



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1463–1471



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

Géochimie (Géochronologie)

Âges K–Ar des roches magmatiques du fossé de Garoua (Cameroun) : leur place dans le cadre de la « Ligne du Cameroun »

Raymond Montigny^a, Ismaïla Ngounouno^b, Bernard Déruelle^{c,*}

^a École et observatoire de physique du globe, UMR-CNRS 7516, université Louis-Pasteur, 5, rue Descartes, 67000 Strasbourg, France

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

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

Reçu le 7 octobre 2003 ; accepté après révision 20 août 2004

Disponible sur Internet le 6 novembre 2004

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Le pluton anorogénique de Kokoumi et des laves du fossé de la Bénoué, à l'ouest de Garoua (Cameroun septentrional), qui appartiennent à la partie nord de la « Ligne du Cameroun », ont été datés par K–Ar sur roche totale et minéraux. Pour les deux formations, des âges très voisins, respectivement de 39 et 37 Ma, ont été obtenus. Ils correspondent très vraisemblablement au moment de leur mise en place. Ces valeurs sont en accord avec l'interprétation qui considère la « Ligne du Cameroun » comme une énorme fissure lithosphérique captant une zone chaude asthénosphérique profonde. *Pour citer cet article : R. Montigny et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

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

Abstract

K–Ar ages of magmatic rocks from the Garoua rift: their place in the frame of the ‘Cameroun Line’. K–Ar analyses on whole rock and minerals are reported for the Kokoumi anorogenic pluton and alkaline volcanics of the Benue valley, west of Garoua (northern Cameroon), which belong to the northern part of the ‘Cameroun Line’. The two formations yield similar ages of 39 and 37 Ma, respectively. These values likely correspond to the time of emplacement. They are in agreement with the interpretation considering the ‘Cameroun Line’ as a huge lithospheric crack tapping a hot deep asthenospheric zone. *To cite this article: R. Montigny et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

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

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : Raymond.Montigny@eost.u-strasbg.fr (R. Montigny), deruelle@ccr.jussieu.fr (B. Déruelle).

Mots-clés : « Ligne du Cameroun » ; pluton de Kokoumi ; roches volcaniques ; Garoua ; âges K–Ar

Keywords : ‘Cameroon Line’ ; Kokoumi pluton ; volcanics ; Garoua ; K–Ar ages

Abridged English version

1. Introduction

The ‘Cameroon Line’ (Fig. 1) is an alignment of oceanic and continental volcanic massifs and anorogenic plutons trending N30°E from Pagalú Island to Lake Chad. A comprehensive review of the petrographical and geochemical data on the ‘Cameroon Line’ can be found in [10]. Our conventional K–Ar study is restricted to the upper Benue valley, west of Garoua (northern Cameroon). The aim was first to complement the age data base on the Cameroon Line, and second, using all reliable dates, to examine whether the age distribution along the Line complies with a hot-spot origin.

2. Geological setting

The volcanics of the upper Benue valley of Garoua and the Kokoumi pluton (Figs. 1 and 2) belong to the east–west Garoua rift structure, which represents the easterly extension of the Benue trough. A north–south seismic refraction profile [49] of the Garoua rift reveals a thin crust, whose thickness varies between 18 and 23 km.

Necks, domes, and flows of volcanic rocks intersect sandstone of Albian–Aptian age. They consist of basalts, mugearites, trachytes, phonolites, and rhyolite of alkaline composition [38,41]. The Kokoumi complex is also intrusive into sandstones of Albian–Aptian age. It consists of an assemblage of small plutons and dykes. The former are gabbros, monzosyenites, and nepheline syenites, whereas the latter are represented by camptonite, monchiquite, and trachyte. Major and trace elements [38] suggest that these rocks are cogenetic.

3. Results

3.1. Volcanics of the Garoua rift

The striking feature of the analytical results (Table 1) is an age convergence around 37 Ma. Irrespec-

tive of rock type, five samples give this date and the slightly different figures yielded by basalts 4P and G22, 39.7 ± 0.9 , and 34.8 ± 0.8 Ma, respectively, cannot be considered to be significantly different. The assumed instantaneous cooling of the rocks, the freshness of the samples and the aforementioned age convergence lead us to regard the 37-Ma age as mirroring the emplacement of the volcanics. Moreover, the moderate dispersion of ages suggests a rather discrete event.

3.2. The Kokoumi complex

Amphibole and whole rock (Table 1) of gabbro 109 yield 39.0 ± 0.9 Ma and 36.6 ± 0.9 Ma, respectively. As amphibole is a reliable K–Ar clock due to its high closure temperature, 530 ± 40 °C [25] and the complex of a moderate size, 1.5 km in diameter, we may safely assume that the 39.0 ± 0.9 Ma age closely approaches the time of emplacement. One should note, in support of this hypothesis, that a similar K–Ar age has been obtained on volcanic rocks from the upper Benue valley, in Nigeria [20]. The lower date yielded by nepheline syenite 99, 33.1 ± 0.5 Ma, probably reflects that of plagioclase (nepheline is in accessory amount), which has a low closure temperature, in the order of 150 °C. Therefore, this date is to be regarded as a cooling age.

In summing up, the magmatic activity in this region started at around 39 Ma and likely lasted no more than 5 Ma.

