



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 193–203



Géochimie / Geochemistry

Datation U–Pb : âge de mise en place du magmatisme bimodal des Jebilet centrales (chaîne Varisque, Maroc). Implications géodynamiques

U–Pb dating: emplacement age of the bimodal magmatism of central Jebilet (Variscan Belt, Morocco). Geodynamic implications

Abderrahim Essaifi ^{a,*}, Alain Potrel ^b, Ramon Capdevila ^c, Jean-Louis Lagarde ^d

^a Département de géologie, faculté des sciences Semlalia, B.P. 2390, 40000 Marrakech, Maroc

^b GEOTOP, UQAM, Montréal (Québec), H3C 3P8, Canada

^c Géosciences Rennes, UMR 6118, université de Rennes-1, campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

^d M2C, (UMR 6143 CNRS), université de Caen, 14032 Caen cedex, France

Reçu le 26 novembre 2002 ; accepté le 4 février 2003

Présenté par Zdenek Johan

Résumé

Le plutonisme bimodal des Jebilet centrales est daté à $330.5^{+0.68}_{-0.83}$ Ma par la méthode U–Pb sur zircons. Cet âge, identique à celui des plutons syntectoniques de granodiorite à cordiérite des Jebilet, date également la phase tectonométamorphique majeure locale. Le plutonisme syntectonique des Jebilet, constitué de suites tholéiitiques, alcalines et calco-alcalines peralumineuses, est très diversifié. La mise en place des magmas est favorisée par l'extension locale induite par le coulisage le long de la limite ouest des bassins carbonifères de la Meseta marocaine. Les Jebilet constituent un bon exemple d'activation de sources magmatiques multiples durant un épisode de convergence continentale et de déformation transcurrente. © 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The bimodal magmatism of central Jebilet is dated to $330.5^{+0.68}_{-0.83}$ Ma by U–Pb dating on zircons. This age, similar to that of the syntectonic Jebilet cordierite-bearing granitoids, corresponds to the age of the local major tectonometamorphic event. The syntectonic plutonism of the Jebilet massif, composed of tholeiitic, alkaline, and peraluminous calc-alkaline series, is variegated. Magmas emplacement was favoured by the local extension induced by the motion along the western boundary

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : essaifi@ucam.ac.ma (A. Essaifi).

of the Carboniferous basins of the Moroccan Meseta. The Jebilet massif exemplifies the activation of various magmas sources during an episode of continental convergence and crustal wrenching.

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Datation U–Pb ; Magmatisme bimodal ; Granitoïdes ; Varisque ; Jebilet ; Maroc

Keywords: U–Pb dating; Bimodal magmatism; Granitoids; Variscan; Jebilet; Morocco

Abridged English version

1. Introduction

In the orogenic zones, magmatic pods are good markers of the history of the lithospheric deformation. In addition to information on the various sources implicated, they are used, in combination with the study of their degree of deformation, to constrain the timing of tectonometamorphic events (e.g., [21]).

In the Jebilet Massif, Morocco, the magmatic events associated to the Variscan history are relatively complex. Two magmas types were recognized [13]: a bimodal, acid-basic plutonism, previously described as preorogenic and related to crustal extension [1, 4], and syntectonic peraluminous granodioritic plutons [16], dated to 330 Ma [22]. This classification became controversial since structural studies indicated that the bimodal magmatic pods of central Jebilet were syntectonic magmas emplaced during the synschistosity regional deformation [8,9]. To resolve this ambiguity, isotopic dating was needed. In this paper, we present the first isotopic age of the bimodal magmatism of central Jebilet, obtained by U–Pb dating on zircons, and we discuss its implication on the history of the Variscan Belt in Morocco.

2. Geological setting

Among the Hercynian massifs of the Moroccan Meseta (Fig. 1), the Jebilet massif is characterised by the presence in its central part of numerous felsic, mafic, and composite pods that constitute a bimodal association [4]. These magmatic pods intrude locally dated metapelites (Sahlefs schists) [2,31] that are temporarily attributed to Upper Visean–Namurian, by analogy with the eastern Jebilet where the Kharrouba flyschs are dated by *Posidomya becheri* Bronn and *Goniatites crenistria* Phillips to Upper Visean [13]. The spatial distribution of the bimodal plutonism is limited

(i) to the west by a NNE–SSW dextral thrust-wrench shear zone (ZCOS, Fig. 1) [17,19] separating the central Jebilet unit, a schistosed and metamorphosed block, from the western Jebilet, a weakly deformed to undeformed block (Coastal block) [4,13], and (ii) to the east by a N160 sinistral wrench shear zone (ZCM, Fig. 1) corresponding to the boundary with the eastern Jebilet [14]. Two cordierite-bearing granodioritic plutons, localised around the N160 shear zone, were dated to 330 Ma by the Rb–Sr whole rock method [22].

The acid and basic intrusions of the bimodal magmatism are sub-contemporaneous and are organised into north–south to NNE lineaments, concurrent with the Hercynian structures. They have induced a contact metamorphism that reaches the hornblende hornfels facies [10]. The basic rocks (mafic or ultramafic cumulates, gabbros, dolerites) form stratified tholeiitic intrusions [1,4], more precisely they correspond to depleted tholeiites. The acid rocks are metaluminous microgranites that present characteristics of A2 type alkaline granitoids [7,11]. The TBZ sample (Table 1), on which the U–Pb dating has been conducted, is a granophyric microgranite collected in the Koudiat Bouzlaf intrusion (Fig. 1).

