

Géophysique interne

Modélisation magnétique de la suture ophiolitique de Bou Azzer–El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Implications sur la reconstitution géodynamique panafricaine

Abderrahmane Soulaïmani ^{a,*}, Mohammed Jaffal ^b, Lhou Maacha ^c, Azzouz Kchikach ^b, Abdessamad Najine ^d, Abdellatif Saidi ^b

^a *Faculté des sciences Semlalia, université Cadi-Ayyad, BP 2390, Marrakech, Maroc*

^b *Faculté des sciences et techniques, université Cadi-Ayyad, BP 549, Marrakech, Maroc*

^c *Reminex, Managem, Groupe ONA, 52, av. Hassan-II, Casablanca, Maroc*

^d *Faculté des sciences et techniques, université Cadi-Ayyad, Béni-Méllal, Maroc*

Reçu le 5 janvier 2004 ; accepté après révision le 20 septembre 2005

Disponible sur Internet le 20 décembre 2005

Présenté par Jean-Paul Poirier

Résumé

Les roches ophiolitiques de l'Anti-Atlas central sont responsables d'une importante anomalie magnétique qui longe « l'Accident majeur de l'Anti-Atlas ». La modélisation magnétique de l'ophiolite de Bou Azzer–El Graara montre son enracinement au sein de la partie supérieure de la croûte continentale et son pendage orienté vers le nord. Ces résultats corroborent les modèles géodynamiques en faveur d'une subduction vers le nord de la croûte océanique néoproterozoïque précédant la collision panafricaine. La polarité de la subduction panafricaine dans l'Anti-Atlas est ainsi conforme avec celles des autres domaines orogéniques panafricains, où les plans de subduction contourment et pendent de façon divergente par rapport au craton Ouest-Africain lors de l'assemblage du Gondwana occidental au Néoproterozoïque. *Pour citer cet article : A. Soulaïmani et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Magnetic modelling of the Bou Azzer–El Graara ophiolite (central Anti-Atlas, Morocco). Geodynamic implications of the Panafrican reconstruction. Aeromagnetic data of the Anti-Atlas Mountains show an important magnetic anomaly along the 'Major Anti-Atlas Fault', produced by different mafic and ultramafic rocks of a Neoproterozoic ophiolite complex. The magnetic modelling of Bou Azzer–El Graara ophiolitic suture shows a deep-seated anomaly through the upper continental crust corresponding to a north-dipping subduction. The polarity of the Pan-African subduction in the Anti-Atlas is therefore compatible with the contemporaneous Pan-African orogenic belts, where polarity of subduction dipped away from the West African Craton during the amalgamation of Western Gondwana. *To cite this article: A. Soulaïmani et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Modélisation ; Magnétisme ; Ophiolites ; Panafricain ; Anti-Atlas ; Maroc

Keywords : Modelling ; Magnetism ; Ophiolites ; Pan-African ; Anti-Atlas ; Morocco

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : soulaimani@ucam.ac.ma (A. Soulaïmani).

Abridged English version

1. Introduction

The West African region is almost totally constituted by a vast Precambrian shield stable since 2 Gyr [22]: the West African craton. At its northern margin, in the Moroccan Anti-Atlas mountains (Fig. 1A), the Precambrian basement is exposed in several erosional inliers [7] (Fig. 1B). There, the old rocks are unconformably covered by weakly deformed Late Proterozoic and Palaeozoic formations. The oldest Precambrian rocks (P1) consist of ~2-Ga gneisses and granites [2,3, 11,19,27–29]. The unconformable Neoproterozoic series consists of shelf quartzites and carbonates, which grade laterally to ophiolitic sequences, were deformed during the Pan-African cycle [13,16,24]. The Late Neoproterozoic cover is volcanic, volcanoclastic and clastic (Saghro group (PII3) and Ouarzazate group (PIII)), and evolves progressively upward to Cambrian marine sedimentary sequences.

The Anti-Atlas belt is cut by a major WNW–ESE shear zone ‘Major Anti-Atlas Fault’ (MAAF) [6], which extends from the southern side of the Sirwa Massif to Zagora and define two major structural areas:

- the southwestern unit, consisting of (i) a Precambrian cratonic basement deformed and metamorphosed during the Eburnean orogeny [2,3,11,19,24, 25]; (ii) a Neoproterozoic cover deformed by the Pan-African orogeny at about 680–580 Ma [4,10, 14,17];
- the northeastern unit, corresponding to the ‘Pan-African Anti-Atlas mobile zone’, which is interpreted as a volcanic arc, with intra-arc or back-arc basin built on an oceanic crust [24], or an area underlain by a cratonic basement [9].