4. Discussion and model

Inspection of geophysical and age data (Fig. 4) lead us to prefer the hypothesis of a fissure tapping an hot asthenospheric zone to that of a hot spot for the origin of the ‘Cameroon Line’. Three main reasons can be put forward to support this contention:

- the existence of subvertical discontinuities that traverse both the crust and upper mantle down to depths of 190 km [12]; they correspond in surface to major shear zones [36];

- the absence of a simple age distribution, which is expected in the case of a panache [18,27];
- the existence, beneath the ‘Cameroon Line’, of a deep hot zone (400 km), overlain by a cold superficial zone [1]; this temperature-distribution pattern does not correspond with what is observed in Hawaii, paradigm of plume, where the hot zone is broad and deep.

1. Introduction

La «Ligne du Cameroun» (Fig. 1) est un alignement de massifs volcaniques océaniques et continentaux et de plutons anorogéniques. Elle s’étend depuis l’île de Pagalú jusqu’au lac Tchad, et sa direction est N30°E. La partie océanique est constituée de quatre îles volcaniques, situées dans le golfe de Guinée : Pagalú, São Tomé, Príncipe et Bioko. Le segment continental est représenté par :

- les édifices volcaniques : mont Cameroun, monts Rumpi, Manengouba, Bambouto, Mbam, Oku, les groupes de petits volcans des grabens de Kumba, Tombel, du plateau Bamoun, du fossé de la Bénoué, à l’ouest de Garoua, et du plateau Kapsiki ;
- environ 60 plutons anorogéniques du mont Koupé à Waza.

Une synthèse des données pétrographiques et géochimiques concernant de la «Ligne du Cameroun» a été présentée dans la référence [10].

Notre étude porte sur le fossé de la Bénoué, à l’ouest de Garoua. La pétrologie et la géochimie des échantillons datés ont été présentées [38,40,41]. Notre but était de compléter la base de données géochronologiques sur la «Ligne du Cameroun» et d’examiner si l’ensemble des âges chronométriques était compatible ou non avec les hypothèses d’un point chaud ou d’une ligne chaude, avancées pour l’expliquer.

2. Cadre et aperçu géologiques

Les roches volcaniques de la haute vallée de la Bénoué et le pluton de Kokoumi (Figs. 1 et 2) font partie du fossé de la Bénoué, de direction est–ouest, qui présente, au Cameroun, l’extrémité orientale du fossé

de Yola et, au Nigeria, la branche orientale du fossé de la Bénoué (Fig. 1). Le fossé consiste en une mosaïque de demi-grabens et de horsts couverts de deux unités sédimentaires (calcaires et grès syn-rift du Jurassique–Néocomien, et grès de Garoua post-rift de l’Albien–Aptien), fortement faillées. L’épaisseur de la croûte est de 18 km dans le fossé et de 23 km sur le plateau de l’Adamaoua [45,49]. Au sud du fossé de Garoua, le horst de l’Adamaoua est limité par des discontinuités verticales de direction N70°E, qui correspondent à la zone de cisaillement d’Afrique centrale. Elles traversent la croûte et le manteau jusqu’à une profondeur d’environ 190 km [12].

Trente et un necks, dômes (laves felsiques) et coulées (laves basaltiques) affleurent dans le graben de Garoua (Fig. 2). Les laves basaltiques contiennent des phénocristaux d’olivine (Fo 85–68), de diopside et de titanomagnétite, et des xénocristaux de quartz et d’olivine (Fo 92–87), avec des inclusions de spinelle. Les mugéarites ont une texture trachytique et contiennent des xénocristaux de sanidine, de quartz et de biotite. Les phonolites sont peralcalines, avec des phénocristaux d’hedenbergite sodique, d’hastingsite plus ou moins magnésienne, d’augite aegyrienne, d’aenigmatite riche en Ti, de néphéline et d’albite. Elles contiennent aussi des microphénocristaux de sodalite, de sphène ou d’apatite, et des xénocristaux de diopside, riches en Ca. Il existe deux types de trachyte. Les trachytes peralcalins ont des phénocristaux d’augite aegyrienne, de richtérite, d’arfvedsonite, d’aenigmatite, d’albite et de sanidine–orthoclase. Les trachytes non peralcalins sont répartis en deux groupes : (1) les trachytes à biotite, avec des phénocristaux de biotite riche en Ba et Ti et de titanomagnétite ; (2) les trachytes à biotite et richtérite. Les rhyolites sont peralcalines, à microlites d’augite aegyrienne titanifère et d’arfvedsonite riche en F et Mn. Des filons de théralite, lamprophyres, hawaïte et mugéarite sont disséminés sur l’ensemble du domaine volcanique. Les teneurs en éléments majeurs et en traces sont caractéristiques de roches alcalines, avec un enrichissement significatif en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes [38,41]. L’ensemble de ces roches magmatiques recoupe et métamorphose les grès de Garoua.

