

Géochimie (Géochronologie)
Datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la province magmatique
de l'Atlantique central dans le Sud-Ouest algérien

Moulley Charaf Chabou^{a,b,*}, Amar Sebai^a, Gilbert Féraud^c, Hervé Bertrand^d

^a Département « Génie minier », École nationale polytechnique, 10, avenue Hassen-Badi, B.P. 182, El-Harrach, Alger, Algérie

^b Département des sciences de la terre, université Ferhat-Abbas, 19000 Sétif, Algérie

^c UMR-CNRS 6526 Géosciences-Azur, université de Nice, Sophia-Antipolis, parc Valrose, bâtiment « Sciences-naturelles », 06108 Nice cedex 02, France

^d UMR-CNRS 5570, École normale supérieure de Lyon–université Claude-Bernard–Lyon-1, 46, allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France

Reçu le 2 février 2007 ; accepté après révision le 24 septembre 2007

Disponible sur Internet le 26 novembre 2007

Présenté par Jean Aubouin

Résumé

Nous avons effectué des analyses $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur plagioclase de sept basaltes doléritiques (quatre sills, un dyke et deux coulées) du Sahara occidental algérien. Malgré l'existence d'âges plateau, tous les spectres d'âge obtenus sont affectés, soit par une altération en séricite, soit par des excès de ^{40}Ar . Des moyennes pondérées, correspondant aux phases les moins contaminées par la séricite, ont donné des âges minimum situés entre $192,7 \pm 3,0$ et $197,9 \pm 2,0$ Ma, tandis qu'un bas de selle (excès d'argon) correspond à un âge de $198,9 \pm 1,8$ Ma. Ces âges sont concordants avec ceux de la province magmatique de l'Atlantique central (CAMP), dont le secteur étudié représente l'extrémité orientale. En Algérie, cette limite orientale de la CAMP semble coïncider avec la suture panafricaine. *Pour citer cet article : M.C. Chabou et al., C. R. Geoscience 339 (2007).*

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

Abstract

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) in southwestern Algeria. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating analyses performed on plagioclase separates from seven doleritic basalts (four sills, one dyke and two lava flows) from southwestern Algeria display disturbed age spectra, reflecting various contributions of alteration by sericite and/or excess argon. Weighted mean ages corresponding to the less altered plagioclase fractions yielded minimum ages ranging from 192.7 ± 3.0 to 197.9 ± 2.0 Ma and a minimum date of 198.9 ± 1.8 Ma was obtained on a saddle-shaped age spectrum (excess argon). These ages are in accordance with those previously obtained on the CAMP province and partly in agreement with the peak activity of the CAMP at 198 Ma, highlighted in the neighbouring Taoudenni basin (Mali). In Algeria, the eastern boundary of the CAMP seems to coincide with the Pan-African suture zone. *To cite this article: M.C. Chabou et al., C. R. Geoscience 339 (2007).*

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

Mots clés : Datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; Province magmatique de l'Atlantique central (CAMP) ; Dolérites ; Algérie

Keywords: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating; Central atlantic magmatic province (CAMP); Dolerites; Algeria

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : mchabou@caramail.com (M.C. Chabou), feraud@unice.fr (G. Féraud), Herve.Bertrand@ens-lyon.fr (H. Bertrand).

Abridged English version

Introduction

The central atlantic magmatic province (CAMP), the largest known continental flood basalt province on Earth ($\sim 7 \times 10^6 \text{ km}^2$), is associated with the break-up of Pangea and the opening of the central Atlantic Ocean at or near the Triassic–Jurassic boundary [13,14,16,23]. Remnants of the CAMP are represented by dykes, sills and lava flows within four continents: North and South America, West Africa and Europe. However, the geographic boundaries of the CAMP are unknown, especially in Africa. Recent geochronological $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates of the CAMP magmatism in Morocco [10,14,18,23], Guinea [5] and Mali [22] range from 190 to 202 Ma, with a peak activity around 199 Ma. Mesozoic igneous rocks (mainly dolerites) are known in outcrops and subsurface boreholes in the western part of the Saharan platform, but only few data have been published on their age and geochemistry. The purpose of this paper is to present new age constraints on dolerite samples from southwestern Algeria. This paper contributes:

- to explore the temporal and spatial connection between the Mesozoic dolerites of southwestern Algeria and the CAMP event;
- to define the eastern contours of this huge province and therefore the geographic boundaries of the CAMP.

Geological setting

Mesozoic magmatism of basaltic composition (dolerites) occurs in the western part of the Saharan platform (southwestern Algeria). This magmatism is represented by dykes, sills and scarce lava flows (Fig. 1).

The dykes are generally of two types. (Type 1) A few long, NE–SW- to ENE–WSW-trending, isolated dykes crosscut Palaeozoic terrains. They are tens meters of wide and more than 100 km long. The best known is the Ksi-Ksou dyke, which outcrops over a length of ~ 80 km and a thickness of 20 to 50 m, whereas its total length seems to exceed 800 km, as evidenced by its magnetic signature [24]. (Type 2) A dense dyke swarm in the Fersiga area (southeast of the Hank basin) intrudes the Cambro-Ordovician series and represents the northeastern extension of the Taoudenni basin dyke swarm (northern Mali) [8].