3. U–Pb dating on zircons

3.1. Sample description and results

The TBZ sample contains a large amount of small (100–150 μm), euhedral, colourless and transparent zircons. The zircons always contain small inclusions of black, needle-shape minerals and numerous fluid inclusions. Their morphology is characterized by the [101] pyramidal face located at 132° of the [100] prismatic face; the contact between the two faces being a horizontal line (Fig. 2). The zircon separates are sub-divided into two groups regarding their shape ratio. Most zircons have a nearly square prismatic face (Fig. 2a), the others have a rectangular prismatic face with an L/l ratio higher than 2/1 (Fig. 2b). Three frac-

tions of the first group and one of the second group have been analysed (Table 2). The three group-1 fractions have very homogeneous chemical compositions, with U and Th contents ranging from 120 to 145 ppm and 88 to 107 ppm, respectively, the fourth fraction (group 2) displays higher U and Th contents (respectively 372 and 290 ppm), but the Th/U ratio, ranging from 0.69 to 0.78, is similar in both group 1 and 2. Two of the three analyses of group 1 (Z1 and Z3 fractions) are discordant with respectively 4 and 11.4% discordance; the third one (analysis Z2) is concordant. These three fractions define a regression line and yield a lower intercept of $330.5^{+0.68}_{-0.83}$ Ma, and a poorly defined upper intercept of 1359^{+65}_{-73} Ma with a MSWD of 0.21 (Fig. 3). The concordant analysis Z2 has a common lead content largely higher than the classical total blank and hence displays a low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio. This high common lead content is not due to contamination during chemical procedure because a two-point regression calculated with Z1 and Z3 analyses yields identical (within the range of uncertainty) intercepts at $330.4^{+1.2}_{-1.3}$ Ma and 1306^{+100}_{-97} Ma. Thus we consider that the common lead was incorporated by the minerals during the course of magma crystallization, possibly within the numerous fluid inclusions observed in the zircons, and is accurately corrected by the 330-Ma old mantle isotopic composition of Stacey and Kramers [29] two-stage evolution model. Analysis Z4 (group 2) plots below the discordia line. A regression calculated with this analysis and the concordant analysis Z2 points to a poorly defined 2.0-Ga upper intercept (Fig. 3). The fact that group-1 and -2 zircons differ by their morphology, chemistry and age of inheritance could indicate the presence of two distinct zircon populations, but as we have performed only one analysis on group-2 zircons, this hypothesis has to be ascertained by further analysis.

3.2. Interpretation

The zircons of the TBZ sample belong to the same typological group D of the classification of Pupin [27]. This kind of zircons characterize the felsic pods of central Jebilet (Fig. 4) and are typical of high-temperature (850–900 °C) sub-alkaline series [27], a conclusion in agreement with the geochemistry of the A2 type granites that are produced at high temperatures [23]. Thus we interpret these zircons as mag-

matic zircons and hence the age of $330.5^{+0.68}_{-0.83}$ Ma obtained with the three multigrain fractions of group-1 minerals as representing the emplacement age of the granite. Despite the lack of visible core or internal structure, analytical results clearly indicate that the zircons contain Pb inherited from at least two kinds of old material, at ≈ 2.0 Ga and 1.3–1.4 Ga, which probably correspond to Eburnean crust (2.0 Ga) or to a mixing between Eburnean and Panafrican crust (650 Ma). This old crust outcrops under the Palaeozoic cover in the Anti-Atlas inliers and has been recognised by gravity data under the Palaeozoic formations of the Jebilet massif [3]. The $\epsilon_{\text{Nd}(330)}$ values of the microgranites, comprised between -6.3 and -0.7 , indicate that the acid magmas of central Jebilet, derived by crustal recycling, have been contaminated or mixed with the basic magmas whose $\epsilon_{\text{Nd}(330)}$ values are comprised between $+3.3$ and $+8.7$ [11].

4. Regional interpretation of the age

The 330-Ma age of the TBZ micromineral corresponds to the emplacement age of the bimodal magmatism of central Jebilet. Several points are to be noticed.

- (1) This age is surprising because the Sarhlef schists, which are intruded by the bimodal plutonism, are classically partly attributed to the Upper Viséan, which begins at 334 ± 1 Ma [20]. Thus, the Sarhlef schists can no longer be considered as only Upper-Viséan metapelites.
- (2) This age is the same as the emplacement age of the Jebilet cordierite-bearing granodioritic plutons [22]. As both the bimodal magmatism and the granodioritic plutons are syntectonic [8,9,14, 18], 330 Ma corresponds to the age of the major tectonometamorphic event in the Jebilet massif. The age of deformation in the Jebilet is then the same as in the Azrou–Khénifra basin [5] and the Tazekka massif [28] where the synschistous metamorphism has been dated to 330 Ma by K–Ar on fine fractions [12]. The major deformation event in these regions occurred ~ 40 Ma after the major deformation in the eastern domains (Fig. 1), considered as the internal zones of the belt [12,26].
- (3) The emplacement of the felsic and mafic pods of central Jebilet occurred in a globally strike-slip

context during continental convergence [9]. The genesis of these magmas types is related to the position of central Jebilet at the intersection between the N160 sinistral shear zone and the NNE–SSW thrust-wrench zone. These two fractures are considered as the southern prolongation of the western Meseta shear zone (ZCOM, Fig. 1), which is the western boundary of the Carboniferous basins of the Moroccan Meseta [26]. The dextral slip along this structure [15,25] is accompanied in the Jebilet massif by displacement of the central Jebilet block to the south. Such a displacement induced a local extension that favoured lithospheric thinning, mantle uplift, and anatexis of various protoliths, while the region was submitted to a regional NW–SE shortening accommodated by conjugate shear zones [9].

- (4) During this process, the produced basalts emplaced at different lithospheric levels, and temperature elevation due to mantle uplift and basalt emplacement induced crustal anatexis. Crustal anatexis at high temperatures produced A2 type granitoids while at low temperatures anatexis of metasediments produced cordierite bearing granitoids.