Le complexe de Kokoumi (Fig. 3) est constitué d’un ensemble de petits plutons de gabbros, de monzosyérites et syénites néphéliniques et de filons de

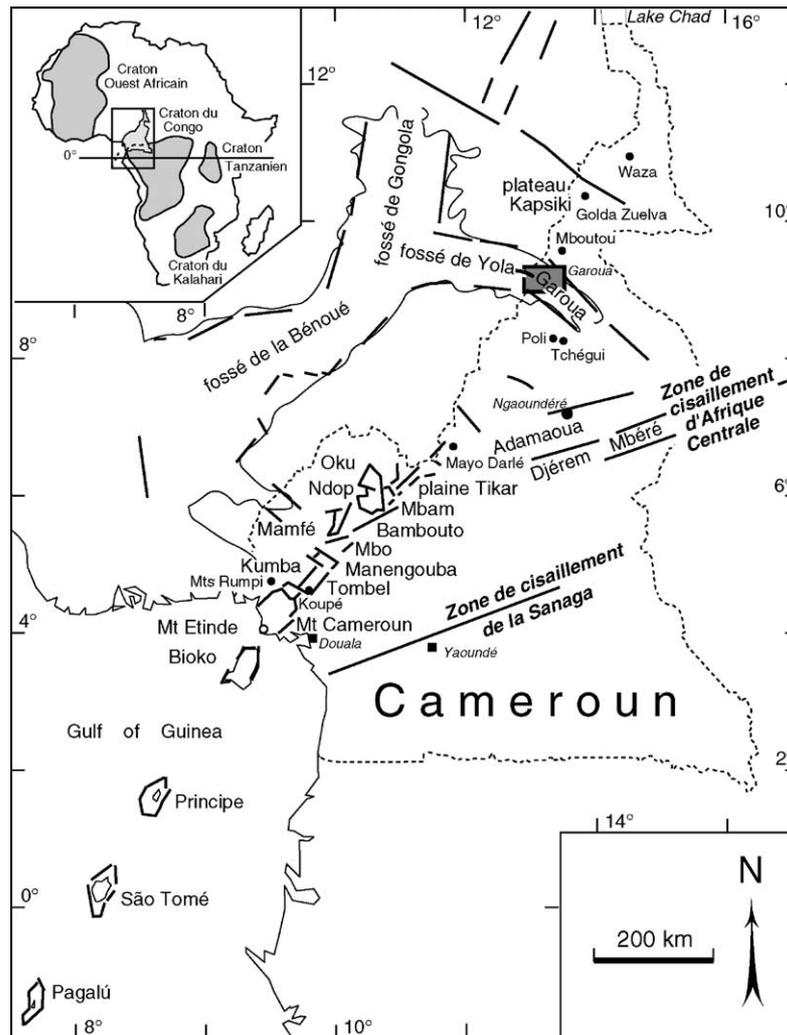


Fig. 1. Localisation du fossé de la haute Bénoué de Garoua en relation avec ceux de Yola, Gongola et de la Bénoué. La « Ligne du Cameroun », succession de horsts (en romain) et de fossés (en italique), le horst de l'Adamaoua, le fossé de Djérem–Mbéré et les grands ensembles volcaniques et plutoniques sont aussi indiqués (d'après [10]), ainsi que la zone de cisaillement d'Afrique centrale (d'après [22]). Les cratons sont d'après [27]. Rectangle gris : zone étudiée.

Fig. 1. Location of the upper Benue trough of Garoua in relation with the Yola–Gongola–Benue troughs. The 'Cameroon Line', a succession of horsts (Roman type) and grabens and rifts (italic type), the Adamawa horst, the Djérem Mbéré graben, and main volcanic and plutonic complexes are also indicated, after [10]. Central Africa Shear Zone, after [22] and African cratons after [27]. Shaded rectangle: studied area.

lamprophyres et trachytes [40]. Il recoupe les grès de Garoua.

3. Techniques analytiques

La taille des grains des laves, beaucoup trop fine, exclut pour les laves l'analyse K–Ar sur minéraux sé-

parés. L'examen microscopique indique que les phases riches en potassium ne sont pas altérées. Les analyses K–Ar ont donc été réalisées sur roche totale, à l'exception des échantillons TCH6 (sur pyroxène, avec un peu d'amphibole) et K109 (sur amphibole). Les méthodes analytiques ont été décrites en détail par ailleurs [3,35]. Les grandes lignes en sont les suivantes. Le potassium a été mesuré par spectrophoto-

