

Géomatériaux

Identification géochimique de la province magmatique de l'Atlantique central en domaine plissé : exemple du Moyen Atlas marocain

Abdelkader Mahmoudi ^a, Hervé Bertrand ^{b,*}

^a Département de géologie, faculté des sciences, université Moulay-Ismaïl, BP 11201, Zitoune, Meknès, Maroc

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

Reçu le 27 février 2007 ; accepté après révision le 27 juin 2007

Disponible sur Internet le 20 août 2007

Présenté par Jean Aubouin

Résumé

À partir de critères volcanologiques et géochimiques, on montre que les formations magmatiques fortement tectonisées des rides anticlinales du Moyen Atlas marocain sont des coulées appartenant à la province magmatique de l'Atlantique central (CAMP), d'âge triasico-liasique. Bien que la pile basaltique originelle soit disloquée par la tectonique, trois unités volcaniques sont identifiées grâce aux éléments immobiles (Ti, P, Zr, Nb, Y, terres rares). Elles sont identiques aux unités inférieure, intermédiaire et supérieure de la CAMP dans le Haut Atlas, ce qui plaide en faveur d'un début d'activité synchrone dans ces deux régions. La rareté des intrusions alcalines postérieures à la CAMP montre que l'évolution magmatique du Moyen Atlas au cours du Mésozoïque ne peut pas se caler sur les modèles définis dans le Haut Atlas. *Pour citer cet article* : A. Mahmoudi, H. Bertrand, C. R. Geoscience 339 (2007).

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

Abstract

Geochemical identification of the central Atlantic magmatic province in folded domain, exemplified by the Moroccan Middle Atlas. We use volcanological and geochemical criteria to assign the deformed magmatic rocks from the anticlinal ridges in the Moroccan Middle Atlas to lava flows of the central Atlantic magmatic province (CAMP), emplaced at the Triassic–Liassic boundary. Despite the disturbance of the original basaltic pile by tectonics, three volcanic units were identified based on immobile elements (Ti, P, Zr, Nb, Y, REE). These units are similar to the lower, intermediate, and upper units of the CAMP in the High Atlas, which suggests a synchronous inception of the volcanic activity in the two regions. The scarcity of the subsequent alkaline intrusions indicates that the magmatic evolution during Mesozoic times in the Middle Atlas cannot be explained by the models derived from the High Atlas. *To cite this article*: A. Mahmoudi, H. Bertrand, C. R. Geoscience 339 (2007).

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

Mots clés : Moyen Atlas plissé ; Maroc ; CAMP ; Basalte tholéiitique ; Géochimie ; Trias–Jurassique ; Roche alcaline

Keywords: Folded Middle Atlas; Morocco; CAMP; Tholeiitic basalt; Geochemistry; Triassic–Jurassic; Alkaline rock

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : Herve.Bertrand@ens-lyon.fr (H. Bertrand).

Abridged English version

Introduction

The central Atlantic magmatic province (CAMP) is one of the largest continental flood basalt provinces on the Earth [14]. In Morocco, CAMP is widely represented as lava flows in the Atlas and Meseta and as sills and dykes in the Anti Atlas, and is related to the Late Triassic rifting events resulting in the opening of the central Atlantic Ocean [3]. The (magneto) stratigraphy, geochemistry, and geochronology of the volcanic pile, up to 350 m thick, have been investigated in the Triassic–Liassic basins preserved on the northern and southern flanks of the High Atlas [1,3,4,11,15,19,21,22]. These studies have defined a reference basaltic sequence consisting of four units (the lower, intermediate, upper and recurrent units) that straddle the Triassic–Jurassic boundary [11,15,21].

In contrast, the north and eastward extent of the CAMP in Morocco is unconstrained, particularly in the Middle Atlas, due to insufficient geochemical data [7,17] and to equivocal criteria used to discriminate CAMP from other magmatic events in highly deformed domains [6].

The aim of this paper is to establish volcanological and geochemical criteria that could be applied to other deformed zones, allowing one to discriminate CAMP remnants from supposedly Jurassic–Cretaceous sub-volcanic intrusions in the folded belt of Middle Atlas [6]. Using immobile elements, it is shown that most of the magmatic remnants preserved in the anticlinal ridges belong to the Triassic–Liassic lava flows of CAMP, and that witnesses of younger magmatic events are much less common than in the High Atlas [9,10,13]. Moreover, our data will be compared with the CAMP reference series in the High Atlas in order to evaluate whether CAMP activity is synchronous or not [18] throughout Morocco.

Geological context of the folded Middle Atlas and description of the outcrops

The Middle Atlas is a NE–SW-trending intracontinental chain [16] subdivided into two domains (Figs. 1 and 2): (i) a tabular plateau, made of red beds and basaltic lava flows capped by dolomites unconformable on the Palaeozoic basement [5,12,17]; (ii) the eastern folded part of the Middle Atlas, which consists of anticlinal ridges separated by synclines filled with mid-Jurassic sediments [6]. The ridges axes consist of Triassic red beds and magmatic formations, which are

studied here in five areas elongated along one of these ridges (Fig. 1).

