indiquant une cristallisation sous une température d'environ 1000 °C, d'après [7], et en Ba (jusqu'à 4,0% de BaO). La titanomagnétite ($50 < Usp\% < 55$) et l'ilménite ($TiO_2 \approx 50\%$) ont des compositions semblables à celles des monchiquites du complexe al-

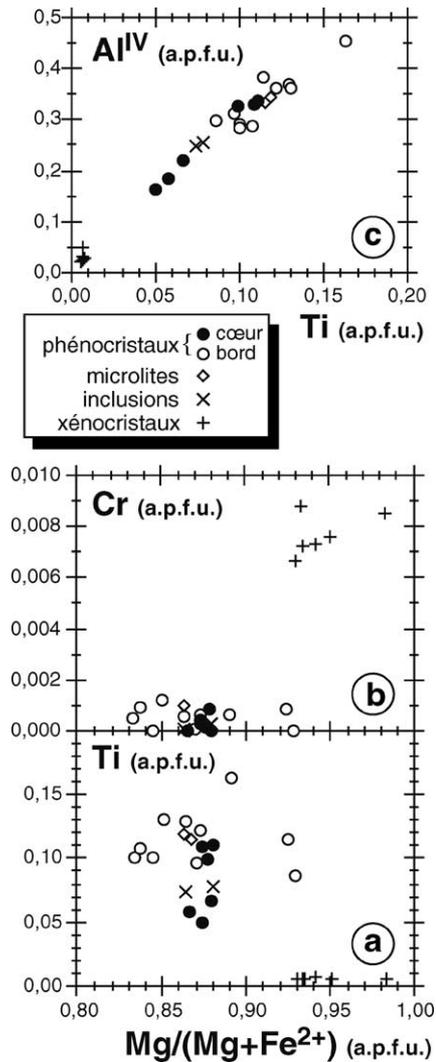


Fig. 3. Compositions des cristaux de clinopyroxène des monchiquites 2, 3 et 4 dans les diagrammes : (a) $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ vs Ti, (b) $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ vs Cr et (c) Ti vs Al^{IV} .

Fig. 3. Chemical compositions of clinopyroxene crystals of monchiquites 2, 3 et 4 in diagrams: (a) $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ vs Ti, (b) $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ vs Cr, and (c) Ti vs Al^{IV} .

calin sous-saturé de Kokoumi [18] et des basaltes alcalins de la Ligne du Cameroun [4]. L'équilibre ilménite-titanomagnétite donne des températures de 810 à 850 °C (± 20 °C) et des f_{O_2} de 10^{-14} à 10^{-15} ($\pm 0,5 \times 10^{-15}$) atm, d'après [24]. La sanidine sodique ($Or_{66}-Or_{52}$), l'oligoclase ($An_{29}-An_{16}$) et l'albite ($Ab_{100}-Ab_{95}$) sont présentes en microlites. La co-

existence d'oligoclase et/ou d'albite avec la sanidine suggère une température de cristallisation en deçà du solvus. L'apatite est riche en fluor (3,5%) et en terres rares légères (0,14% de La_2O_3 et 0,31% de Ce_2O_3).

5. Géochimie

Les monchiquites sont des roches sous-saturées en silice (38,4–41,0% SiO_2), différenciées ($Mg^{\#} = 51-58$), à olivine, néphéline et/ou leucite (>5%) normatives (Tableau 2). Il existe de bonnes corrélations linéaires entre MgO et les autres éléments majeurs (sauf Na_2O et P_2O_5) pour l'ensemble des monchiquites de Tchircotché et les corrélations sont également nettes pour les éléments en traces, sauf pour Ba (Fig. 4). Les spectres d'éléments en traces normalisés (Fig. 5) ont des anomalies négatives en Rb et K et positives en Ba, Th, Nb, La, Ce, Zr et Ti. Les valeurs des rapports $(La/Yb)_N$ sont élevées (21,4–30,7). La composition isotopique initiale du strontium de la monchiquite 6, recalculée à 37 Ma, est de $0,70369 \pm 10$, valeur identique à celles des basaltes de la Ligne du Cameroun [6,11,17] et des monchiquites de Kokoumi [18]. Ces données isotopiques indiquent une source mantellique commune pour les magmas basaltiques et monchiquitiques de la Ligne du Cameroun.