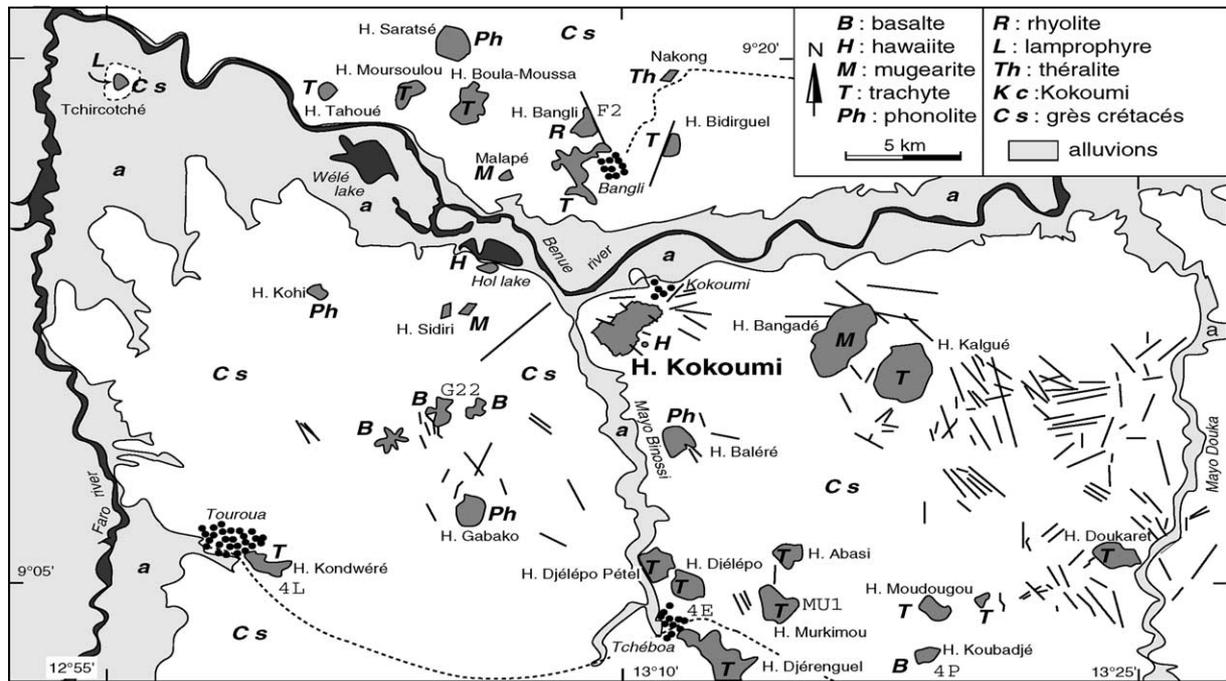


Fig. 2. Carte géologique simplifiée de la vallée de la Bénoué, à l'ouest de Garoua (d'après [38]) et localisation des échantillons datés.

Fig. 2. Geological sketch map of the upper Benue valley of Garoua (after [38]) and location of the dated samples.

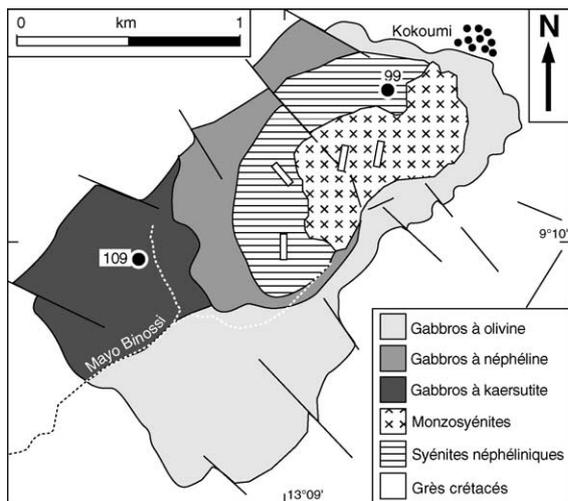


Fig. 3. Carte géologique simplifiée du complexe plutonique de Kokoumi (d'après [38]) et localisation des échantillons datés. Rectangles blancs : dykes.

Fig. 3. Geological simplified map of the Kokoumi plutonic complex (after [38]) and location of the dated samples. White rectangles: dykes.

métrie de flamme, avec un standard interne de lithium. L'argon a été déterminé par dilution isotopique, en utilisant l'argon 38 comme traceur avec un spectromètre de masse MS 20. Tous les échantillons ont été mesurés en statique. Les constantes de désintégration du ^{40}K préconisées par [48] ont été utilisées pour le calcul des âges. Les incertitudes représentent des estimations de la précision analytique à un écart type. Elles sont obtenues selon la procédure indiquée par [9].

4. Résultats

Les résultats sont reportés dans le [Tableau 1](#).

4.1. Les roches volcaniques du fossé de Garoua

Les âges convergent vers 37 Ma. Quel que soit le type de roche, cinq échantillons donnent en effet cette valeur et celles qui s'en écartent, basaltes 4P et G22, respectivement $39,7 \pm 0,9$ et $34,8 \pm 0,8$ Ma, ne peuvent être considérées comme significativement différentes. Le refroidissement rapide de ces roches,

Tableau 1

Résultats analytiques des datations K–Ar pour les laves du fossé de Garoua et le pluton de Kokoumi ($\lambda_\varepsilon = 0,581 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_\beta = 4,962 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $^{40}\text{K}/\text{K} = 1,167 \times 10^{-4} \text{ mol mol}^{-1}$)

Table 1

Whole rock and mineral K–Ar analytical results for the Garoua rift lavas and Kokoumi anorogenic pluton ($\lambda_\varepsilon = 0.581 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $^{40}\text{K}/\text{K} = 1.167 \times 10^{-4} \text{ mol mol}^{-1}$)