5. Conclusion

The U–Pb dating on zircons allowed us to date for the first time the emplacement age of the bimodal magmatism of central Jebilet to $330.5^{+0.68}_{-0.83}$ Ma. This age is similar to the emplacement age of the cordierite-bearing plutons of the Jebilet massif and corresponds to the age of the major deformation event in the area. It indicates coeval emplacement of tholeiitic, alkaline, and peraluminous calc-alkaline series. Emplacement of this variegated magmatism was favoured by a local extension induced by coeval slip on regional shear zones. It indicates that the activation of various magmas sources, classical during extension postdating convergence, could be initiated during local extension contemporaneous with continental convergence.

1. Introduction

Dans les zones orogéniques, les magmas sont d'excellents marqueurs de l'histoire de la déformation

de la lithosphère. Ils renseignent sur la variété des sources impliquées et leur datation, complétée par l'étude de leur déformation, permet de contraindre l'âge des événements tectono-métamorphiques (par exemple, [21]).

Dans le massif des Jebilet, au Maroc, la signature magmatique de l'histoire varisque est relativement complexe. Deux types de magmas y ont été reconnus [13] : un plutonisme bimodal acide et basique, auparavant décrit comme préorogénique et supposé contemporain d'une extension crustale [1,4], et des granitoïdes peralumineux syntectoniques [16], datés aux environs de 330 Ma [22]. Ce schéma a été remis en cause lorsque les analyses structurales ont contesté le caractère préorogénique du magmatisme bimodal : les intrusions acides et basiques des Jebilet présentent des caractéristiques d'intrusions syntectoniques mises en place durant la déformation régionale synschisteuse [8,9]. Il devenait donc indispensable de dater ces intrusions pour lever l'ambiguïté. Dans cet article, nous présentons la première datation isotopique du magmatisme bimodal des Jebilet, obtenue par la méthode U–Pb sur zircons et nous discutons les implications de cette datation sur l'histoire de la chaîne Varisque au Maroc.

2. Cadre géologique

La Meseta marocaine est une portion de la chaîne Varisque relativement peu déformée. La déformation ductile y est concentrée dans les zones thermiquement amollies autour des granitoïdes peralumineux, dont la mise en place syntectonique est contemporaine du fonctionnement de zones de cisaillement ductiles [16].

Dans ce contexte, le massif des Jebilet se singularise par la présence, dans sa partie centrale, de nombreuses intrusions acides et basiques formant une association bimodale [4]. Les petits corps mafiques, felsiques ou mixtes, sont intrusifs dans des métapelites (schistes de Sarhlef), datées localement [2,31], et provisoirement rapportées au Viséen supérieur–Namurien, par analogie avec les Jebilet orientales, où les flyschs de Kharrouba sont datés du Viséen supérieur par *Posidomya becheri* Bronn et surtout par *Goniatites crenistria* Phillips [13].

Le magmatisme acide et basique des Jebilet centrales présente une extension spatiale limitée (*i*) à

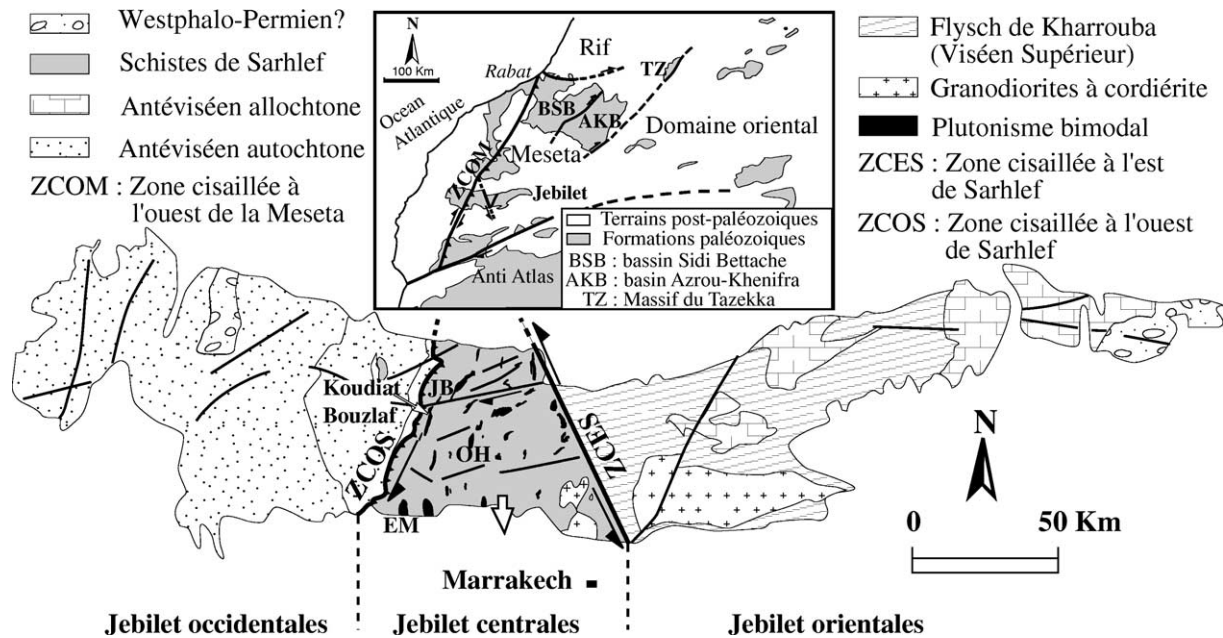


Fig. 1. Carte géologique du massif des Jebilet (modifié d'après [13]) et croquis de situation. Les mouvements le long des fractures régionales s'accompagnent d'une extension locale induite par une extrusion vers le sud du bloc des Jebilet centrales (grande flèche blanche). Intrusions **OH** (Oled Har), **Jb** (Jebel Bouzlaf), **EM** (El Mna).