Sills intrude the Neoproterozoic to Palaeozoic sediments of the three contiguous Tindouf, Reggane

and Hank basins. They outcrop in both the northern and southern sides of the Tindouf basin, at the eastern side of Reggane basin and in the Hank area [8]. Subsurface sills are also widespread in the Tindouf and Reggane basins, covering an area of more than $240,000 \text{ km}^2$, with thicknesses ranging from a few metres to 200 m [2].

Lava flows are restricted to the two small outcrops of Zerigat and Gara 779, located 60 km south of Bechar [8]. The flows are interstratified between Autunian red beds deposits and Cenozoic formations. Their thickness ranges from 10 to 15 m.

Geochronological data on these rocks were scarce until now. Conrad [3,4] obtained K–Ar dates ranging from 166 to 189 Ma on whole-rock samples from the Reggane and Tindouf sills and only one weighted mean $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age (no plateau) of 198 ± 4 Ma [18] was obtained for the Ksi-Ksou dyke.

Preliminary geochemical analyses indicate that these dolerites are tholeiites with low TiO_2 , similar to the low-Ti CAMP basalts.

^{40}Ar – ^{39}Ar dating

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses were performed on plagioclase separates from seven dolerite samples of southwestern Algeria: sills from Reggane (Rg1 and S29 samples), Tindouf (GSL3a sample) and Hank (Hk3 sample) basins, dykes from Fersiga area (152A sample) and lava flows from Bechar (Zr1 and 779A samples). Samples GSL3a and S29 are from subsurface (Fig. 1).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages were determined by the incremental heating technique (laser or furnace) at the geochronology laboratory of the CNRS–UMR Géosciences-Azur, Nice (France). The age and $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ ratio spectra are shown in Fig. 2.

Several plateau ages were obtained: 193.2 ± 0.8 Ma for S29, 195.5 ± 1.3 Ma for Hk3, 192.4 ± 1.1 Ma for 152A, 190.7 ± 2.1 Ma for 779A, 188.7 ± 2.2 Ma for Zr1 and 203.3 ± 1.5 Ma for GSL3a. Nevertheless, these plateau ages cannot be accepted, because they show systematic disturbed age spectra, reflecting various contributions of alteration by sericite and/or excess argon. The apparent ages are correlated with $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ ratios: lower apparent ages, corresponding to lower $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ ratios, are therefore related to higher contributions of K-rich alteration phases. The highest apparent ages generally correspond to the highest $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ ratios and therefore to the less-altered plagioclase fractions. Nevertheless, microprobe analyses of unaltered plagioclases from these rocks show that their Ca/K compositions (converted into $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ following the relationship $\text{Ca}/\text{K} = 1.83 \times ^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$) are

generally higher than the ratios obtained during age measurement. Weighted mean ages calculated on steps corresponding to the highest Ca/K ratios are (Fig. 2): 197.9 ± 2 (2σ) Ma (steps 4,11) for Hk3 (Hank), 197.1 ± 0.6 Ma (steps 4–5,12) and 195.0 ± 1.6 Ma (steps 4–5,13) for Rg1 and S29 respectively (Reggane), 197.4 ± 2.0 (2σ) Ma (steps 5, 17–19) for 152A (Fersiga), 193.2 ± 2.8 (2σ) Ma (steps 4–6) and 192.7 ± 3.0 Ma (steps 4–5) for 779A and Zr1 respectively (Bechar lava flows). These ages represent the minimum ages of the samples. Sample GSL3a (Tindouf) yields a saddle-shaped spectrum, indicative of excess argon contamination [11]. The step-age minima in the saddle-shaped spectrum gives an age of 198.9 ± 1.8 Ma (steps 4–6), but because of the probable existence of alteration on this fraction, this age is difficult to discuss.

Discussion and conclusion

In conclusion, the best estimates of the ages of these samples are ranging from 192.7 ± 3.0 to 197.9 ± 2.0 Ma, as defined by the maximum apparent ages corresponding to the freshest plagioclase fractions for samples showing alteration and by the minimum date of 198.9 ± 1.8 Ma obtained on the saddle-shaped age spectrum for the Tindouf sample (GSL3a), showing excess argon. These best estimates are mostly in accordance with:

- the data obtained [18] on the Ksi-Ksou dyke in Algeria (integrated age of 198 ± 4 Ma obtained on plagioclase for steps of low K/Ca ratio);
- the recent precise $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the dykes and sills in the Taoudenni basin (northern Mali), revealing a main peak in activity of the CAMP at 198 Ma [22];
- a major heating event at ca. 200 Ma, determined in the Reggane basin by apatite and zircon fission-track analysis [12];
- ca. 200 Ma palaeopole determined from dolerites of the Reggane basin [19].

Our results confirm that:

- the sills and dykes of the Reggane, Tindouf and Hank basins in Algeria belong to the CAMP;
- the tholeiitic magmatism of the CAMP extends so far into the African continent, as suggested by [18,22].

This study indicates that the area covered by the CAMP magmatism is much more significant than previously thought, when we consider the large area of ca. 240,000 km² intruded by subsurface sills in the

basins of Reggane and Tindouf, in Algeria [2]. Finally, the eastern boundary of the CAMP in Algeria seems to coincide with the Pan-African suture zone, in agreement with the assumption that the CAMP activity is controlled by pre-existing structural features [1,15,22].