Échantillon type pétrographique	Système	K ₂ O (%) en poids)	100 × rad. ⁴⁰ Ar/total ⁴⁰ Ar (10 ⁻¹¹ mol g ⁻¹)	Rad. ⁴⁰ Ar	Âge (±σ) (Ma)
Vallée de la Bénoué à l'ouest de Garoua (roches volcaniques)					
TCH 6 lamprophyre	pyroxène ± amphibole	0,14	41	0,74	37,5 ± 2,3
F2 rhyolite	roche totale	4,32	34	23,11	36,8 ± 0,9
4L trachyte	roche totale	5,33	91	28,93	37,3 ± 0,6
4 ^E trachyte	roche totale	5,36	89	29,24	37,5 ± 0,6
MU1 trachyte	roche totale	5,41	77	29,41	37,4 ± 0,6
4P basalte	roche totale	1,33	67	7,69	39,7 ± 0,9
G22 basalte	roche totale	2,05	84	10,39	34,8 ± 0,8
Complexe de Kokoumi (roches plutoniques)					
109 gabbro	roche totale	2,54	60	13,53	36,6 ± 0,9
109 gabbro	amphibole	1,01	79	5,74	39,0 ± 0,9
99 syénite	roche totale	5,62	68	27,06	33,1 ± 0,5

la fraîcheur des échantillons et la convergence d'âge nous amènent à considérer l'âge de 37 Ma comme celui de la mise en place de ces roches. La dispersion modérée des valeurs suggère un épisode magmatique court (quelques millions d'années au maximum).

4.2. Le complexe de Kokoumi

L'amphibole et la roche totale de l'échantillon 109 donnent respectivement $39,0 \pm 0,9 \text{ Ma}$ et $36,6 \pm 0,9 \text{ Ma}$. Comme l'amphibole est un chronomètre K–Ar fiable du fait de sa haute température de fermeture, $530 \pm 40 \text{ °C}$ [25], la valeur de $39,0 \pm 0,9 \text{ Ma}$ doit approcher celle de la mise en place du complexe. L'âge roche totale ($33,1 \pm 0,5 \text{ Ma}$) donné par la syénite néphélinique 99 est significativement plus bas. Sans doute reflète-t-il celui de l'orthose, dont la température de fermeture peut être de l'ordre de 150 °C . Nous proposons donc de considérer l'âge de $33,1 \pm 0,5 \text{ Ma}$ comme un âge de refroidissement au moment où le pluton a franchi l'isotherme de 150 °C , vraisemblablement au contact des grès, à 5 km de profondeur [22,39]. L'âge donné par la roche totale du gabbro 109 est, compte tenu de la composition modale de la roche et des teneurs en potassium, à parts égales influencé par l'amphibole et le plagioclase, dont la température de fermeture est du même ordre que celle de l'ortho-

clase. Il semble donc logique d'obtenir un âge intermédiaire, $36,6 \pm 0,9 \text{ Ma}$, entre ceux de l'amphibole et de la syénite néphélinique.

L'âge proposé de $39,0 \pm 0,9 \text{ Ma}$ pour la mise en place du complexe de Kokoumi a aussi été obtenu par K–Ar sur des roches volcaniques de la haute vallée de la Bénoué, au Nigeria [20]. Le taux d'exhumation du pluton en haute Bénoué (5 km en 40 Ma) est en bon accord avec les taux de sédimentation au Cénozoïque en basse Bénoué [2].

5. La « Ligne du Cameroun », une fissure lithosphérique captant une zone chaude asthénosphérique

La « Ligne du Cameroun » a été active de façon intermittente depuis la fin du Crétacé, à savoir 65–70 Ma [18]. Nous présentons (Fig. 4) une revue des données radiométriques qui la concernent. Trois caractéristiques doivent être soulignées :

- durant l'intervalle 65–40 Ma, l'activité magmatique était confinée dans la partie nord entre 5° et 11° de latitude nord; elle se manifestait uniquement sous forme de complexes annulaires;

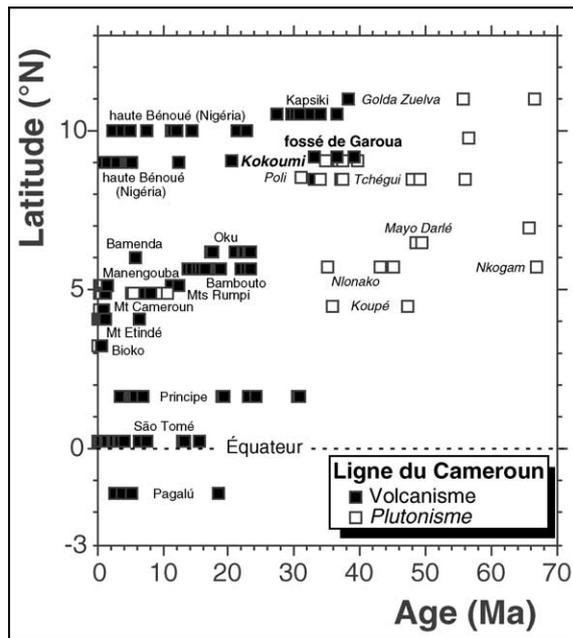


Fig. 4. Distribution des âges des roches volcaniques et plutoniques de la « Ligne du Cameroun ». Données d'après [7] (Pagalú), [14, 15] (Principe), [14,15,21] (São Tomé), [44] (Bioko), [14,17,31,43] (mont Etindé), [26] (mont Cameroun), [26,29] (mont Koupé), [42] (monts Rumpi), [19] (Manengouba, Bamenda), [14,19] (Bambouto et Oku), [4] (Nkongam), [5] (Nlonako, Mayo Darlé, Tchégui, Poli, Mboutou et Golda Zuelva), [20] (haute Bénoué, Nigeria), [14] (Kapsiki).