Fig. 1. Geological map of the Jebilet Massif (modified from [13]). Inset shows the Palaeozoic formations in Morocco. Slip on the regional fractures is accompanied by a local extension induced by extrusion to the south of the central Jebilet block (large white arrow). **OH** (Oled Har), **Jb** (Jebel Bouzlaf), **EM** (El Mna) intrusions.

l'ouest par un contact anormal NNE–SSW (ZCOS, Fig. 1) faisant chevaucher les Jebilet centrales, bloc schistosé et métamorphisé, sur les Jebilet occidentales, bloc cambro-ordovicien peu ou pas déformé (môle côtier) [4,13] – des mouvements dextres synschisteux sont enregistrés le long de cette fracture [17,19, et observations personnelles] –, et (ii) à l'est par un décrochement ductile N160 senestre (ZCM, Fig. 1) formant la limite avec les Jebilet orientales [14], domaine des nappes gravitaires précoces [13]. Deux plutons de granodiorite à cordiérite, se mettent en place le long de ce décrochement N160 et sont datés à 330 Ma par la méthode Rb–Sr sur roche totale [22].

Les intrusions acides et basiques qui forment le plutonisme bimodal des Jebilet centrales sont sub-contemporaines. Elles se présentent sous forme de corps de quelques centaines de mètres d'épaisseur et s'organisent en linéaments sub-méridiens à NNE, parallèles aux structures hercyniennes. Elles présentent une schistosité sub-verticale et ont induit un métamorphisme de contact, qui atteint le faciès des cornéennes

à hornblende [10]. Les roches basiques (cumulats mafiques ou ultramafiques, gabbros, dolérites) forment des intrusions stratifiées et appartiennent à une suite tholéiitique [1,4] appauvrie. Les roches acides sont des microgranites métalumineux à l'origine, avant altération hydrothermale, qui présentent des caractéristiques des granites de type A : ils renferment de la biotite ferrière, de l'hastingsite et de la fluorine, leurs rapports Fe/Mg et Ga/Al sont élevés et leurs concentrations en Mg et souvent en Ca sont basses. Dans les diagrammes de discrimination de Pearce et al. [24] ou de Whalen et al. [30], ils se projettent dans les champs des granites de type A. Plus précisément, ils correspondent aux granites de type A2 de Eby (1992) [6,7,11]. L'échantillon TBZ sur lequel la datation a été effectuée est un microgranite granophyrique collecté dans l'intrusion de Koudiat Bouzlaf (Fig. 1). Sa composition chimique est représentative du pôle acide peu altéré du magmatisme bimodal des Jebilet centrales (Tableau 1).

Tableau 1
Analyse chimique du microgranite TBZ

Table 1
Bulk-rock chemical composition of the TBZ microgranite

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total			
(%)	74,40	12,33	4,18	0,03	0,15	1,13	3,94	2,27	0,25	0,04	0,70	99,42			
(ppm)	Zr	Y	Sr	Rb	Co	V	Ni	Cr	Ba	Ga	Cu	Zn	Th	Pb	
	335	106	126	86	9	0	04	7	524	21	0,5	33	30	2	

*: Fe total.

*: total Fe.

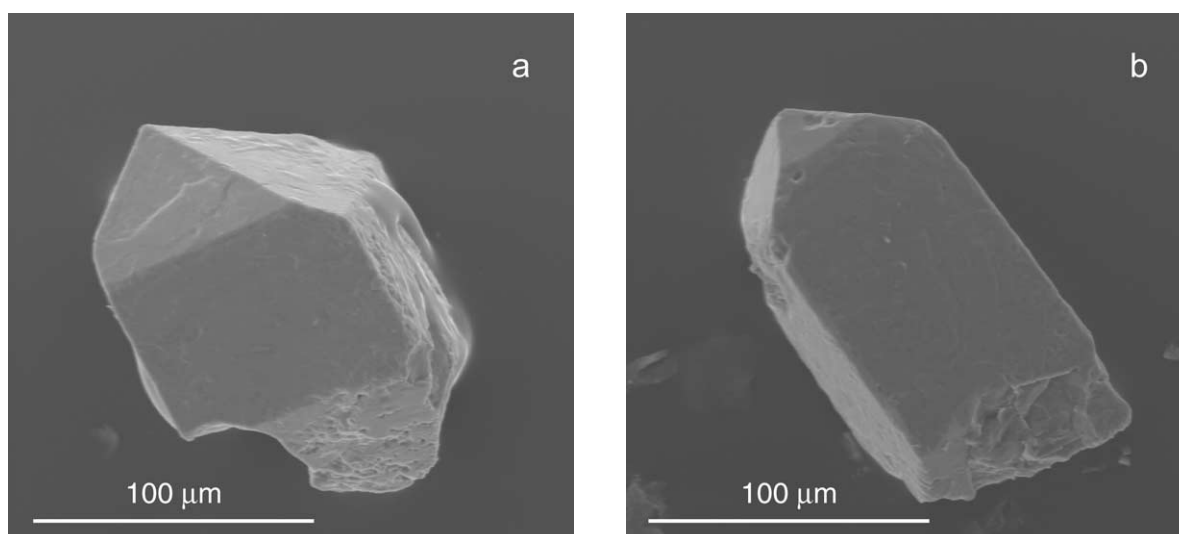


Fig. 2. Microphotographies MEB des zircons de l'échantillon TBZ. (a) Zircon du groupe 1, caractérisé par une face prismatique [100] carrée. (b) Fragment de zircon du groupe 2, caractérisé par une face prismatique [100] rectangulaire.

Fig. 2. SEM photomicrographs of sample TBZ zircons. (a) Individual zircon from the group-1 population, characterized by a square [100] prismatic face. (b) Individual zircon fragment from group-2 population, characterized by a rectangular [100] prismatic face.