Along the ridges, the magmatic outcrops are discontinuous and dismembered by faults, precluding any reconstruction of the volcanic series. Yet, field criteria allow the recognition of lava flows and discard the hypothesis of subvolcanic intrusions previously proposed [6]: (i) alternating massive and vesicular structures are observed; (ii) pipe vesicle layers attest to the basal part of lava flows, some of them being straightened up to the vertical in response to the tectonics. Consequently, the massive part of some lava flows (less sensitive to alteration) may mimic vertical walls interpreted erroneously as dykes [6]. In one place only, we observed a more differentiated dyke intruding the lava flows (Fig. 1).

Petrographic data and geochemistry

The observed textures are doleritic to microlitic, with a few phenocrysts. The primary paragenesis is typical of continental tholeiites and consists of Ca-plagioclase associated with augitic clinopyroxene and, to a lesser extent, Ti-magnetite. In addition, most of the doleritic rocks contain cryptocrystalline or granophyric interstitial patches. Olivine phenocrysts and pigeonite may occur in some rocks. The olivine is completely transformed into serpentine and chlorite, and the plagioclase and interstitial patches are partly transformed into sericite and clay minerals, respectively.

The dyke cutting the lava flows consists of alkaline monzogabbro to monzodiorite, including plagioclase, orthoclase, (Ti)-augite, biotite, Ti-magnetite and apatite. Pegmatitic differentiates contain also some quartz. Secondary minerals are well developed, and include sericite, albite, epidote, chlorite, prehnite, and orualite.

A selection of geochemical data is presented in Table 1. Although some elements have been mobilized by alteration processes (LOI from 1.4 to 3.3 wt%), the tholeiitic affinity of all the analysed lava flows from the five areas investigated is attested by the immobile elements: low TiO_2 (1.02–1.53 wt%) and P_2O_5 (0.1–0.2 wt%) contents; high $\text{Zr}/\text{P}_2\text{O}_5$ (670–860) and Y/Nb (1.9–4.4; Fig. 3) ratios [8]. Trace-element patterns are enriched in light rare-earth elements (LREE) and other incompatible elements, and display a negative Nb anomaly (Fig. 4) typical of continental tholeiites, particularly those from the CAMP [3]. According to the variations of LREE enrichment (La/Yb : 3.8–8.1), the lava flows can be subdivided into three groups (Fig. 4), which share, respectively, chemical compositions

similar to those displayed by the lower, intermediate and upper units of the CAMP basaltic pile in the High Atlas (Fig. 5) [3,15].

In contrast, despite the high level of alteration, an alkaline composition is attributed to the dyke crosscutting the flows (Fig. 3) based on immobile elements (TiO_2 : 1.8–3.4 wt%, P_2O_5 : 0.3–0.41 wt%, Y/Nb: 0.9–1.2).

Discussion and conclusions

On the basis of volcanological criteria (alternation of massive and vesicular sheets, orientation of vesicle pipes), it is established that almost all the outcrops investigated along the Middle Atlas ridges correspond to basaltic lava flows dismembered and straightened by the Atlasic tectonics.

Despite the alteration, the chemical fingerprint of these lava-flows is preserved for the less mobile elements (Ti, P, Zr, Nb, Y, REE). These elements attest to the tholeiitic composition of the volcanics (Figs. 3 and 4) and allow the first recognition in the Middle Atlas of three flows units similar to the lower, intermediate, and upper units (Fig. 5) that characterize the CAMP volcanic sequence previously defined on the northern and southern flanks of the High Atlas chain [3,15]. Only the recurrent unit was not recognized in the Middle Atlas. From a methodological point of view, these results highlight the reliability of the less mobile elements in order to reconstruct the CAMP evolution in folded domains in which the original stratigraphy of the flows is no more preserved. This process could be applied to the highly deformed axial zones of the central High Atlas and in the Rif as well, with the aim of constraining the space-time distribution of CAMP throughout Morocco.

The recognition of the lower volcanic unit in the Middle Atlas ridges, and in the High Atlas as well, argues for a synchronous Late Triassic [15] inception of the volcanic activity in the two areas, rather than for a westwards diachronous activity, as previously suggested [18]. However, our data suggest an earlier vanishing activity in the Middle Atlas compared to some high Atlasic basins in which the recurrent unit attests to a Later Hettangian asthenosphere upwelling [21].

This study underlines the importance of the CAMP in the Middle Atlas and the minor contribution of the Jurassic–Cretaceous magmatism to the evolution of this Atlasic domain. Most of the supposedly Jurassic–Cretaceous hypovolcanic intrusions [6] are shown to be Triassic–Liassic CAMP lava flows. Only one alkaline

dyke is identified along the investigated ridge (Fig. 1). The whole-rock K–Ar age of 119 Ma [6] obtained on another supposedly Jurassic–Cretaceous intrusion (in fact a CAMP lava-flow) cannot be considered as a valid age, due to the alteration of the rock. A few alkaline intrusions are documented elsewhere in the Middle Atlas [2], in contrast with the central High Atlas, where numerous subvolcanic intrusions are known [10,13,23]. Therefore, the High Atlas model of anorogenic intrusions linked to strike slip faults [13] cannot be applied to the Middle Atlas ridges.