Fig. 4. Age distribution of volcanic and plutonic rocks from the 'Cameroon Line'. Data from [7] (Pagalú), [14,15] (Principe), [14, 15,21] (São Tomé), [44] (Bioko), [14,17,31,43] (Mt Etindé), [26] (Mt Cameroun), [26,29] (Mt Koupé), [42] (Mts Rumpi), [19] (Manengouba, Bamenda), [14,19] (Bambouto and Oku), [4] (Nkongam), [5] (Nlonako, Mayo Darlé, Tchégui, Poli, Mboutou, and Golda Zuelva), [20] (upper Benue, Nigeria), [14] (Kapsiki).

- les épanchements volcaniques ont commencé vers 40 Ma dans la partie nord de l'alignement, comme sur le plateau Kapsiki et dans le fossé de Garoua; dès ce moment, les complexes anorogéniques sont, en volume, devenus accessoires par rapport aux roches volcaniques;
- épisodiquement, il y a synchronisme du volcanisme sur tout l'alignement, comme entre 25 et 30 Ma et dans les dernières 5 Ma.

L'origine des structures volcaniques régionales linéaires demeure un sujet de controverse. Deux positions extrêmes apparaissent. D'un côté, les aligne-

ments continentaux ne présentent jamais une répartition spatio-temporelle simple du magmatisme (dont les volumes restent modérés) et ils résultent de variations locales à régionales du champ de contraintes induisant la propagation de fissures lithosphériques ou la réactivation d'anciennes failles (entre autres, [32,50]), la montée du matériel venant du manteau étant passive, ce qui implique l'existence d'une zone chaude dans le manteau sous-continentale pour expliquer le magmatisme. D'un autre côté, certains alignements magmatiques océaniques révèlent une progression spatio-temporelle des âges (entre autres, [6,13, 37]), et la présence d'un panache profond mantellique est avancée [46,47,51].

Alors que l'approche du problème par la géochimie isotopique [8,23,24] privilégie le modèle du panache, l'examen des âges chronométriques [18] révèle l'absence d'une migration systématique du volcanisme avec l'âge, et il est alors fait appel [30,33] à un modèle complexe : l'origine de la « Ligne du Cameroun » se situerait dans une zone chaude sublithosphérique, alimentée et fondue périodiquement par la venue de panaches d'origine profonde. Ainsi, sur la base de données de terrain et d'analyse d'images obtenues par satellite, la mise en place des complexes annulaires et des volcans de la chaîne a été reliée [36] à la réactivation des failles Pan-africaines préexistantes de l'Adamaoua et de la Sanaga, comme pour le fossé de la Bénoué, au Nigeria [32]. L'histoire primitive du *rifting* dans l'Ouest et le centre de l'Afrique se corrèle bien avec l'ouverture des bassins océaniques [16,22,52] et peut être responsable de l'activité volcanique cénozoïque le long de la « Ligne du Cameroun ». Il a aussi été suggéré [28] que cette dernière serait le résultat d'une convection à petite échelle, générée par le changement des propriétés physiques de la lithosphère à la limite continent-océan, mais cette hypothèse n'a pas fait l'objet d'une confrontation rigoureuse avec les données géophysiques existantes.

6. Conclusion

Trois raisons nous amènent, pour expliquer la Ligne du Cameroun, à privilégier l'hypothèse d'une fissure captant une zone asthénosphérique chaude [11] de préférence à celle d'un point chaud :

- l'existence de discontinuités qui traversent la lithosphère du continent africain [12] et qui ont une expression en surface se confondant avec des accidents tectoniques majeurs ;
- l'absence de progression d'âge ;
- l'existence, sous la « Ligne du Cameroun », d'une zone chaude profonde (400 km), surmontée d'une zone froide superficielle [1], schéma qui ne correspond pas à ce qui est observé sur un panache classique comme celui de Hawaii, où l'anomalie thermique est large et profonde.

Le manteau ainsi capté ferait donc partie de cette zone chaude anormale profonde. Des courants ascendants situés entre des cellules de convection cylindriques du manteau supérieur [34] les amèneraient en surface.

Remerciements

Les auteurs remercient le ministère français de la coopération pour sa participation au financement de la thèse de doctorat de l'université Pierre-et-Marie-Curie d'I.N., ainsi que N. Clauer et J.-C. Maurin pour leur lecture critique du manuscrit.