An ophiolitic complex separates the two domains [16]. In the Bou Azzer–El Graara inlier, an oblique collision occurred between the fore-arc terrains and the volcanic arc [1,24]. Following the same pattern, the intra-oceanic island arc is thrust southward over the cratonic margin in the Sirwa Massif [25].

After the Pan-African ophiolite complex zone has been discovered in the Anti-Atlas, [16,25], the polarity of the former subduction has been and is still strongly debated. Some consider that the subduction was dipping towards the south [16–18,25], whereas others think it was dipping to the north [12,20,24]. Moreover, it has been suggested that the MAAF is nothing but an intracratonic aulacogen and thus much of the Anti-Atlas belt is underlain by Eburnian basement. The northwest-

ern edge of the West African craton being rather represented by the ‘South Atlas fault’ than the ‘MAAF’ [9].

The purpose of the present study is to model the geometry of the Anti-Atlas Pan-African ophiolitic complex using aeromagnetic data in order to discriminate between these different hypotheses.

2. Geological setting

The Bou Azzer–El Graara area corresponds to an eroded NW–SE Variscan anticline going along the ‘MAAF’ [6] (Fig. 1C). The main part of its Proterozoic basement is a Pan-African dismembered incomplete ophiolitic sequence and arc fragments [1,13,18,24,28]. It is unconformably overlain by a Neoproterozoic to Cambrian thick volcano-sedimentary cover (Tiddiline, Ouarzazate, and Tata Groups).

The 15-km-long and 4-km-wide ophiolitic rocks comprise dismembered tectonic slices of mafic and ultramafic rocks in a serpentine-rich matrix between the accretionary melange to the south and a forearc basin assemblage to the north [24]. The (Rb/Sr) age of 788 ± 10 Ma attributed to the Anti-Atlas ophiolite [5] was recently clarified at 762 ± 1 Ma, U/Pb from zircon age dating of the emplacement of Tasriwine plagiogranite associated to the Sirwa ophiolite [23]. Diorite quartz and diorite plutons and diabase dikes intruded these sequences. All these units were heterogeneously deformed and metamorphosed in a greenschist to amphibolite facies. Kinematic indicators display a dominant southward-vergent thrust movement [1,24].

The Bou Azzer–El Graara ophiolite was emplaced in an accretionary melange prior to 650 ± 2 Ma, age of the cross-cutting Ait Ahmane quartz diorite [23]. The Late Orogenic Bleida granodiorite, dated at 615 ± 12 Ma [8], and 579 ± 1.2 Ma [15], clearly cuts the ophiolite.

The final suturing of the West African craton (~615–565) to the Saghro arc produced sinistral oblique north dipping faults and the development of syntectonic molassic basins [12].

In spite of the incomplete ophiolitic suite, it is widely accepted that these rocks are representative of an oceanic lithosphere obducted during the Pan-African collision. The presence of high-pressure/weak-temperature rocks in this melange represented by the blueschist-bearing [14], confirms the occurrence of a palaeo-subduction along the ‘MAAF’ during Pan-African times.

3. Magnetic study

3.1. Aeromagnetic data

The data used in this study were collected by the company ‘Hunting Geology and Geophysics Ltd

(1976)' company on behalf of the Moroccan energy and mines ministry. The aeromagnetic survey was flown at 2600 m above the sea level along north–south-oriented lines with 4-km spacing. The diurnal magnetic variations and the international geomagnetic reference field (IGRF) were removed from the measured total magnetic field. This leads to the establishment of the residual magnetic map of the Anti-Atlas (Fig. 2A), which is based on a large number of measurement points (Fig. 2C).

3.2. Qualitative interpretation

The qualitative analysis of the residual magnetic field data shows that an important negative anomaly is associated to the Pan-African ophiolites along the 'MAAF' axis (A–A' in Fig. 2A). Taking into account the latitude of the studied area (where the inclination of the Earth magnetic field is about 45°), and the lack of remnant magnetization demonstrated by a study by the Russian Technoexport Company [21], we can conclude that the magnetic body corresponding to the Anti-Atlas ophiolites is dipping northward. After reduction to the pole of the data, the ophiolitic body anomaly becomes strongly asymmetric (Fig. 2B and D); it displays a large low (negative) anomaly south of the maximum (positive), which indicates a northward-dipping source and confirms the previous conclusion.

3.3. Quantitative interpretation

3.3.1. The magnetic susceptibility. The values of the magnetic susceptibility used in the present work were taken from the results of the physical properties of rocks study undertaken in the Bou Azzer inlier by the Technoexport Russian Company [21]. These measurements were made on samples taken both from the surface and from mining galleries or boreholes. The analysis of available data suggests that the average values are ranging between 0.006 for the ophiolites and 0.00025 for the surrounding rocks (CGS units) (Table 1).