1. Introduction

La province magmatique de l'Atlantique central (CAMP) est l'une des plus vastes provinces basaltiques continentales sur Terre [14]. Elle est largement représentée au Maroc, sous forme de coulées dans les domaines atlasiques et mésésitiens, et sous forme de sills et de dykes dans l'Anti Atlas, en association avec le *rifting* fini-triasique de l'Atlantique central [3]. La pile volcanique, dont l'épaisseur atteint 350 m, a été étudiée d'un point de vue (magnéto) stratigraphique, géochimique et géochronologique dans les bassins triasico-liassiques préservés sur les flancs nord et sud du Haut Atlas [1,3,4,11,15,19,21,22]. Ces travaux ont défini une série basaltique servant de référence pour la CAMP : elle est constituée de quatre unités, inférieure, intermédiaire, supérieure et récurrente [3], qui encadrent la limite Trias–Jurassique [11,15,21].

L'extension de la CAMP au Nord et à l'Est du Maroc est en revanche mal documentée, notamment dans le Moyen Atlas, par manque de données géochimiques suffisantes [7,17] et de critères permettant de discriminer, dans les zones déformées, le volcanisme de la CAMP, par rapport à d'autres événements magmatiques postérieurs [6].

L'objet de cette note est de rechercher des critères volcanologiques et géochimiques applicables en domaines déformés, pour discriminer, dans les rides de la chaîne plissée du Moyen Atlas, le volcanisme de la CAMP par rapport aux intrusions sub-volcaniques d'âge présumé Jurassico-Crétacé [6]. Nous montrons, sur la base des éléments immobiles, que l'essentiel de l'activité magmatique est triasico-liassique et que les témoins d'une évolution magmatique ultérieure sont plus rares que dans le Haut Atlas [9,10,13]. La comparaison de ces données avec la série volcanique de la CAMP servant de référence dans le Haut Atlas permet, en outre, de tester le synchronisme ou le diachronisme [18] de la CAMP à l'échelle du Maroc.

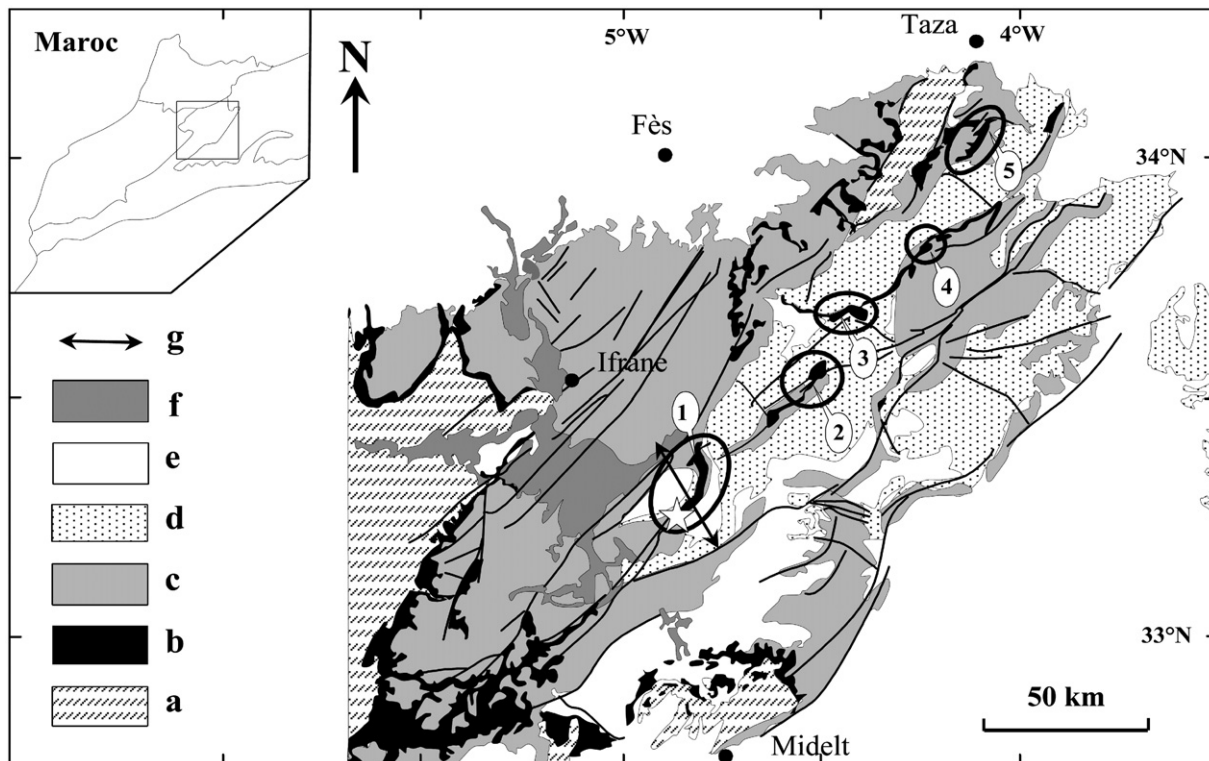


Fig. 1. Carte géologique simplifiée du Moyen Atlas (d'après la carte géologique du Maroc au 1:1 000 000, 1985). **a** : Paléozoïque ; **b** : Trias (sédiments et basaltes) ; **c** : Calcaires dolomitiques du Jurassique inférieur ; **d** : Marno-calcaires du Jurassique moyen ; **e** : Terrains post-jurassiques ; **f** : Basaltes quaternaires ; **g** : position de la coupe perpendiculaire aux rides (Fig. 2). Localisation des affleurements magmatiques étudiés : 1 : oued El Maleh ; 2 : Tizi Isoullitene ; 3 : Aït Braham ; 4 : Batha ; 5 : Tabenyaïcht. L'étoile représente l'intrusion alcaline de l'oued El Maleh.