Références

- [1] D.L. Anderson, Y.-S. Zhang, T. Tanimoto, Plume heads, continental lithosphere, flood basalts and tomography, in : B.C. Storey (Ed.), *Magmatism and the causes of continental break-up*, Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 68 (1992) 99–124.
- [2] J. Benkheilil, *Structure et évolution géodynamique du bassin intracontinental de la Bénoué (Nigéria)*, thèse, université de Nice, France, 1986, 273 p.
- [3] M. Bonhomme, R. Thuizat, Y. Pinault, N. Clauer, A. Wendling, R. Winkler, *Méthode de datation potassium–argon. Appareillage et technique*, Notes techniques, Institut. Géol. Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg 3 (1975) 1–53.
- [4] M. Caen-Vachette, P. Tempier, P. Kamgang, *Le massif tertiaire du Nkogam (ouest Cameroun) : caractéristiques principales et géochronologie Rb/Sr sur roches totales*, J. Afr. Earth Sci. 6 (1987) 521–524.
- [5] J.-M. Cantagrel, C. Jamond, M. Lasserre, *Le magmatisme alcalin de la ligne du Cameroun au Tertiaire inférieur, données géochronologiques K/Ar*, C. R. somm. Soc. géol. France 6 (1978) 300–303.
- [6] D.A. Clague, G.B. Dalrymple, *The Hawaiian-Emperor volcanic chain, Part I, Geologic evolution*, US Geol. Surv. prof. pap. 1350 (1987) 5–54.
- [7] G. Cornen, R.C. Maury, *Petrology of the volcanic island of Annobon, Gulf of Guinea*, Mar. Geol. 36 (1980) 253–267.
- [8] C. Coulon, P. Vidal, C. Dupuy, P. Baudin, M. Popoff, H. Maluski, D. Hermitte, *The Mesozoic to Early Cenozoic magmatism of the Benue trough (Nigeria); geochemical evidence for the involvement of the St Helena plume*, J. Petrol. 37 (1996) 1341–1358.
- [9] A. Cox, G.B. Dalrymple, *Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of potassium–argon dating*, J. Geophys. Res. 72 (1967) 2603–2614.
- [10] B. Déruelle, C. Moreau, C. Nkoumbou, R. Kambou, J. Lisson, E. Njonfang, R.T. Ghogomu, 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, Heidelberg, 1991, pp. 274–327.
- [11] B. Déruelle, I. Ngounouno, C. Nkoumbou, *Mt Cameroun, Mt Etinde and Bioko Island volcanoes of the 'Cameroun hot Line'*, in : Program Abstr. Vol. Conf. 'Evolution of Ocean Island Volcanoes', Galapagos Islands, 4–12 June 1998, in : Penrose Conf. Ser., 1998, p. 28.
- [12] C. Dorbath, L. Dorbath, J.D. Fairhead, G.W. Stuart, *A teleseismic delay time study across the Central African Shear Zone in the Adamawa region of Cameroun, West Africa*, Geophys. J. R. Astron. Soc. 86 (1986) 751–766.
- [13] R.A. Duncan, M.A. Richards, *Hot spots, mantle plumes, flood basalts and true polar wander*, Rev. Geophys. 29 (1991) 31–50.
- [14] H.M. Dunlop, *Strontium isotope geochemistry and potassium–argon studies on volcanic rocks from the Cameroon Line, West Africa*, PhD thesis, University of Edinburgh, UK, 1983, 347 p.
- [15] H.M. Dunlop, J.G. Fitton, *A K–Ar and Sr-isotope study of the volcanic rocks of the island of Principe, West Africa. Evidence for mantle heterogeneity beneath the Gulf of Guinea*, Contrib. Mineral. Petrol. 71 (1979) 125–131.
- [16] J.D. Fairhead, *Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central South Atlantic Ocean: the role of the West and Central African rift system*, Tectonophysics 155 (1988) 181–191.
- [17] J.G. Fitton, *The Cameroon Line, West Africa: a comparison between oceanic and continental alkaline volcanism*, in : J.G. Fitton, B.G. Upton (Eds.), *Alkaline igneous rocks*, Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 30 (1987) 273–291.
- [18] J.G. Fitton, H.M. Dunlop, *The Cameroon Line, West Africa, and its bearing on the origin of the oceanic and continental alkali basalt*, Earth Planet. Sci. Lett. 72 (1985) 23–38.
- [19] J. Gouhier, J. Nougier, D. Nougier, *Contribution à l'étude volcanologique du Cameroun (« ligne du Cameroun » – Adamaoua)*, Ann. Fac. Sci. Univ. Yaoundé, Yaoundé, Cameroun 17 (1974) 3–48.
- [20] N.K. Grant, D.C. Rex, S.J. Freeth, *Potassium–argon ages and strontium isotope ratio measurements from volcanic rocks in northeastern Nigeria*, Contrib. Mineral. Petrol. 35 (1972) 277–292.
- [21] H.R. Grunau, P. Lehner, M.R. Cleintuar, P. Allenbach, G. Bakker, *New radiometric ages and seismic data from Fuerteventura (Canary Islands), Maio (Cape Verde Islands), and São Tomé (Gulf of Guinea)*, in : A.R. Borradaile, A.R. Ritsema, H.E. Rondeel, O.J. Simon (Eds.), *Progress in Geodynamics*, in :