3. Datation U–Pb sur zircons

3.1. Description de l'échantillon et résultats

L'échantillon TBZ contient une grande quantité de zircons automorphes, incolores et limpides. Les zircons sont de petite taille (100–150 µm) et contiennent souvent de petites inclusions de minéraux en aiguille et de nombreuses inclusions fluides. La morphologie des zircons se caractérise par la position de la face pyramidale [101], située à 132° de la face prismatique [100], le contact entre les deux faces étant une ligne horizontale (Fig. 2). Les zircons séparés sont subdivi-

sés en deux groupes, selon leur rapport de forme. Le premier groupe contient la plupart des zircons et se caractérise par une face prismatique [100] presque carrée (Fig. 2a). Dans le second groupe, les zircons ont une face prismatique [100] rectangulaire, avec un rapport longueur/largeur supérieur à 2/1 (Fig. 2b). Trois fractions du premier groupe et une du second groupe ont été analysées (Tableau 2). Les trois fractions du premier groupe ont des compositions chimiques très homogènes avec des teneurs en U et Th allant de 120 à 145 ppm et de 88 à 107 ppm, respectivement. La quatrième fraction (groupe 2) montre des teneurs en U et Th plus élevées (respectivement 372 et 290 ppm), mais

Tableau 2

Données analytiques U–Pb de l'échantillon TBZ

Table 2

Sample TBZ U–Pb analytical results

Analyses [§]	Groupe	Poids (µg)	Concentration (ppm)			Th/U	Pb _c (pg)	Rapports atomiques				Âges apparents (Ma)			% Disc.
			Pb [*]	U	Th ²			²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^m	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ^c	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ^c	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^c	206/238	207/235	207/206	
Z ₁ (12)	1	33	8,12	140	96	0,69	4	3519	0,3912 ± 0,17	0,0531 ± 0,14	0,05343 ± 0,09	333,5	335,3	347,1	4,00
Z ₂ (14)	1	24	7,00	120	88	0,74	50	211	0,3846 ± 0,39	0,0526 ± 0,16	0,05304 ± 0,34	330,4	330,5	330,6	0,05
Z ₃ (15)	1	26	8,72	145	107	0,73	7	1870	0,4060 ± 0,30	0,0542 ± 0,24	0,05429 ± 0,24	340,5	346,0	383,2	11,4
Z ₄ (15)	2	31	22,2	372	290	0,78	12	3360	0,3947 ± 0,15	0,0531 ± 0,15	0,05387 ± 0,11	333,8	337,8	365,8	8,99

Analyses[§]: le nombre entre parenthèses indique le nombre de grains de zircon contenus dans la fraction analysée.

Pb^{*}: concentration en Pb radiogénique corrigé pour le *spike*, le fractionnement et le Pb commun.

Th²: concentration en Th calculée avec le rapport isotopique ²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb.

Pb_c: Pb commun total présent dans l'analyse corrigé pour le plomb commun dans le *spike*.

Les rapports isotopiques^m sont corrigés uniquement pour le fractionnement.

Les rapports isotopiques^c sont corrigés pour le *spike*, le fractionnement, le blanc et le Pb commun initial.

La composition isotopique initiale du Pb commun a été calculée en utilisant le modèle d'évolution à deux stades du manteau [28].

Incertitudes données en % à 1σ.

Analyses[§]: number in brackets refers to the number of individual grains used in the multigrain analysis.

Pb^{*}: radiogenic Pb concentration corrected for spike, fractionation and common Pb.

Th²: Th concentration calculated with ²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb isotopic ratio.

Pb_c total common Pb present in the analysis corrected for common Pb in spike.

Isotopic ratios^m are corrected for fractionation only.

Isotopic ratios^c are corrected for spike, fractionation, blank and initial common Pb.

The initial isotopic composition of common Pb was calculated using the two-stage mantle evolution model [28].

Errors are quoted in % at 1σ confidence level.

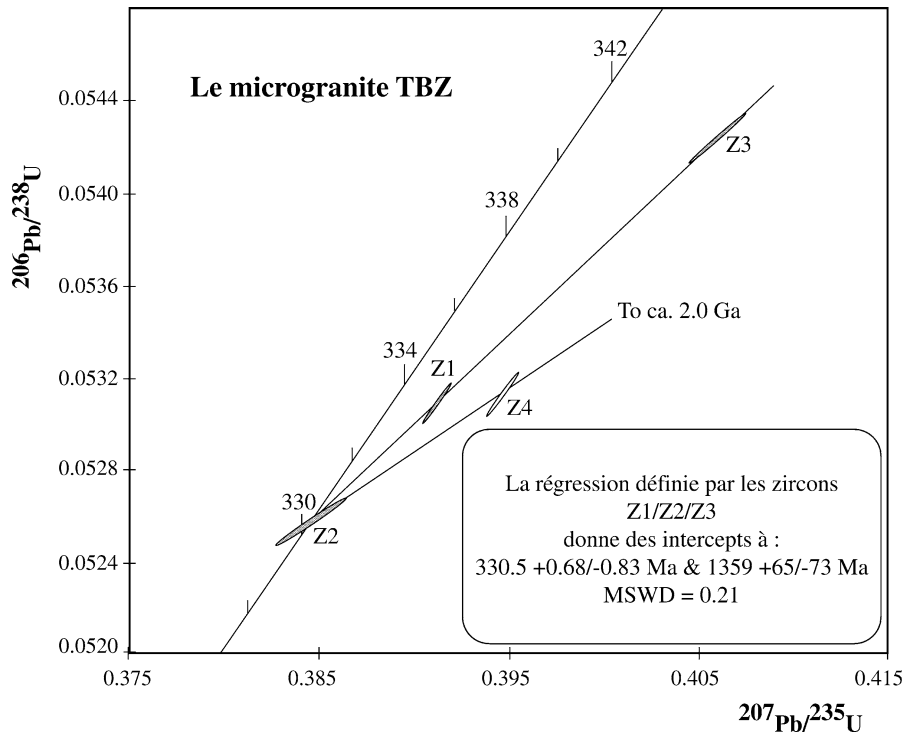


Fig. 3. Diagramme Concordia pour les données U–Pb du microgranite TBZ.