Fig. 1. (a) Geological sketch map of the Middle Atlas from the 1:1 000 000 map of Morocco, 1985). **a**: Palaeozoic; **b**: Triassic (sediments and basalts); **c**: Lower Jurassic dolomitic limestones; **d**: Mid-Jurassic marly-calcareous; **e**: Post-Jurassic formations; **f**: Quaternary basalts; **g**: location of the cross-section perpendicular to the ridges (Fig. 2). Location of studied areas: 1: Oued El Maleh; 2: Tizi Isoullitene; 3: Aït Braham; 4: Batha; 5: Tabenyaïcht. The star represents the oued El Maleh alkaline intrusion.

2. Le Moyen Atlas plissé : contexte géologique et description des affleurements

Le Moyen Atlas (Maroc) est une chaîne intracontinentale [16] d'orientation générale NE–SW et subdivisée en deux domaines structuraux (Figs. 1 et 2) :

- le causse moyen-atlasique se présente sous forme d'un plateau, constitué principalement de calcaires dolomitiques du Jurassique inférieur, qui surmontent la série triasique formée d'argilites rouges et de basaltes [5,12,17] ; l'ensemble forme la couverture discordante sur le socle Paléozoïque ;
- le Moyen Atlas plissé correspond à la partie est de la chaîne et se distingue du causse sub-tabulaire par la présence de rides qui forment des reliefs orientés dans la direction générale de la chaîne. Ces rides anticlinales encadrent des dépressions synclinales qui ont continué à fonctionner pendant le Jurassique

moyen comme des dépocentres marneux et marno-calcaires assez épais [6]. Les rides sont constituées de calcaires liasiques et, en position axiale, d'argiles triasiques et des formations magmatiques qui font l'objet de cette note. Les principaux affleurements

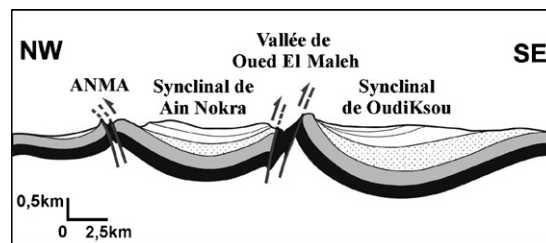


Fig. 2. Coupe schématique des rides moyen-atlasiques. Mêmes figures que sur la Fig. 1. ANMA : accident nord moyen-atlasique.

Fig. 2. Schematic section across the Middle Atlas ridges. Same symbols as in Fig. 1. ANMA: north Middle Atlas accident.

étudiés sont alignés, en majorité, selon « la deuxième ride », orientée selon l'axe Boulemane–Taza, du sud-ouest au nord-est : oued El Maleh, Tizi Isoullitene, Aït Braham, Batha et Tabenyaicht (Fig. 1).

Les affleurements magmatiques, discontinus, sont fortement démembrés par le jeu de failles à composante décrochante et généralement en contact tectonique avec les argilites triasiques, ce qui rend difficile toute reconstitution de la série volcanique. Des critères

volcanologiques de terrain attestent cependant que ces formations sont des coulées basaltiques et non des intrusions, comme cela avait été proposé [6] : (i) variation progressive de structure, massive à vacuolaire, (ii) les cylindres de dégazage qui, dans une coulée en position normale, sont verticaux (perpendiculaires à la base de la coulée), sont ici en position horizontale, indiquant que certaines coulées ont été redressées jusqu'à la verticale sous l'effet de la tectonique. L'altération et l'érosion différentielle au sein de ces

Tableau 1

Analyses représentatives (éléments majeurs et traces) des roches magmatiques des rides du Moyen Atlas

Table 1

Representative analyses (major and trace elements) of magmatic rocks from the Middle Atlas ridges