1. Introduction

Une importante activité magmatique a accompagné la fragmentation initiale de la Pangée, aboutissant à l'ouverture de l'Atlantique central au début du Jurassique. Cette activité est à l'origine de la plus vaste province magmatique continentale, couvrant plus de sept millions de kilomètres carrés, connue sous le nom de province magmatique de l'Atlantique central (CAMP) [13]. Consécutivement à la dislocation continentale et à l'ouverture de l'océan Atlantique, les témoins de la CAMP sont aujourd'hui dispersés sur quatre continents : Amérique du Nord, Amérique du Sud, Afrique et Europe. Cependant, les limites géographiques de la province sont encore mal connues, notamment sur la plaque africaine, où les roches magmatiques se sont mises en place à plus de 1000 km de la marge Atlantique [1,22]. Les datations $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la CAMP au Maroc [10,14,18,23], en Guinée [5] et au Mali [22] montrent des âges compris entre 190 et 202 Ma, avec un pic de l'activité magmatique autour de 199 Ma.

Dans les bassins occidentaux du Sahara algérien, on connaît depuis longtemps l'existence d'un magmatisme mésozoïque, constitué principalement de dolérites, dont la mise en place est supposée liée à l'ouverture de l'Atlantique central [8]. Cependant, malgré leur abondance, ces roches magmatiques ont été peu étudiées, notamment du point de vue géochronologique : les quelques datations par la méthode K–Ar (sur roche totale) donnent des âges dispersés entre 166 Ma et 189 Ma [3,4]. Un seul âge $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ a été mesuré, donnant une moyenne pondérée à 198 ± 4 Ma sur plagioclase, sans âge plateau [18]. Le but de cette note est de présenter de nouvelles mesures $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur les dolérites du Sud-Ouest algérien, avec comme objectif :

- de contraindre la limite orientale de la CAMP en domaine saharien ;
- de tenter d'évaluer le contrôle des bassins sahariens sur la mise en place de la CAMP.

La position de cette limite sera discutée en fonction des structures lithosphériques sous-jacentes.

2. Contexte géologique

Les formations sédimentaires néoproterozoïques et paléozoïques des bassins occidentaux du Sahara algérien (Béchar, Tindouf, Reggane et Hank) sont fréquemment injectées de dolérites sous forme de dykes et de sills (Fig. 1). Deux petites coulées basaltiques existent également dans la région de Béchar.

Les dykes se présentent, dans une grande partie de la région étudiée, sous forme de longs dykes verticaux, orientés NE–SW, qui recoupent toute la série paléozoïque. Le dyke le plus connu est celui de Ksi-Ksou, qui recoupe les formations permo-carbonifères de la région de Béchar et dont la longueur totale dépasserait 800 km, selon les données aéromagnétiques [24]. Au sud-est du Hank, dans la région de Fersiga, les dykes se présentent sous forme de réseaux très denses, recoupant les formations cambro-ordoviciennes [8]. Ils représentent l’extension nord-est du vaste réseau de dykes du bassin de Taoudenni, qui montre un pic d’activité à 198 Ma [22].

Les sills, dont l’épaisseur varie de 10 à 100 m, affleurent sur les flancs nord et sud du bassin de Tindouf, sur la bordure orientale du bassin de Reggane et dans le Hank. En subsurface, tous les sondages réalisés dans les bassins de Tindouf et de Reggane ont rencontré des dolérites à des profondeurs allant de 100 à 3920 m [2]. Dans les bassins de Tindouf et de Reggane, les sills sont interstratifiés, principalement dans le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur, alors que ceux du Hank sont localisés dans les formations néoproterozoïques et cambriennes. Enfin, certains sondages pétroliers réalisés dans le flanc sud du bassin de Tindouf ont également recoupé des dolérites au-dessus du socle [2].

Les coulées basaltiques dans la région d’étude sont limitées aux deux petits affleurements de Zerigat et de « Gara 779 », situés à 60 km au sud-ouest de Béchar. Ces coulées, de 10 à 15 m d’épaisseur, reposent sur les formations rouges autuniennes et sont recouvertes par les grès cénozoïques de la Hamada [8].