Fig. 3. Concordia diagram for the U–Pb data of the TBZ microgranitic sample.

le rapport Th/U, compris entre 0,69 et 0,78, est similaire dans les deux groupes. Deux des trois analyses du groupe 1 (fractions Z1 et Z3) sont discordantes, avec respectivement 4 et 11,4 % de discordance. La troisième analyse (fraction Z2) est concordante (Tableau 2). Ces trois fractions définissent une régression avec un intercept bas à $330,5^{+0,68}_{-0,83}$ Ma et un intercept haut moins bien défini à 1359^{+65}_{-73} Ma avec un MSWD de 0,21 (Fig. 3). La fraction concordante Z2 a une teneur en Pb commun largement supérieure à celle du blanc total classique et par conséquent un faible rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Cette teneur élevée en Pb commun ne peut pas être due à une contamination durant la procédure chimique puisque d'une part la régression calculée à partir des analyses Z1 et Z3 donne, dans l'intervalle d'incertitude, des intercepts identiques à $330,4^{+1,2}_{-1,3}$ Ma et 1306^{+100}_{-97} Ma et, d'autre part, elle est corrigée avec précision par la composition isotopique du manteau à 330 Ma du modèle d'évolution à deux stades de Stacey et Kramers [29]. Par consé-

quent, nous considérons que le Pb commun a été incorporé dans les minéraux au cours de la cristallisation, probablement piégé dans les nombreuses inclusions fluides observées dans les zircons. L'analyse Z4 (groupe 2) se projette en dessous de la Discordia. Une régression calculée avec cette analyse et l'analyse concordante montre un intercept haut mal défini à 2,0 Ga (Fig. 3).

3.2. Interprétation

La granulométrie assez homogène des zircons de l'échantillon TBZ n'a probablement pas d'effet sur les âges obtenus. Leur morphologie, également homogène, les classe dans le même groupe typologique D de la classification de Pupin [27]. Ce type de zircons, caractéristique des corps acides des Jebilet centrales (Fig. 4), est typique des séries subalcalines de haute température (850–900 °C) [27], une conclusion en accord avec la géochimie des gra-

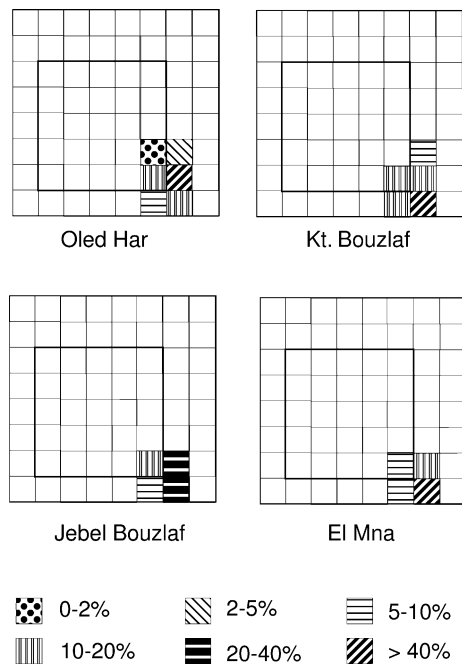


Fig. 4. Distributions typologiques des populations de zircon des microgranites du plutonisme bimodal des Jebilet centrales (pour la localisation des intrusions, voir Fig. 1).

Fig. 4. Typological distributions of zircon populations of the central Jebilet bimodal plutonism microgranites (for location of the intrusions, see Fig. 1).

nites de type A2, qui se forment à relativement basse pression, mais à très haute température (~ 1000 °C, 0,3 GPa) [23]. Par conséquent, on interprète ces zircons comme des zircons d'origine magmatique et l'âge de $330,5^{+0,68}_{-0,83}$ Ma obtenu avec les trois fractions multigrains du groupe 1 comme représentant l'âge de mise en place du granite. Malgré l'absence dans les zircons de cœur visible ou de structure interne, les résultats analytiques indiquent clairement que les zircons contiennent du Pb hérité d'au moins deux types de matériaux anciens, d'âges $\sim 2,0$ et $1,3-1,4$ Ga, et qui correspondent probablement à la croûte éburnéenne (2,0 Ga) ou à un mélange entre croûtes éburnéenne et panafricaine (650 Ma). Cette croûte ancienne affleure sous la couverture paléozoïque dans les boutonnières de l'Anti-Atlas et a été reconnue par gravimétrie sous le paléozoïque des Jebilet [3]. Les valeurs $\varepsilon_{Nd(330)}$ des microgranites du magmatisme bimodal, comprises entre $-6,3$ et $-0,7$, montrent que les magmas acides des Jebilet centrales, dérivés d'un

recyclage de la croûte, ont subi une contamination ou un mélange avec les magmas basiques dont les valeurs $\varepsilon_{Nd(330)}$ sont comprises entre $+3,3$ et $+8,7$ [11]. Le fait que les groupes 1 et 2 diffèrent par leur morphologie, leur chimisme et l'âge de l'héritage pourrait indiquer la présence de deux populations distinctes de zircons. Cependant, nous n'avons effectué qu'une seule analyse sur les zircons du groupe 2; cette hypothèse devrait être testée par d'autres analyses.

4. Interprétation régionale de la datation

L'âge à 330 Ma obtenu sur l'échantillon TBZ date la mise en place du microgranite, et par là-même celle du plutonisme bimodal des Jebilet centrales. Plusieurs points sont à noter.