- R. Neth. Acad. Arts Sci., North-Holland, Amsterdam, 1975, pp. 90–118.
- [22] R. Guiraud, J.-C. Maurin, Early Cretaceous rift of western and central Africa: an overview, *Tectonophysics* 213 (1992) 153–168.
- [23] A.N. Halliday, A.P. Dickin, A.F. Fallick, J.G. Fitton, Mantle dynamics: a Nd, Sr, Pb and O study of the Cameroon Line volcanic chain, *J. Petrol.* 29 (1988) 181–211.
- [24] A.N. Halliday, J.P. Davidson, P. Holden, C.P. DeWolf, D.C. Lee, J.G. Fitton, Trace element fractionation in plume and the origin of HIMU mantle beneath the Cameroon Line, *Nature* 347 (1990) 523–528.
- [25] T.M. Harrison, I. McDougall, Investigations of an intrusive contact, northwest Nelson, New Zealand-II Diffusion of radiogenic and excess ^{40}Ar in hornblende revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum analysis, *Geochim. Cosmochim. Acta* 44 (1980) 2005–2020.
- [26] J.D. Hedberg, A geological analysis of the Cameroon Trend, PhD thesis, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1969, 188 p.
- [27] A.B. Kampunzu, M. Popoff, Distribution of the main Phanerozoic African rifts and associated magmatism: introductory notes, in: A.B. Kampunzu, R.T. Lubala (Eds.), *Magmatism in extensional structural settings, The Phanerozoic African Plate*, Springer-Verlag, Berlin, 1991, pp. 2–10.
- [28] S.D. King, J. Ritsema, African hot spot volcanism: small-scale convection in the upper mantle beneath cratons, *Science* 290 (2000) 1137–1140.
- [29] M. Lasserre, Mise au point sur les granitoïdes dits ultimes du Cameroun : gisement, pétrographie et géochronologie, *Bull. BRGM, 2^e Sér.* 4 (1978) 153–159.
- [30] 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.
- [31] A. Le Maréchal, Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun, *Trav. Doc. ORSTOM, Paris* 59 (1976) 1–176.
- [32] H. Maluski, C. Coulon, M. Popoff, P. Baudin, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology, petrology and geodynamic setting of Mesozoic to Early Cenozoic magmatism from the Benue trough, Nigeria, *J. Geol. Soc. Lond.* 152 (1995) 311–326.
- [33] 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.
- [34] J.B. Meyers, B.R. Rosendahl, C.G.A. Harrison, Z.-A. Ding, Deep-imaging seismic and gravity results from the offshore Cameroon Volcanic Line, and speculation of African hotlines, *Tectonophysics* 284 (1998) 31–63.
- [35] R. Montigny, O. Le Mer, R. Thuizat, H. Whitechurch, K–Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study of metamorphic rocks associated with the Oman ophiolite: tectonic implications, *Tectonophysics* 151 (1988) 341–362.
- [36] C. Moreau, J.-M. Regnault, B. Déruelle, B. Robineau, A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa, *Tectonophysics* 139 (1987) 317–334.
- [37] W.J. Morgan, Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic, *Tectonophysics* 94 (1983) 123–139.
- [38] 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.
- [39] I. Ngounouno, C. Nkoumbou, J.-P. Loule, Relations entre l'évolution tectono-sédimentaire et le magmatisme du fossé de Garoua (Nord du Cameroun), *Afr. Geosci. Rev.* 4 (1997) 451–460.
- [40] 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.
- [41] I. Ngounouno, B. Déruelle, D. Demaiffe, R. Montigny, Petrology of the Cenozoic volcanism in the upper Benue valley, northern Cameroon (Central Africa), *Contrib. Mineral. Petrol.* 145 (2003) 87–106.
- [42] C. Nkoumbou, I. Étude géologique des monts Roumpi : un ensemble plutonique et volcanique de la « Ligne du Cameroun ». 2. Données pétrologiques sur les néphélinites du Mont Etinde (Cameroun), thèse, université Nancy-1, France, 1990, 355 p.
- [43] C. Nkoumbou, B. Déruelle, D. Velde, Petrology of Mt Etinde nephelinite series, *J. Petrol.* 36 (1995) 373–395.
- [44] J.D.A. Piper, A. Richardson, The paleomagnetism of the Gulf of Guinea volcanic province, West Africa, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 29 (1972) 147–171.
- [45] Y.H. Poudjom Djomani, M. Diament, M. Wilson, Lithospheric structures across the Adamawa plateau (Cameroon) from gravity studies, *Tectonophysics* 273 (1997) 317–327.
- [46] N.H. Sleep, Tapping of magmas from ubiquitous mantle heterogeneities: an alternative to mantle plume?, *J. Geophys. Res.* 89 (1984) 9980–9990.
- [47] N.H. Sleep, Hotspot volcanism and mantle plumes, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 20 (1992) 19–43.
- [48] R.H. Steiger, E. Jäger, Subcommittee on Geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology, *Earth Planet. Sci. Lett.* 36 (1977) 359–362.
- [49] G.W. Stuart, J.D. Fairhead, L. Dorbath, C. Dorbath, A seismic refraction study of the crustal structure associated with the Adamawa Plateau and Garoua Rift, Cameroon, West Africa, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 81 (1985) 1–12.
- [50] P.R. Vogt, Bermuda and Appalachian-Labrador rises: common non-hotspot processes?, *Geology* 19 (1991) 41–44.
- [51] R. White, D. McKenzie, Mantle plumes and flood basalts, *J. Geophys. Res.* 100 (1995) 17543–17585.
- [52] M. Wilson, R. Guiraud, Magmatism and rifting in Western and Central Africa from Late Jurassic to recent times, *Tectonophysics* 213 (1996) 203–225.