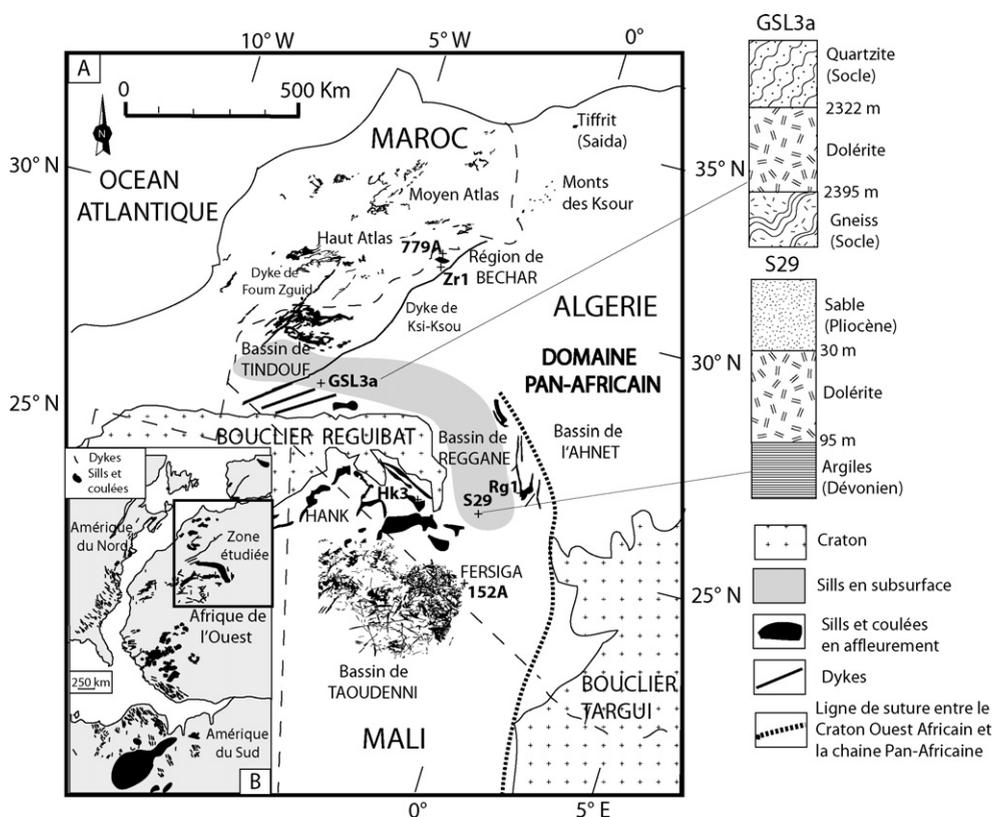


Fig. 1. A : Carte montrant les formations magmatiques de la CAMP au nord-ouest de l’Afrique et la localisation des échantillons datés par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Tiretés : frontières internationales. B : Carte générale de la CAMP, modifiée d’après [1,5,13,15].

Fig. 1. A: Location map of the CAMP in northwestern Africa, showing also the location of the samples used for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. Dashed lines: international borders. B: Map of CAMP magmatism, modified from [1,5,13,15].

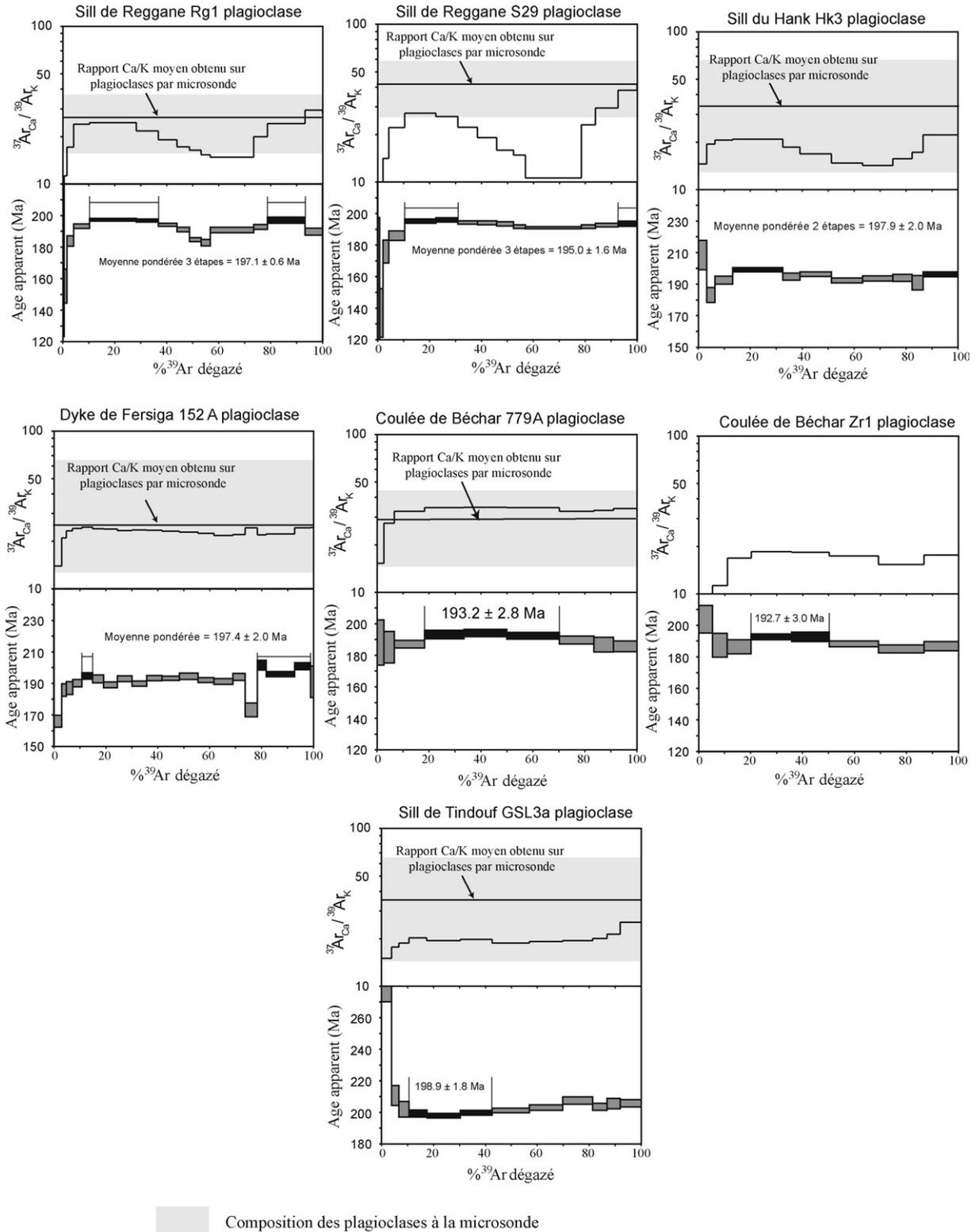


Fig. 2. Spectres d'âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et spectres $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$, en fonction de ^{39}Ar libéré, obtenus sur plagioclase de dolérites du Sud-Ouest algérien. Les rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ des plagioclases frais sont donnés par la moyenne et la fourchette (en grisé) des rapports Ca/K obtenus à la microsonde,