6. Discussion

L'évolution géochimique de la série des monchiquites s'explique par la cristallisation fractionnée précoce (Fig. 4) d'olivine (diminution des teneurs en MgO et Ni), de clinopyroxène (diminution de CaO, Sc, Cr), et plus tardive de magnétite, d'ilménite (diminution des teneurs en TiO_2 , Fe_2O_3 et V) et d'apatite (P_2O_5), voire d'amphibole (CaO) et de feldspathoïdes (Al_2O_3), à partir d'un magma parent à caractère évolué (Ni < 80 ppm, Cr < 23 ppm, MgO < 9%).

La croûte continentale ne semble pas avoir joué de rôle significatif dans la genèse des monchiquites de Tchircotché, ainsi que l'attestent l'absence d'anomalie négative en Nb (Fig. 5) et le rapport isotopique initial du strontium faible. Les teneurs élevées en éléments incompatibles (Tableau 2) et la présence de phases minérales (amphibole, mica, carbonates)

Tableau 1 (Suite)

Table 1 (Continued)

| Échantillon | clinopyroxène | | | amphibole | biotite | feldspath | | oxydes Fe–Ti | | apatite |
|-------------|---------------|-------|------|-----------|---------|-----------|------|--------------|-------|---------|
| | ph, c | ph, b | x, c | ph, c | ph, c | m | m | ph, c | ph, c | ph, c |
| An | | | | | | 29,0 | 0,2 | | | |
| Ab | | | | | | 64,3 | 47,3 | | | |
| Or | | | | | | 6,7 | 52,5 | | | |
| Usp | | | | | | | | 50,5 | | |
| Ilm | | | | | | | | | 93,0 | |