Éch.	M3	M29	AB11	M14	M25	AH1	TIS13	Tab1	M22	BA8	M16	M19
Unité	inf.	inf.	inf.	interm.	interm.	interm.	interm.	interm.	sup.	sup.	dyke	dyke
Localité	O. Maleh	O. Maleh	A. Brah	O. Maleh	O. Maleh	A. Brah	Tizi Is	Taben	O. Maleh	Batha	O. Maleh	O. Maleh
SiO ₂ (%)	54,15	53,74	54,10	53,64	53,25	53,46	52,83	54,87	51,56	51,96	51,01	52,71
TiO ₂	1,51	1,53	1,44	1,18	1,18	1,17	1,05	1,33	1,06	1,02	1,81	3,42
Al ₂ O ₃	14,36	14,40	13,88	14,70	14,72	13,94	13,53	13,55	15,29	14,27	16,08	14,22
FeO _t	9,01	8,70	9,62	9,56	9,33	9,61	10,23	9,58	9,32	9,71	10,44	10,93
MnO	0,24	0,29	0,15	0,21	0,15	0,13	0,17	0,13	0,12	0,24	0,13	0,13
MgO	6,71	6,71	7,25	7,59	7,87	8,83	9,01	7,37	8,68	7,95	6,74	3,88
CaO	9,81	10,17	8,55	10,49	10,83	9,99	10,09	10,10	11,26	11,05	7,64	8,87
Na ₂ O	2,67	2,49	3,13	2,16	2,03	1,92	2,11	1,99	2,12	2,69	4,00	5,19
K ₂ O	1,32	1,79	1,70	0,33	0,51	0,82	0,85	0,93	0,47	1,02	1,87	0,26
P ₂ O ₅	0,21	0,18	0,18	0,13	0,12	0,12	0,11	0,14	0,11	0,10	0,30	0,38
PF	1,71	1,52	2,21	1,39	2,16	2,87	1,40	1,73	2,45	1,92	2,93	2,04
Cr(ppm)	233	276	286	208	346	294	357	172	215	219	239	40
Ni	72	89	84	62	70	83	142	58	83	93	98	20
Rb	43	50	52	38	17	21	23	21	9	26	38	5
Sr	215	208	167	166	157	130	151	136	169	174	443	156
Y	27,0	26,0	25,3	22,5	20,5	22,2	21,7	23,6	20,0	19,4	19,4	29,4
Zr	160	145	131	105	93	99	96	110	76	73	109	168
Nb	14,3	12,8	11,7	6,1	5,8	6,4	6,1	7,4	4,5	6,2	17,2	24,0
Cs	1,28	0,79	1,77	2,13	0,33	1,21	0,78	1,41	0,25	1,52		
Ba	257	372	385	138	146	163	178	169	120	324	189	35
La	20,44	15,38	17,23	10,96	9,61	8,20	8,76	13,02	9,10	7,08		
Ce	43,46	34,85	36,63	24,08	20,84	19,19	19,88	27,46	19,19	16,61	47,08	49,30
Pr	5,59	4,60	4,65	3,13	2,82	2,66	2,65	3,53	2,49	2,24		
Nd	23,03	19,64	19,04	13,27	12,37	11,62	11,34	14,91	11,08	10,18		
Sm	5,43	5,01	4,65	3,49	3,25	3,08	2,98	3,84	2,83	2,71		
Eu	1,59	1,44	1,48	1,08	1,02	0,95	0,96	1,27	0,93	0,92		
Gd	5,66	5,24	4,78	3,85	3,53	3,40	3,32	4,26	3,41	3,00		
Tb	0,86	0,81	0,76	0,63	0,60	0,60	0,56	0,70	0,54	0,52		
Dy	5,07	4,98	4,63	3,86	3,68	3,70	3,53	4,39	3,52	3,37		
Ho	1,06	1,00	0,91	0,81	0,78	0,77	0,74	0,91	0,74	0,71		
Er	2,90	2,79	2,54	2,35	2,16	2,23	2,04	2,57	2,08	1,99		
Yb	2,53	2,50	2,36	2,11	1,94	2,03	1,89	2,38	1,96	1,88		
Lu	0,38	0,37	0,33	0,31	0,29	0,30	0,27	0,36	0,29	0,28		
Hf	4,40	4,05	3,68	2,68	2,57	2,63	2,53	3,12	2,14	1,85		
Ta	1,02	0,92	0,84	0,45	0,41	0,41	0,41	0,51	0,31	0,31		
Pb	4,88	4,20	4,82	3,30	1,23	12,39	2,51	3,09	2,63	14,13		
Th	4,25	3,94	3,68	2,47	2,02	2,14	2,20	2,50	1,26	1,24		
U	0,88	0,83	0,78	0,53	0,44	0,45	0,48	0,54	0,45	0,29		

Abbréviations : O. Maleh : oued El Maleh, A. Brah : Aït Braham, Tizi Is : Tizi Isoullitene, Taben : Tabenyaicht.

coulées redressées (cœur massif/bordure vacuolaire) font ressortir en saillie les faciès de cœur de coulée, qui miment ainsi des dykes, à l'origine de confusions [6].

Ces coulées basaltiques sont localement recoupées par un dyke plus différencié d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur, dans le secteur de l'oued El Maleh (Fig. 1). Aucune autre intrusion postérieure aux coulées n'a été identifiée dans les boutonnières triasiques situées le long de la ride étudiée.

3. Pétrographie et géochimie

Les textures observées au sein des coulées sont doléritiques (intergranulaires ou intersertales), à gros grains (2–3 mm) ou à grains fins (50 μm), ou micro-litiques faiblement porphyriques. Les paragenèses minérales sont typiques des compositions tholéiitiques et sont dominées par l'association plagioclase calcique–clinopyroxène augitique et, en quantité moindre, par la titanomagnétite (parfois à exsolutions d'ilménite). La plupart des faciès doléritiques comportent des plages interstitielles cryptocristallines ou granophyriques (à assemblage quartz–feldspath alcalin–apatite). Des microphénocristaux d'olivine, toujours très altérés, ainsi que de la pigeonite sont plus rarement présents dans certains faciès. L'altération est plus ou moins poussée selon les affleurements : l'olivine est totalement transformée en serpentine, chlorite et iddingsite ; le plagioclase est fréquemment séricitisé, et les phases interstitielles remplacées par des produits phylliteux.