3. Échantillonnage et caractéristiques pétrographiques

Nous avons analysé sept échantillons de dolérites, provenant de sills des bassins de Reggane (échantillons Rg1 et S29), de Tindouf (GSL3a) et du Hank (Hk3), d'un dyke de Fersiga (152A) et des coulées de Béchar (Zr1 et 779A). Les échantillons GSL3a et S29 sont de subsurface et ont été prélevés en forage.

La pétrographie de ces dolérites est relativement homogène. La texture est intergranulaire, parfois ophitique (échantillon GSL3a) pour les sills et les dykes et microlitique porphyrique pour les coulées. Les paragenèses primaires, typiques de tholéiites continentales, sont essentiellement formées de plagioclase, de clinopyroxène (augite et pigeonite) et d'oxydes ferro-titanés. Des plages interstitielles de micropegmatite sont présentes dans les faciès les plus grenus. Les minéraux d'altération sont principalement la séricite (plagioclase), l'ouralite (pyroxène) et des minéraux argileux. Du point de vue géochimique, ces dolérites ont des compositions de tholéiites pauvres en titane (TiO_2 de 0,88 à 1,55 %), typiques de la CAMP.

4. Datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Les échantillons ont été analysés sur plagioclase par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ au laboratoire de géochronologie du CNRS-UMR Géosciences-Azur, Nice (France). La taille des grains de plagioclase analysés est de 125 à 160 μm pour les échantillons 779A, Zr1 et GSL3a et de 160 à 200 μm pour les autres échantillons. Pour le chauffage au laser, 160–200 grains ont été utilisés, tandis que pour le chauffage au four à induction, 12–20 mg de plagioclases ont été analysés. Ils ont été irradiés pendant environ 70 h dans le réacteur de l'université McMaster à Hamilton (Canada) en position 5C, avec le moniteur Hb3gr, pour lequel un âge de 1072 ± 11 Ma a été retenu [9,17,21]. Le flux neutronique total était de l'ordre de $8,8 \times 10^{18}$ neutrons/cm². Pour les échantillons Rg1 et S29, le chauffage par paliers de température a été effectué par four à induction, relié à un spectromètre de masse 120–12 cm, équipé d'une source de Baur-Signer et d'un multiplicateur d'électrons Balzers SEV 217. Les

échantillons Hk3, 152A, GSL3a, 779A et Zr1 ont été chauffés par un laser CO₂ Synrad 48–5 et un intégrateur de faisceau, puis mesurés au moyen d'un spectromètre de masse VG3600, équipé d'un détecteur de Daly et d'un photomultiplicateur. Les critères retenus pour définir un âge plateau sont :

- au moins 70 % de la quantité totale de ^{39}Ar ;
- au moins trois étapes successives ;
- une concordance de l'âge intégré du plateau avec chaque âge apparent du plateau, affecté d'une marge d'erreur à 2σ .

Les âges plateau et moyennes pondérées (avec les marges d'erreur) sont donnés à 2σ . Les constantes de désintégration utilisées sont celles de [20]. Les corrections d'interférence sont :

- $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 7,30 \times 10^{-4} (\pm 3 \%)$;
- $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2,82 \times 10^{-4} (\pm 1 \%)$;
- $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 2,97 \times 10^{-2} (\pm 3 \%)$.

L'erreur sur le rapport $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ du moniteur est incluse dans le calcul d'erreur des âges plateau et moyennes pondérées, mais pas dans celui des erreurs sur l'âge du moniteur et les constantes de désintégration.

Plusieurs âges plateau ont été obtenus : $193,2 \pm 0,8$ Ma pour S29, $195,5 \pm 1,3$ Ma pour Hk3, $192,4 \pm 1,1$ Ma pour 152A, $190,7 \pm 2,1$ Ma pour 779A, $188,7 \pm 2,2$ Ma pour Zr1 et $203,3 \pm 1,5$ Ma pour GSL3a. Néanmoins, ceux-ci ne sont pas à retenir, car les spectres d'âge montrent tous que les minéraux analysés sont affectés, soit par une altération en séricite, soit par des excès de ^{40}Ar (Fig. 2). En effet, mis à part l'échantillon GSL3a, tous les spectres d'âge ont à peu près la même forme. Ils présentent un maximum à moyenne température, suivi d'une diminution des âges, puis parfois d'un maximum à haute température. Par ailleurs, on observe, dans presque tous les cas, une corrélation directe entre les âges apparents et les rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$. Une telle corrélation est fréquente sur les plagioclases altérés, les âges apparents bas correspondant aux rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ les plus faibles, ce qui nous conduit à conclure que ces âges sont liés à des phases d'altération des plagioclases, très probablement de la séricite. Les âges apparents

convertis en rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ selon la relation : $\text{Ca}/\text{K} = 1,83 \times ^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$. Les âges apparents sont donnés avec une marge d'erreur à 1σ , alors que les âges plateau, âges mini-plateau et moyennes pondérées sont donnés à 2σ .