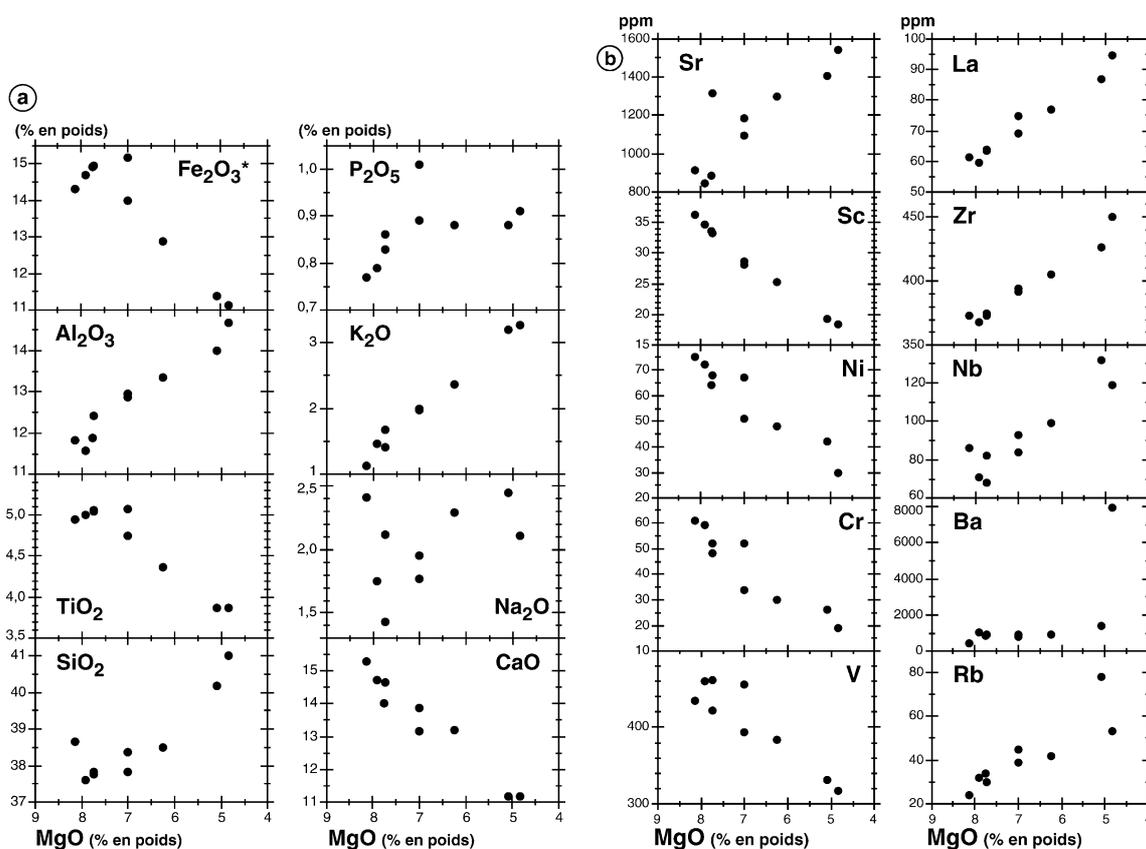


Fig. 4. Diagrammes MgO – éléments majeurs (en % massique) et en traces (en ppm) pour les monchiquites de Tchircotché.

Fig. 4. Diagrams MgO – major elements (weight percent) and in traces (ppm) for the monchiquites from the Tchircotché area.

riches en volatils suggèrent que les magmas dont dériveraient les monchiquites proviendraient d'un manteau sous-lithosphérique lherzolitique métasomatisé, comme cela a été proposé par ailleurs pour les basaltes alcalins de la Ligne du Cameroun [4]. Cependant, les valeurs élevées des rapports La_N/Yb_N (21,4–30,7) indiquent des taux de fusion partielle plus faibles que

pour ceux des basaltes alcalins du domaine continental de la Ligne du Cameroun ($12 < La_N/Yb_N < 22$, données non publiées). Au cours de leur ascension à travers la lithosphère, les magmas parents des monchiquites auraient incorporé des xénocristaux de Cr-diopside d'origine mantellique, riches en Mg, Cr et pauvres en Ti et Al^{IV} (Fig. 3). La différenciation aurait

Tableau 2

Analyses chimiques représentatives des monchiquites de Tchircotché (ICP et ICP-MS, CRPG-CNRS, Nancy ; précision analytique : [2] ; compositions isotopiques du strontium : spectrométrie de masse (VG Sector 54 TIMS), université libre de Bruxelles [1])