Le dyke intrusif dans les coulées est constitué de monzogabbros et monzodiorites, passant de faciès fins (50–100 μm) en bordure à des faciès grenus à passées pegmatitiques (3–4 mm) au cœur du dyke. La paragenèse, typiquement alcaline, est constituée de plagioclase, orthose, augite (parfois titanifère), biotite, titanomagnétite, apatite. Les passées pegmatitiques contiennent en outre du quartz. Des phases secondaires sont largement développées (séricite, albite, épidote, chlorite, prehnite, ouralite).

Les éléments majeurs et traces ont été analysés par spectrométrie de fluorescence X à l'université Lyon-1, sur 28 échantillons. Les terres rares et Hf, Th, U ont été analysés par ICPMS à l'École normale supérieure de Lyon sur dix échantillons représentatifs des différents secteurs étudiés. Une sélection des analyses chimiques est présentée dans le Tableau 1.

En dépit de la mobilisation de certains éléments par les processus d'altération (perte au feu de 1,4 à 3,3 %), l'affinité tholéiitique de toutes les coulées analysées dans les cinq secteurs étudiés est attestée par les éléments immobiles : faibles concentrations en TiO_2

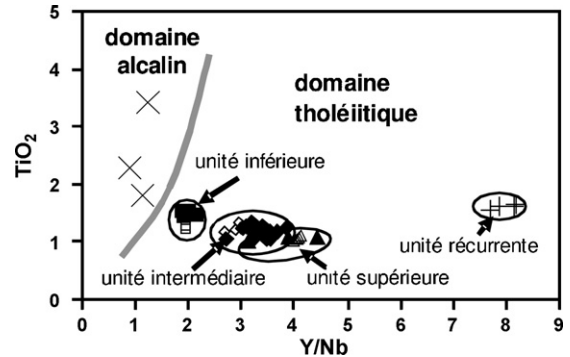


Fig. 3. Diagramme TiO_2 vs Y/Nb [8] discriminant l'affinité tholéiitique des coulées triasico-liasiques, de l'affinité alcaline de l'intrusion de l'oued El Maleh. Symboles pleins : coulées du Moyen Atlas, symboles vides : coulées du Haut Atlas [15]. Les carrés, losanges et triangles représentent respectivement les unités inférieure, intermédiaire et supérieure. Croix : dyke monzogabbroïque de l'oued El Maleh.

Fig. 3. TiO_2 vs. Y/Nb plot [8] that discriminates the tholeiitic affinity of Triassic-Liasic lava-flows from the alkaline affinity of the Oued El Maleh intrusion. Filled symbols: Middle Atlas lava-flows; open symbols: High Atlas lava-flows [15]. The squares, diamonds and triangles represent the lower, intermediate and upper units, respectively. Cross, Oued El Maleh dyke.

(1,02–1,53 %) et en P_2O_5 (0,1–0,2 %), rapports $\text{Zr}/\text{P}_2\text{O}_5$ (670–860) et Y/Nb (1,9–4,4 ; Fig. 3) élevés [8]. La gamme de variation du rapport Y/Nb est la même que celle définie par les coulées de la CAMP dans le Haut Atlas. Les spectres d'éléments traces montrent, en outre, un enrichissement en terres rares légères et autres éléments incompatibles, ainsi qu'une anomalie négative en Nb (Fig. 4), caractéristiques des tholéiites

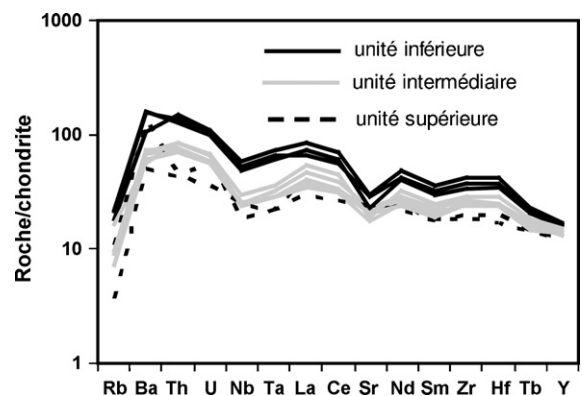


Fig. 4. Spectres d'éléments traces, normalisés à la chondrite selon [20], des différentes unités volcaniques identifiées dans le Moyen Atlas. Terres rares, Hf, Th et U analysés par ICP-MS ; Rb, Ba, Nb, Sr, Zr, et Y analysés par fluorescence X.

Fig. 4. Trace element patterns, normalized to the chondrite [20], of the volcanic units identified in the Middle Atlas. REE, Hf, Th and U analysed by ICP-MS; Rb, Ba, Nb, Sr, Zr, and Y analysed by XRF.

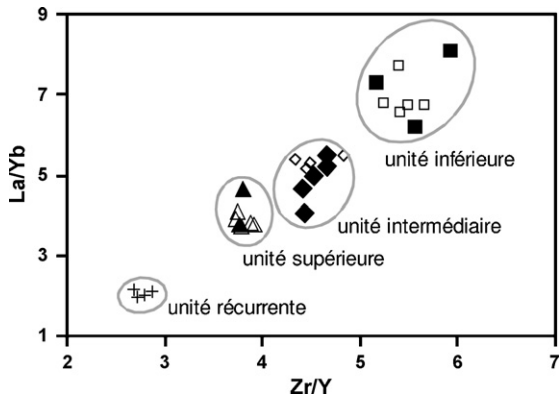


Fig. 5. Variation des rapports La/Yb et Zr/Y de l'unité inférieure à l'unité supérieure dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas (mêmes symboles que dans la Fig. 3). Les croix représentent l'unité récurrente du Haut Atlas. Données du Haut Atlas d'après [15].