Fig. 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra and $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ ratio spectra, as a function of ^{39}Ar released, obtained on plagioclases separated from southwestern Algerian dolerites. Ca/K ratios (grey field) corresponding to fresh plagioclases (converted into $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ by the relationship $\text{Ca}/\text{K} = 1,83 \times ^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$) are deduced from microprobe analyses.

élevés correspondent aux rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ les plus élevés et donc aux phases pour lesquelles la contribution de la séricite est minimale. Des analyses à la microsonde (microsonde Cameca Camebax, université Lyon-1) effectuées sur des plagioclases frais de ces échantillons montrent que les rapports Ca/K (convertis en rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ par la relation $\text{Ca}/\text{K} = 1,83 \times ^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$) sont parfois proches (Rg1, 152A), mais toujours plus élevés que ceux donnés par les analyses d'argon. Il est donc raisonnable d'admettre que la meilleure estimation de l'âge des échantillons est fournie par les âges les plus élevés.

Ainsi, la moyenne pondérée calculée à partir du spectre d'âge de l'échantillon Rg1 (Reggane) sur les trois étapes de température, donnant pour les âges maximum (800–850 °C, 850–880 °C et 1450–1550 °C, correspondant à 40,85 % de ^{39}Ar dégazé) une valeur de $197,1 \pm 0,6$ (2 σ) Ma, représente la meilleure estimation de l'âge vrai, bien qu'elle puisse être inférieure à celui-ci.

Pour l'échantillon S29 (Reggane), un âge de moyenne pondérée de $195,0 \pm 1,6$ Ma est calculé sur trois étapes (750–850 °C et 1630 C — fusion correspondant à 28 % d' ^{39}Ar dégazé), mais, du fait de la grande différence entre les rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ (microsonde et argon), il est probable que cet âge soit sensiblement inférieur à l'âge vrai.

L'échantillon Hk3 (Hank) a fourni une moyenne pondérée de $197,9 \pm 2$ Ma, calculée à partir du spectre d'âge sur deux étapes de températures (893–1001 °C et fusion représentant 39,4 % d' ^{39}Ar dégazé). Pour les mêmes raisons qu'en ce qui concerne l'échantillon précédent, cet âge est probablement trop jeune également.

L'échantillon 152A (Fersiga) a fourni un âge de moyenne pondérée de $197,4 \pm 2,0$ Ma sur quatre étapes aux fractions de température comprises entre 890 et 952 °C et 1400 et 1591 °C (correspondant à un dégazage d' ^{39}Ar de 25 %). Celui-ci est probablement proche de l'âge vrai, mais légèrement inférieur à celui-ci ($^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ proches des Ca/K mesurés sur les plagioclases).

En ce qui concerne l'échantillon 779A (coulée de Béchar), la moyenne pondérée de $193,2 \pm 2,8$ Ma, obtenue sur trois étapes, correspond à une légère bosse du spectre $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$. Malgré un rapport $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ déduit de la microsonde légèrement inférieur, la corrélation évidente entre âge et rapport Ca/K doit nous conduire à la prudence sur cet âge particulièrement jeune.

Nous ferons la même remarque pour l'échantillon Zr1, qui a donné une moyenne pondérée de

$192,7 \pm 3,0$ Ma (973–1090 °C, correspondant à 30 % d' ^{39}Ar dégazé).

Le spectre de l'échantillon GSL3a (Tindouf) est différent des autres. Il est en forme de selle et montre une augmentation de l'âge à hautes et basses températures, ce qui est caractéristique d'un excès d'argon [11]. À moyenne température, entre 916 et 1214 °C, l'échantillon montre un « mini-plateau », correspondant à un âge de $198,9 \pm 1,8$ Ma (représentant 32 % de ^{39}Ar cumulé). Si le plagioclase analysé était dépourvu de la moindre altération, cet âge pourrait être considéré comme un âge maximum. Néanmoins, les rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ sont très inférieurs à ceux déduits des analyses à la microsonde. Il est donc probable que cet âge soit également affecté par l'altération. Il est donc impossible de savoir si cet âge est trop vieux (excès d'argon) ou trop jeune (altération) par rapport à l'âge vrai. L'existence de l'excès d'argon dans cet échantillon peut s'expliquer par le fait que la roche analysée provient d'un sill intrusif dans le socle précambrien des Eglab.

5. Discussion et conclusion

Les spectres d'âge $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtenus sur les plagioclases des dolérites du Sud-Ouest algérien sont perturbés, du fait de l'existence d'altération et/ou d'excès d'argon. Cependant, dans le cas où il n'y a pas effet combiné de l'altération et de l'excès d'argon, il est parfois possible d'approcher l'âge vrai à certaines phases de températures [5,18]. Lorsqu'une altération existe, la corrélation systématique entre les âges apparents et les rapports $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$, proportionnels aux rapports Ca/K, permet de sélectionner les âges apparents les moins perturbés, qui correspondent aux rapports les plus élevés. Un excès d'argon est révélé par un spectre d'âge en forme de selle, pour lequel l'âge minimum, donné aux températures intermédiaires, représente un âge maximum de cristallisation [11]. Cet excès d'argon peut être dû aux formations du socle traversées par le magma et à un dégazage ultérieur incomplet.