- (1) Le résultat de la datation est un peu surprenant, compte tenu des âges stratigraphiques habituellement attribués aux schistes de Sarhlef, dans lesquels se mettent en place les magmas acides et basiques. Ces schistes des Jebilet centrales ne peuvent plus être attribués uniquement au Viséen supérieur qui débute à 334 ± 1 Ma [20] et ils ne sont donc pas tous l'équivalent latéral des flyschs des Jebilet orientales datés du Viséen supérieur. Ceci ne fait que confirmer les études tectoniques qui ont montré l'existence d'une discontinuité structurale importante entre les Jebilet orientales et centrales [14].
- (2) Les magmas datés présentent des caractéristiques structurales de granites syntectoniques [8,9,18]; de ce fait, l'âge à 330 Ma date également la phase tectono-métamorphique majeure dans le massif des Jebilet. Ce résultat est en conformité avec l'âge Rb–Sr obtenu lors de l'étude des granodiorites à cordiérite [22]. Par ailleurs, l'âge de la déformation dans le massif des Jebilet est compatible avec celui obtenu dans d'autres secteurs de la Meseta marocaine, notamment le bassin d'Azrou–Khénifra [5] et le massif de Tazekka [28]. Dans ces deux régions, le métamorphisme synschisteux a en effet été daté à 330 Ma par la méthode K–Ar sur les fractions fines des schistes [12]. La phase majeure dans ces trois régions s'est donc produite environ 40 Ma après la phase tectonique majeure

dans les domaines orientaux (Fig. 1), ou zones internes de la chaîne [12,26].

- (3) Au plan de l'histoire de la chaîne Varisque dans cette région, les corps magmatiques acides et basiques des Jebilet centrales traduisent la fusion de sources multiples, crustales et mantelliques, avec une mise en place lors d'une convergence continentale, dans un contexte globalement décrochant [9]. Pour expliquer la présence de ce type de magmas dans des zones de convergence continentale, on doit prendre en compte leur localisation particulière, à l'intersection entre les cisaillements N160 senestre, limite entre Jebilet centrales et orientales, et le décro-chevauchement dextre NNE–SSW, limite entre Jebilet centrales et occidentales. Ces deux fractures sont considérées comme le prolongement méridional de la zone de cisaillement ouest Mesetienne [26], discontinuité d'échelle lithosphérique qu'est la limite ouest des bassins carbonifères de la Meseta marocaine (ZCOM, Fig. 1). Le coulissage dextre le long de cette limite [15,25] s'accompagne au niveau des Jebilet, d'un déplacement vers le sud du bloc central. Un tel déplacement implique une extension locale qui a pu conduire à un amincissement lithosphérique ayant permis une remontée mantellique. Lors de cette remontée, le manteau a subi une fusion partielle et des liquides basaltiques ont pu se mettre en place dans la croûte continentale, y compris dans la partie supérieure, à un moment où la région subissait un raccourcissement régional NW–SE accommodé par des zones de cisaillement ductile conjuguées [9].
- (4) Sur le plan pétrologique, dans ce processus, le gros des liquides est injecté à divers niveaux de la lithosphère. L'élévation de température due à la remontée mantellique et aux basaltes induit la fusion crustale. La fusion crustale à très haute température fournit les granites A2. À plus basse température, l'anatexis des métasédiments produit des granites à cordiérite. Lors de cette évolution, des contaminations/mélanges existent entre les liquides mantelliques et crustaux et seraient à l'origine de la grande variabilité des rapports isotopiques initiaux ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i des granodiorites à cordiérite (0,704–0,712) [22] et des valeurs $\varepsilon_{\text{Nd}}(330)$ des microgranites du magmatisme bimodal [11].

5. Conclusion

Après plusieurs tentatives de datation du magmatisme bimodal des Jebilet centrales, (i) par la méthode Rb–Sr sur roche totale, avortée à cause de la mobilité de ces deux éléments au cours de l'altération hydrothermale induite par la mise en place des intrusions [7,11], et (ii) par la méthode d'évaporation du Pb sur monozircon, avortée à cause de la faible teneur en U des zircons, un âge isotopique est obtenu grâce à la méthode classique U–Pb sur zircons. L'âge obtenu, $330,5^{+0,68}_{-0,83}$ Ma, date pour la première fois la mise en place du magmatisme bimodal des Jebilet centrales. Cet âge est identique à celui obtenu pour les plutons de granodiorites à cordiérite et correspond à l'âge de la phase tectono-métamorphique majeure dans le massif des Jebilet. Il indique que l'activation de sources multiples, classique en contexte d'extension post convergence, pourrait s'initier lors d'une extension locale contemporaine de la convergence continentale.

Remerciement

Nous remercions J.-J. Peucat et B. Griffiths pour leurs essais de datations préliminaires, respectivement par les méthodes évaporation du Pb sur monozircon et Rb–Sr sur roche totale.

Références

- [1] E.M. Aarab, J. Beauchamp, Le magmatisme carbonifère pré-orogénique des Jebilet centrales (Maroc). Précisions pétrographiques et sédimentaires. Implications géodynamiques, C. R. Acad. Sci. Paris 304 (1987) 169–174.
- [2] J. Beauchamp, M. Essemami, M. Nouidar, Mouvements gravitaires et remplissage d'un bassin marin : le Viséen supérieur des Jebilet (Maroc), Sci. Géol. Mém. Strasbourg 83 (1989) 57–76.
- [3] C. Bernardin, Interprétation gravimétrique et structure profonde de la Meseta marocaine et de sa marge atlantique, thèse, Marseille, 1988.
- [4] M. Bordonaro, Tectonique et pétrographie du district à pyrrhotine de Kettara (Paléozoïque des Jebilet, Maroc), thèse 3^e cycle, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1983.
- [5] M. Bouabdelli, A. Piqué, Du bassin sur décrochement au bassin d'avant-pays : dynamique du bassin d'Azrou-Khénifra (Maroc hercynien central), J. Afr. Earth Sci. 23 (1996) 213–224.