Fig. 5. La/Yb et Zr/Y variations from the lower to the upper unit in the Middle Atlas and the High Atlas (same symbols as in Fig. 3). Crosses represent the recurrent unit from the High Atlas. High Atlas data from [15].

continentales, notamment celles de la CAMP [3]. Les variations de cet enrichissement en éléments incompatibles (La/Yb de 3,8 à 8,1) permettent de subdiviser les laves en trois groupes (Fig. 4) dont les compositions chimiques sont respectivement similaires aux unités inférieure, intermédiaire et supérieure définies dans le Haut Atlas (Fig. 5) [3,15].

La composition de l'intrusion recoupant les coulées s'écarte de celles-ci. Malgré un degré d'altération poussé, les concentrations en éléments immobiles (TiO_2 : 1,8–3,4 %, P_2O_5 : 0,3–0,41, Y/Nb : 0,9–1,2) indiquent clairement une affinité alcaline (Fig. 3) conforme aux paragenèses observées.

4. Discussion et conclusions

Sur la base de critères volcanologiques, il est établi que la quasi-totalité des formations magmatiques étudiées dans les rides du Moyen Atlas sont des coulées basaltiques fortement disloquées et redressées lors de la tectonique atlasique, et non des intrusions subvolcaniques. Ces lambeaux de coulées sont préférentiellement pincés au cœur des rides anticlinales au sein des argiles triasiques.

Malgré l'altération, la signature chimique des coulées est préservée en ce qui concerne les éléments les moins mobiles (Ti, P, Zr, Nb, Y, terres rares). Ces éléments montrent l'affinité tholéiitique du volcanisme (Figs. 3 et 4) et permettent de reconnaître, pour la première fois dans le Moyen Atlas, trois unités, inférieure, intermédiaire et supérieure (Fig. 5),

caractéristiques de la série volcanique de la CAMP, préalablement identifiée sur les versants sud et nord du Haut Atlas [3,15]. Seule l'unité récurrente n'est pas reconnue dans le Moyen Atlas. Sur le plan méthodologique, ces résultats soulignent le potentiel des éléments peu mobiles pour reconstituer l'évolution magmatique de la CAMP dans les domaines plissés où la stratigraphie originelle des coulées a disparu. Cette démarche pourrait être appliquée dans les zones axiales très déformées du Haut Atlas central et dans la chaîne rifaine, afin de mieux contraindre la distribution spatiotemporelle de la CAMP à l'échelle du Maroc.

La reconnaissance de l'unité inférieure dans les rides du Moyen Atlas, comme dans le Haut Atlas, plaide pour une initiation du volcanisme de la CAMP synchrone dans ces deux domaines, au Trias terminal [15], plutôt que pour un diachronisme d'est en ouest, suggéré antérieurement [18]. En revanche, nos données suggèrent que l'activité volcanique pourrait cesser plus tôt dans le Moyen Atlas que dans les bassins les plus matures du Haut Atlas, dans lesquels l'unité récurrente témoigne d'une remontée asthénosphérique plus tardive à l'Hettangien [21].

Ce travail souligne l'importance de la CAMP dans le Moyen Atlas et conduit à réviser la part attribuée au magmatisme jurassico-crétacé dans l'évolution de ce domaine Atlasique. Un seul dyke postérieur aux coulées de la CAMP, de nature alcaline, a été reconnu parmi les cinq secteurs étudiés (Fig. 1). Les autres « intrusions subvolcaniques » proposées dans ces secteurs [6] sont, en fait, des coulées triasico-liasiques redressées et le seul âge K–Ar (roche totale) à 119 Ma [6], obtenu sur l'une de ces coulées, ne peut être considéré comme valide, en raison de l'altération de la roche. Cette intrusion alcaline, d'âge incertain, constitue l'un des rares exemples documentés dans le Moyen Atlas [2]. Cette situation contraste avec le Haut Atlas central, où de tels massifs subvolcaniques abondent, du Jurassique au Crétacé [10,13,23]. Le modèle d'évolution magmatique du Haut Atlas au Jurassico-Crétacé, lié à la remobilisation de fractures crustales par cisaillement simple [13] ne semble donc pas transposable au Moyen Atlas.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien du programme GDR Marges et d'une *Action intégrée* entre l'université Lyon-1 et celle de Meknès. Nous remercions C. Douchet et P. Capiez pour les analyses chimiques, E. Mahjoubi et O. Harmouzi pour leur aide technique et