Ainsi, les moyennes pondérées correspondant aux phases les moins contaminées par la séricite donnent des âges minimum situés entre $192,7 \pm 3,0$ et $197,9 \pm 2,0$ Ma pour les échantillons de Reggane, du Hank et de Béchar. Pour Tindouf (échantillon GSL3a), un bas de selle (excès d'argon) à $198,9 \pm 1,8$ Ma représente un âge qui peut être, soit maximum, soit minimum (si l'altération est importante).

Ces âges « approchés » sont en accord avec :

- l'âge $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 198 ± 4 Ma (moyenne pondérée) précédemment obtenu sur le dyke de Ksi-Ksou [18] ;
- les âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ récemment obtenus sur les sills et les dykes du bassin voisin de Taoudenni (Mali), indiquant un pic d'activité du magmatisme de la CAMP vers 198 Ma dans la région [22] ;
- l'âge du pic thermique à 200 Ma, mis en évidence dans le bassin de Reggane par l'analyse des traces de fission sur apatite et zircon des différents termes de la série paléozoïque [12] ;
- le paléopôle Jurassique inférieur (autour de 200 Ma) obtenu sur les dolérites du bassin de Reggane [19] ;
- une récente compilation des âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtenus sur l'ensemble de la province [16], indiquant une mise en place de la CAMP entre 190 et 202 Ma, avec un pic d'intensité autour de 199 Ma sur la marge africaine.

Bien que les analyses présentées ne fournissent pas d'âge robuste, c'est-à-dire géologiquement significatif, cette étude démontre que les dolérites du Sud-Ouest algérien (sills des bassins de Tindouf, Reggane et du Hank, dykes de Fersiga et coulées de la région de Béchar) appartiennent à la CAMP.

Les bassins sédimentaires qui entourent le bouclier Reguibat (Tindouf, Reggane, Hank) semblent contrôler largement la distribution de la CAMP dans cette partie du Sahara, tandis qu'aucun témoin de ce magmatisme n'a été identifié à ce jour sur le bouclier lui-même. Des volumes de magmas, plus conséquents qu'il n'y paraît à l'affleurement, ont été injectés dans ces bassins, comme semble l'indiquer l'abondance des sills en subsurface dans les bassins de Tindouf et de Reggane (Fig. 1). La superficie occupée par ce magmatisme dépasse $240\,000\text{ km}^2$, avec une épaisseur moyenne des sills de 100 m [2]. Ces nouvelles données confirment que la CAMP s'étend profondément à l'intérieur de la plaque africaine, comme cela a déjà été souligné [18,22] et que l'activité magmatique y a été intense.

La limite orientale de la CAMP en Algérie semble coïncider avec la suture panafricaine (Fig. 1). En effet, à l'Est du bassin de Reggane, dans le domaine panafricain, on ne connaît pas de dolérites intrusives dans la série paléozoïque du bassin de l'Ahnet. Plus à l'est, des sills doléritiques sont connus dans les bassins du Djado [8] et de Tin Serririne (extrême Sud-Est algérien). Alors que l'âge des sills et dykes du Djado demeure inconnu, une récente datation K–Ar [7] et une étude paléomagnétique [6] des dolérites du bassin de Tin Serririne leur confèrent un âge Carbonifère inférieur, donc sans relation avec la CAMP. Cela

confirmerait que la limite orientale de la CAMP en Algérie se situe à la frontière entre les bassins de Reggane et de l'Ahnet, dans la zone de suture panafricaine. Il est intéressant de noter que, du côté américain, la limite occidentale de la CAMP coïncide également avec une structure orogénique majeure (les Appalaches) [15]. Cela renforce l'hypothèse selon laquelle la mise en place du magmatisme de la CAMP a été contrôlée par d'anciennes structures précambriennes ou paléozoïques [1,15,22].

Remerciements

Nous remercions MM. B. Benrabah (Sonatrach), A. Semiani (ORGM), M.E.M. Derder, B. Bayou (CRAAG) et J. Fabre, qui ont échantillonné certaines des roches analysées.