Table 2

Chemical analyses of monchiquites from the Tchircotché area

| Échantillon (% massique) | 6 | 4 | 3 | 5 | 2 |
|--|---------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 38,67 | 37,84 | 38,51 | 40,17 | 41,00 |
| TiO ₂ | 4,94 | 5,04 | 4,37 | 3,87 | 3,87 |
| Al ₂ O ₃ | 11,83 | 12,42 | 13,36 | 14,00 | 14,67 |
| Fe ₂ O ₃ | 14,31 | 14,94 | 12,88 | 11,38 | 11,14 |
| MnO | 0,17 | 0,19 | 0,17 | 0,19 | 0,20 |
| MgO | 8,14 | 7,74 | 6,25 | 5,09 | 4,84 |
| CaO | 15,26 | 14,63 | 13,21 | 11,19 | 11,19 |
| Na ₂ O | 2,41 | 2,12 | 2,29 | 2,45 | 2,11 |
| K ₂ O | 1,12 | 1,41 | 2,37 | 3,20 | 3,27 |
| P ₂ O ₅ | 0,77 | 0,86 | 0,88 | 0,88 | 0,91 |
| CO ₂ | 0,21 | 0,31 | 2,52 | 2,60 | 2,61 |
| P.F. | 2,04 | 2,41 | 5,23 | 5,80 | 6,42 |
| Total | 99,66 | 99,60 | 99,52 | 98,22 | 99,62 |
| Norme CIPW (%) | | | | | |
| Ne | 3,60 | 6,53 | 10,49 | | 9,18 |
| Lc | 8,94 | 9,72 | 10,97 | 5,54 | |
| OI | 10,90 | 8,87 | 7,24 | 10,63 | 7,04 |
| (ppm) | | | | | |
| Be | 2,4 | 2,7 | 2,5 | 2,5 | 2,7 |
| Rb | 24 | 30 | 42 | 78 | 53 |
| Sr | 912 | 1314 | 1297 | 1407 | 1542 |
| Ba | 443 | 894 | 907 | 1410 | 7914 |
| V | 434 | 461 | 384 | 331 | 317 |
| Cu | 85 | 89 | 79 | 6 | 57 |
| Cr | 61 | 52 | 30 | 26 | 19 |
| Co | 47 | 47 | 34 | 33 | 25 |
| Ni | 75 | 68 | 48 | 42 | 30 |
| Sc | 36,2 | 33,2 | 25,3 | 19,3 | 18,4 |
| Zn | 103 | 110 | 104 | 105 | 114 |
| Y | 31 | 32 | 32 | 33 | 33 |
| Zr | 373 | 373 | 405 | 426 | 450 |
| Nb | 86 | 82 | 99 | 132 | 119 |
| La | 61,5 | 63,7 | 76,8 | 86,9 | 94,4 |
| Ce | 139 | 145 | 164 | 179 | 187 |
| Nd | 75,4 | 71,5 | 73,9 | 82,6 | 85,2 |
| Sm | 14,7 | 14,0 | 13,4 | 14,7 | 15,8 |
| Eu | 4,31 | 3,99 | 3,75 | 4,42 | 4,53 |
| Gd | 10,8 | 11,9 | 10,7 | 10,7 | 11,6 |
| Dy | 7,1 | 6,8 | 6,5 | 6,8 | 7,5 |
| Er | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,7 | 3,5 |
| Yb | 1,87 | 1,77 | 1,69 | 2,04 | 2,23 |
| Lu | 0,27 | 0,33 | 0,29 | 0,30 | 0,40 |
| Th | 14 | 15 | 17 | 22 | 15 |
| (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _{37 Ma} | 0,70366 | | | | |

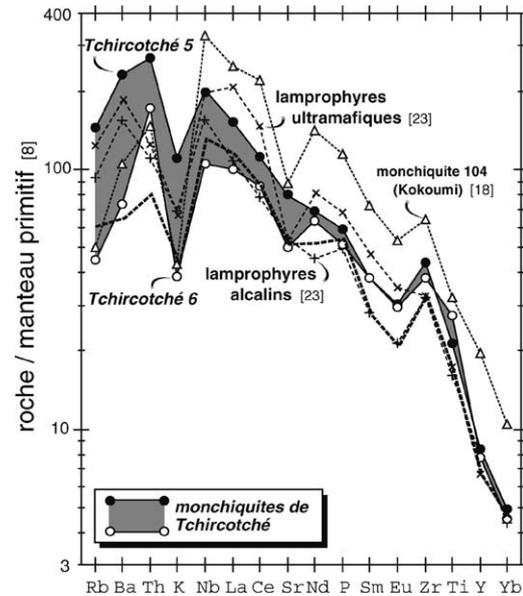


Fig. 5. Diagramme normalisé au manteau primitif [8] pour les monchiquites de Tchircotché.

Fig. 5. Primitive-mantle-normalized diagram for the monchiquites of the Tchircotché area.

eu lieu dans des réservoirs situés vers 35–40 km, en dessous de la limite croûte–manteau (20–23 km [22]).

Remerciements

Le présent travail, partie d'une thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie (I.N.), a bénéficié du financement du ministère français de la Coopération et du Développement. Les auteurs remercient C. Moreau et D. Ohnenstetter pour leurs commentaires constructifs.

Références

- [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. Mévelle, J. Morel, D. Yeghicheyan, Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure on-line liquid chromatography couples 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] J. Cooper, Petrology of ocellar lamprophyres from Western Otago, New Zealand, *J. Petrol.* 20 (1979) 139–163.