- [6] N.G. Eby, Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications, *Geology* 20 (1992) 641–644.
- [7] A. Essaïfi, Relations entre magmatisme-déformation et altération hydrothermale : l'exemple des Jebilet centrales (Hercynien, Maroc), *Mém. Géosci. Rennes* 66 (1995).
- [8] A. Essaïfi, J.-L. Lagarde, Reconnaissance de corps granitiques syntectoniques dans les séries magmatiques « préorogéniques » des Jebilet centrales (Hercynien, Maroc). Implications géodynamiques, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 310 (1990) 67–73.
- [9] A. Essaïfi, J.-L. Lagarde, R. Capdevila, Deformation and displacement from shear zone patterns in the Variscan upper crust, Jebilet, Morocco, *J. Afr. Earth Sci.* 32 (2001) 335–350.
- [10] A. Essaïfi, M. Ballèvre, C. Marignac, R. Capdevila, Découverte et signification d'une paragenèse à ilménite zincifère dans les métapélites des Jebilet centrales (Maroc), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 333 (2001) 381–388.
- [11] A. Essaïfi, R. Capdevila, J.-L. Lagarde, Metasomatic trondhjemites and tonalites: examples in central Jebilet (Hercynian, Morocco), *J. Afr. Earth Sci.* (soumis).
- [12] S. Huon, A. Piqué, N. Clauer, Étude de l'orogénèse hercynienne au Maroc par la datation K–Ar de l'évolution métamorphique des schistes ardoisiers, *Sci. Géol. Bull. Strasbourg* 40 (1988) 273–284.
- [13] P. Huvelin, Étude géologique et gîtologique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental), in : *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 232bis, 1977.
- [14] J.-L. Lagarde, P. Choukroune, Cisaillement ductile et granitoïdes syntectoniques : l'exemple du massif hercynien des Jebilet (Maroc), *Bull. Soc. géol. France* XXIV (2) (1982) 299–307.
- [15] J.-L. Lagarde, A. Michard, Stretching normal to the regional thrust displacement in a thrust-wrench shear zone, Rehamna Massif, Morocco, *J. Struct. Geol.* 8 (1986) 483–492.
- [16] J.-L. Lagarde, S. Aït Omar, B. Roddaz, Structural characteristics of syntectonic plutons with special reference to Late Carboniferous plutons from Morocco, *J. Struct. Geol.* 12 (1990) 805–821.
- [17] C. Le Corre, J. Bouloton, Un modèle de « structure en fleur » associant décrochement et convergence : les Jebilet centro-occidentales (Maroc hercynien), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 304 (1987) 751–755.
- [18] C. Le Corre, A. Saquaque, Comportement d'un système pluton-encaissant dans un champ de déformation régional : le granite de Bramram (Jebilet, Maroc hercynien), *Bull. Soc. géol. France* III (4) (1987) 665–673.
- [19] S. Mayol, Géologie de la partie occidentale de la boutonnière paléozoïque des Jebilet, Maroc, in : *Travaux des laboratoires des Sciences de la Terre, Marseille, Série B*, 1987.
- [20] W.S. McKerrow, C.R. Van Staal, The Palaeozoic time scale reviewed, in : W. Franke, V. Haak, O. Oncken, D. Tanner (Eds.), *Orogenic processes: quantification and modelling in the Variscan Belt*, *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 19 (2000) 5–8.
- [21] B.V. Miller, S.D. Samson, R.S. D'Lemos, Time span of plutonism, fabric development, and cooling in Neoproterozoic magmatic arc segment: U–Pb age constraints from syntectonic plutons, Sark, Channel Islands, UK, *Tectonophysics* 312 (1999) 79–95.
- [22] Z. Mrini, A. Rafi, J.-L. Duthou, P. Vidal, Chronologie Rb–Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc : conséquences, *Bull. Soc. géol. France* 163 (1992) 281–291.
- [23] A. Patiño Douce, T.C. McCarthy, Melting of crustal rocks during continental collision and Subduction, in : B.R. Hacker, J.G. Liou (Eds.), *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*, Kluwer Academic Publishers, 1998, pp. 27–55.
- [24] J.A. Pearce, N.B.W. Harris, A.G. Tindle, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks, *J. Petrol.* 25 (1984) 923–956.
- [25] A. Piqué, D. Jeannette, A. Michard, The Western Meseta Shear Zone, a major and permanent feature of the Hercynian belt of Morocco, *J. Struct. Geol.* 2 (1980) 55–61.
- [26] A. Piqué, J.J. Cornée, J. Muller, J. Roussel, The Moroccan Hercynides, in : R. Dallmeyer, J.-P. Lécorsché (Eds.), *The west-african orogens and circum-Atlantic correlatives*, Springer-Verlag, 1991, pp. 229–263.
- [27] J.-P. Pupin, Zircon and granite petrology, *Contrib. Mineral. Petrol.* 73 (1980) 207–220.
- [28] R. Rauscher, M.R. Marhoumi, M. Vanguetaine, C. Hoepffner, Datation palynologique des schistes de Tazekka au Maroc. Hypothèse structurale sur le socle hercynien de la Meseta orientale, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 294 (1982) 1203–1206.
- [29] J.R. Stacey, J.D. Kramers, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, *Earth Planet. Sci. Lett.* 26 (1975) 207–221.
- [30] J.B. Whalen, L. Kenneth, B.W. Chappel, A-type granites/geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis, *Contrib. Mineral. Petrol.* 95 (1987) 407–419.
- [31] M. Zaim, Étude pétrographique, structurale et métamorphique du dôme thermique de Mirouga (Jebilet centrales, Maroc hercynien), thèse 3^e cycle, Marrakech, Maroc, 1990.