Références

- [1] H. Bertrand, The Mesozoic tholeiitic province of northwest Africa: a volcano-tectonic record of the early opening of Central Atlantic, in : A.B. Kampunzu, R.T. Lubala (Eds.), *Magmatism in Extensional Structural Settings, the Phanerozoic African Plate*, Springer-Verlag, 1991, pp. 147–191.
- [2] M.C. Chabou, *Étude Pétrographique et Géochimique du Magmatisme Mésozoïque de l'Ouest de la Plate-forme Saharienne*, thèse de magistère, École Nationale Polytechnique, Alger, 2001.
- [3] J. Conrad, Distension jurassique et tectonique éocécacée sur le Nord-Ouest de la plate-forme africaine (bassin de Reggane, Sahara central), *C. R. Acad. Sci.* 274 (1972) 2423–2426 (Paris, Serie D).
- [4] J. Conrad, Y. Lemosquet, Du craton vers sa marge : évolution sédimentaire et structurale du bassin Ahnet–Timimoum–Béchar (Sahara algérien) au cours du Carbonifère ; données paléoclimatiques, *Bull. Soc. geol.* 26 (1984) 987–994 (France).
- [5] K. Deckart, G. Féraud, H. Bertrand, Age of Jurassic continental tholeiites of french Guyana, Surinam and Guinea: implications for the initial opening of the Central Atlantic ocean, *Earth Planet. Sci. Lett.* 150 (1997) 205–220.
- [6] M.E.M. Derder, B. Henry, B. Bayou, A. Ouabadi, H. Bellon, H. Djellit, A. Khaldi, M. Amenna, K. Baziz, A. Hemmi, M.A. Guemache, New African lower Carboniferous paleomagnetic pole from intrusive rocks of the Tin Serririne basin (southern border of the Hoggar, Algeria), *Tectonophysics* 418 (2006) 189–203.
- [7] H. Djellit, H. Bellon, A. Ouabadi, M.E.M. Derder, B. Henry, B. Bayou, A. Khaldi, K. Baziz, M.K. Merahi, Âge $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, Carbonifère inférieur, du magmatisme basique filonien du synclinal paléozoïque de Tin Serririne, Sud-Est du Hoggar (Algérie), *C. R. Geoscience* 338 (2006) 624–631.
- [8] J. Fabre, *Introduction à la Géologie du Sahara Algérien*, SNED, Alger, 1976.
- [9] F. Jourdan, C. Vèrati, G. Féraud, Intercalibration of the $\text{Hb}3\text{gr } ^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standard, *Chem. Geol.* 231 (2006) 177–189.
- [10] K.B. Knight, S. Nomade, P.R. Renne, A. Marzoli, H. Bertrand, N. Youbi, The Central Atlantic Magmatic Province at the Triassic–Jurassic boundary: paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

- evidence from Morocco for brief, episodic volcanism, *Earth Planet. Sci. Lett.* 228 (2004) 143–160.
- [11] M.A. Lanphere, G.B. Dalrymple, Identification of excess ^{40}Ar by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum technique, *Earth Planet. Sci. Lett.* 32 (1976) 141–148.
- [12] P. Logan, I. Duddy, An investigation of the thermal history of the Ahnet and Reggane Basins, Central Algeria and the consequences for hydrocarbon generation and accumulation, in : D.S. MacGregor, R.T.J. Moody, D.D. Clark-Lowes (Eds.), *Petroleum Geology of North Africa*, *Geol. Soc* 132 (1998) 231–263 (London, Special publication).
- [13] A. Marzoli, P.R. Renne, E.M. Piccirillo, M. Ernesto, G. Bellieni, A. De Min, Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province, *Science* 284 (1999) 616–618.
- [14] A. Marzoli, H. Bertrand, K. Knight, S. Cirilli, N. Buratti, C. Verati, S. Nomade, P.R. Renne, N. Youbi, R. Martini, K. Allenbach, R. Neuwerth, C. Rapaille, L. Zaninetti, G. Bellieni, Synchrony of the Central Atlantic Magmatic province and the Triassic–Jurassic boundary climatic and biotic crisis, *Geology* 32 (2004) 973–976.
- [15] J.G. McHone, Non-plume magmatism and tectonics during the opening of the central Atlantic Ocean, *Tectonophysics* 316 (2000) 287–296.
- [16] S. Nomade, K.B. Knight, E. Beutel, P.R. Renne, C. Verati, G. Féraud, A. Marzoli, N. Youbi, H. Bertrand, Chronology of the Central Atlantic Magmatic Province: implications for the Central Atlantic rifting processes and the Triassic–Jurassic biotic crisis, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 244 (1–4) (2007) 326–344.
- [17] P.R. Renne, C.C. Swisher, A.L. Deino, D.B. Karner, T. Owens, D.J. Depaolo, Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, *Chem. Geol.* 145 (1998) 117–152.
- [18] A. Sebaï, G. Féraud, H. Bertrand, J. Hanes, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geochemistry of tholeiitic magmatism related to the early opening of the central Atlantic rift, *Earth Planet. Sci. Lett.* 104 (1991) 455–472.
- [19] B. Smith, M.E.M. Derder, B. Henry, B. Bayou, A.K. Yelles, H. Djellit, M. Amenna, M. Garces, E. Beamud, J.P. Callot, R. Eschard, A. Chambers, T. Aifa, R. Ait Ouali, H. Gandriche, Relative importance of the Hercynian and post-Jurassic tectonic phases in the Saharan platform: a palaeomagnetic study of Jurassic sills in the Reggane Basin (Algeria), *Geophys. J. Int.* 167 (2006) 380–396.
- [20] 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.
- [21] G. Turner, J.C. Huneke, F.A. Podosek, G.J. Wasserburg, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and cosmic ray exposure ages of Apollo 14 samples, *Earth Planet. Sci. Lett.* 12 (1971) 15–19.
- [22] C. Verati, H. Bertrand, G. Féraud, The farthest record of the Central Atlantic Magmatic Province into West Africa craton: precise $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geochemistry of Taoudenni basin intrusives (northern Mali), *Earth Planet. Sci. Lett.* 235 (2005) 391–407.
- [23] C. Verati, C. Rapaille, G. Féraud, A. Marzoli, H. Bertrand, N. Youbi, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and duration of the Central Atlantic Magmatic Province volcanism in Morocco and Portugal and its relation to the Triassic–Jurassic boundary, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 244 (1–4) (2007) 308–325.
- [24] D. Zaïghouche, Examen des Phases d’Instabilité Orogénique du Paléozoïque Supérieur du Bassin de Béchar et leurs Relations avec la Sédimentation, thèse de 3^e cycle, université d’Alger, 1985.