- [4] B. Déruelle, C. Moreau, C. Nkoumbou, R. Kambou, J. Lissom, E. Njongfang, R.T. Ghogomu, A. Nono, The Cameroon Line: a review, in: A.B. Kampunzu, R.T. Lubala (Eds.), *Migmatism in Extensional Structural Settings, The Phanerozoic African Plate*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1991, pp. 274–327.
- [5] G.T.R. Droop, A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria, *Mineral. Mag.* 51 (1987) 431–435.
- [6] 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.
- [7] K. Hansen, Lamprophyres and carbonatitic lamprophyres related to rifting in the Labrador Sea, *Lithos* 13 (1980) 145–153.
- [8] A. Hofmann, Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust, *Earth Planet. Sci. Lett.* 90 (1988) 297–314.
- [9] P. Koch, Carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1:500 000, République du Cameroun, Garoua-Ouest, Dir. Mines Géol. Cameroun, Paris, 1959.
- [10] B.E. Leake, 20 co-auteurs, 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.
- [11] A. Marzoli, E.M. Piccirillo, P.R. Renne, G. Bellieni, M. Lacumin, 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.
- [12] R.H. Mitchell, R.G. Platt, D.G. Laderoute, Petrology of alkaline lamprophyres from the Coldwell alkaline complex, north-western Ontario, *Can. J. Earth Sci.* 28 (1991) 653–663.
- [13] C. Moreau, J.-M. Regnault, B. Déruelle, B. Robineau, A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa, *Tectonophysics* 139 (1987) 317–334.
- [14] N. Morimoto, 8 co-auteurs, Nomenclature of pyroxenes. Subcommittee on pyroxenes, IMA, *Mineral. Mag.* 52 (1988) 535–550.
- [15] I. Ngounouno, Pétrologie du magmatisme cénozoïque de la vallée de la Bénoué et du plateau Kapsiki (Nord du Cameroun), thèse, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, 1993, 280 p.
- [16] 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.
- [17] I. Ngounouno, B. Déruelle, D. Demaiffe, Petrology of the bimodal Cenozoic volcanism of the Kapsiki Plateau (northernmost Cameroon, Central Africa), *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 102 (2000) 21–44.
- [18] I. Ngounouno, C. Moreau, B. Déruelle, D. Demaiffe, R. Montigny, Pétrologie du complexe alcalin sous-saturé de Kokoumi (Cameroun), *Bull. Soc. géol. France* 172 (2001) 675–686.
- [19] T. Oba, K. Yagi, Y. Hariya, Stability relation of kaersutite reinvestigated on natural and synthetic samples, in: IMA Congr., Karma, 1982, 282 p.
- [20] M.T. Otten, The origin of brown hornblende in the Artfjället gabbro and dolerites, *Contrib. Mineral. Petrol.* 86 (1984) 189–199.
- [21] J.-L. Pouchou, F. Pichoir, Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model PAP, in: K.F.J. Heinrich, D.E. Newbury (Eds.), *Electron Probe Quantification*, Plenum Press, New York, 1991, pp. 31–75.
- [22] Y.H. Poudjom Djomani, M. Diament, M. Wilson, Lithospheric structure across the Adamawa plateau (Cameroon) from gravity studies, *Tectonophysics* 273 (1997) 317–327.
- [23] N.M.S. Rock, *Lamprophyres*, Blackie and Sons Ltd, Glasgow, 1991, 285 p.
- [24] K.J. Spencer, D.H. Lindsley, A solution model for coexisting iron-titanium oxides, *Am. Mineral.* 66 (1981) 1189–1201.
- [25] C. Stormer Jr., The effects of recalculation on estimates of temperature and oxygen fugacity from analyses of multicomponent iron-titanium oxides, *Am. Mineral.* 68 (1983) 586–594.
- [26] A.R. Woolley, S.C. Bergman, A.D. Edgar, M.J. Le Bas, R.H. Mitchell, N.M.S. Rock, B.H. Scott Smith, Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks, *Can. Mineral.* 34 (1996) 175–186.