H. El ouardi et A. Akasbi pour les discussions sur la structure du Moyen Atlas.

Références

- [1] E.H. Aït Chayeb, N. Youbi, A. El Boukhari, M. Bouabdelli, A. Amrhar, Le volcanisme permien et mésozoïque inférieur du bassin d'Argana (Haut Atlas occidental, Maroc) : un magmatisme intraplaque associé à l'ouverture de l'Atlantique central, *J. Afr. Earth. Sci.* 26 (1998) 499–519.
- [2] G. Arsicault, Présence de dykes d'aïounite dans le Moyen Atlas marocain, au sud de Khénifra (étude préliminaire), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 257 (1963) 1119–1121.
- [3] H. Bertrand, The Mesozoic tholeiitic province of Northwest Africa: A volcano-tectonic record of the early opening of the central Atlantic, in : A.B. Kampunzu, R.T. Lubala (Eds.), *The Phanerozoic African plate*, Springer-Verlag, New York, 1991, pp. 147–188.
- [4] H. Bertrand, J. Dostal, C. Dupuy, Geochemistry of Early Mesozoic tholeiites from Morocco, *Earth Planet. Sci. Lett.* 58 (1982) 225–239.
- [5] A. Charrière, Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen-Atlas au sud-est de Fès (Maroc), thèse d'État, Toulouse 1990.
- [6] B. Fedan, Évolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements : le Moyen Atlas (Maroc) durant le Méso-Cénozoïque, *Travaux de l'Institut scientifique de Rabat, Série Géologie et Géographie physique* 18 (1989) 142.
- [7] L. Fiechtner, H. Frieddrichsen, K. Hammerschmidt, Geochemistry and geochronology of early Mesozoic tholeiites from central Morocco, *Geol. Rund. Sch.* 81 (1992) 45–62.
- [8] P.A. Floyd, J.A. Winchester, Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements, *Earth Planet. Sci. Lett.* 27 (1975) 211–218.
- [9] E.A. Hailwood, J.G. Mitchell, Palaeomagnetic and radiometric dating results from Jurassic intrusions in South Morocco, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 24 (1971) 351–364.
- [10] C. Harmand, E. Laville, Magmatisme alcalin mésozoïque et phénomènes thermiques associés dans le Haut Atlas central (Maroc), *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine* 7 (1983) 367–376.
- [11] 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 Ar/Ar evidence from Morocco for brief, episodic volcanism, *Earth. Planet. Sci. Lett.* 228 (2004) 143–160.
- [12] G. Lachkar, D. Ouarrache, A. Charrière, Nouvelles données palynologiques sur les formations sédimentaires associées aux basaltes triasiques du Moyen Atlas et de la haute Moulouya (Maroc), *Rev. Micropaleontol.* 43 (2000) 281–299.
- [13] E. Laville, C. Harmand, Évolution magmatique et tectonique du bassin intracontinental mésozoïque du Haut Atlas (Maroc) : un modèle de mise en place synsédimentaire de massifs anorogéniques liés à des décrochements, *Bull. Soc. géol. France* 24 (1982) 213–227.
- [14] A. Marzoli, P.R. Renne, E.M. Piccirillo, M. Ernesto, G. Bellieni, A. DeMin, Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the central Atlantic Magmatic Province, *Science* 284 (1999) 616–618.
- [15] A. Marzoli, H. Bertrand, K.B. 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.
- [16] M. Mattauer, P. Tapponnier, F. Proust, Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc, *Bull. Soc. géol. France* 3 (1977) 521–526.
- [17] D. Ouarrache, Sédimentation et volcanismes (effusif et explosif) associés au *rifting* triasique et infra-liasique dans le Moyen Atlas sud-occidental et la haute Moulouya (Maroc), thèse d'État, université Mohammed-V, Rabat, 2002.
- [18] M. Oujidi, L. Courel, N. Benaouiss, M. El Mostaine, M. El Youssi, M. Et-Touhami, D. Ouarrache, M. Sabaoui, A. Tourani, Triassic series of Morocco, stratigraphy, palaeogeography and structuring of the southwestern Peri-Tethyan Plateform. An overview, in : S. Crasquin-Soleau, E. Barrier (Eds.), *Peri-Tethys, Memoir 5: New data on Peri-Tethyan Basins*, Mem. Mus. natl Hist. nat. Paris 182 (2000) 23–37.
- [19] A. Sebai, G. Féraud, H. Bertrand, J. Hanes, Ar/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.
- [20] S.S. Sun, W.F. McDonough, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes, in : M.D. Saunders, M.J. Norry (Eds.), *Magmatism in the ocean basins*, 42, Geol. Soc. Spec. Publ. 1989, pp. 313–345.
- [21] C. Verati, C. Rapaille, G. Féraud, A. Marzoli, H. Bertrand, N. Youbi, Ar/Ar ages and duration of the Central Magmatic Province volcanism in Morocco and Portugal and its relation to the Triassic–Jurassic boundary, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 244 (2007) 308–325.
- [22] N. Youbi, L.T. Martins, J.M. Munha, H. Ibouh, J. Madeira, E.M. Ait Chayeb, A. El Boukhari, The Late Triassic–Early Jurassic volcanism of Morocco and Portugal in the geodynamic framework of the opening of the central Atlantic Ocean, in : W.E. Hames, J.G. McHone, P.R. Renne, C. Ruppel (Eds.), *The Central Atlantic Province: Insights from fragments of Pangea*, AGU Geophys. Mon. 136 (2003) 179–207.
- [23] R. Zayane, A. Essaifi, R.C. Maury, A. Piqué, E. Laville, M. Bouabdelli, Cristallisation fractionnée et contamination crustale dans la série magmatique jurassique transitionnelle du Haut Atlas central (Maroc), *C. R. Geoscience* 334 (2002) 97–104.