3.3.2. Modelling of magnetic anomalies. The magnetic modelling of the Anti-Atlas Pan-African ophiolite has been calculated along north–south profiles, selected among the lines of the aeromagnetic survey. Lines 22, 25, 28, and 30 have been chosen across the Bou Azzer–El Graara inlier. On both sides of this inlier, we also selected profiles (10 and 40) that pass respectively through the Sirwa Massif and between the Bleida and Zagora localities. The modelling was carried out on total magnetic field anomalies using an inverse methodology. The starting model was built according to known geometrical field parameters.

All the magnetic models show that the ophiolites of the Anti-Atlas studied zone are dipping north (Fig. 2E), which suggests a northward Neoproterozoic subduction.

4. Conclusions

From the magnetic modelling of Bou Azzer–El Graara ophiolitic complex, several points could be noticed:

- (i) the magnetic anomaly produced by the different mafic and ultramafic rocks of the ophiolitic complex displays a perfect continuity along the 'MAAF'. These anomalies are deep-seated through the upper continental crust;
- (ii) magnetic modelling of ophiolitic suture of Bou Azzer shows the north-dipping of the central Anti-Atlas magnetic anomaly.

However, while the ophiolitic (and thus oceanic) nature of the analysed rocks is widely accepted, consequences of their geometry could be interpreted in two concurrent ways:

- (i) they are 'autochthonous' and located between the continental crust to the southwest and a complex arc complex to the northeast. In other words, they follow and indicate the Pan-African subduction plane;
- (ii) they are allochthonous slices transported from the true suture, located farther north or northeast.

The second hypothesis, compatible with a recent proposition [9], according to which the Pan-African suture would be located along the southern limit of the present Atlasic chain, asks at least two questions. The first looks for geophysical studies demonstrating such a 'South-Atlasic Pan-African suture'. The second looks for the demonstration of Pan-African regional thrusts, able to carry oceanic rocks over distances of several tens of kilometres, from the South-Atlasic to the Bou Azzer–El Graara zone. As long as these geophysical and structural arguments are not presented, we suggest to accept the first hypothesis, and to consider that the Bou Azzer–El Graara ophiolitic complex, whose geometry is demonstrated above, represents the former Pan-African north-dipping subduction plane, corroborating previous geological models [12,20,24,27,28]. Note, finally, that this polarity of the Pan-African subduction in the Anti-Atlas is compatible with contemporaneous Pan-African orogenic belts, where polarity of subduction dipped away from the West African craton during the amalgamation of western Gondwana.

1. Introduction

Le craton Ouest-Africain, substratum des provinces méridionales du Maroc, est stable depuis 2 Ga [22]. Sur sa bordure septentrionale (Fig. 1A), au sud du Haut Atlas, la chaîne de l'Anti-Atlas montre une succession de boutonnières (Fig. 1B), oùaffleure le socle protérozoïque sous une couverture volcano-clastique finiprécambrienne, puis sédimentaire paléozoïque [7].

Une importante fracture NW–SE, connue sous le nom d'« accident majeur de l'Anti-Atlas » (AMAA) [6], s'étend depuis le Sud du massif de Sirwa, au nord, jusqu'à Zagora, au sud. Elle sépare l'Anti-Atlas en deux domaines (Fig. 1B) :

- un domaine sud-occidental, caractérisé par : (i) un substratum cratonique, où les traces de l'orogénèse éburnéenne (environ 2 Ga) sont reconnues [3,7,10] et ont été récemment confirmées [2,11,19,27–29] ; (ii) une couverture néoprotérozoïque déformée de façon hétérogène lors de l'orogénèse panafricaine, à environ 685 Ma [5], suivie d'une importante activité plutonique et volcanique aux alentours de 600 à 570 Ma [2,11,19,27–29], contemporaine d'une phase d'extension crustale [25] ;
- un domaine nord-oriental, ou « zone panafricaine mobile de l'Anti-Atlas », dont l'interprétation est actuellement débattue. Considéré comme un arc volcanique complexe, dont la structuration résulte de la migration d'arcs magmatiques et de bassins d'arrière-arc, édifiés sur une lithosphère océanique

[24], le substratum de ce domaine serait, en revanche, comme le reste de l'Anti-Atlas, de nature cratonique [9].

Au cours du Néoprotérozoïque, la collision panafricaine entre la marge nord disloquée du craton Ouest-Africain et l'arc volcanique de Saghro s'est effectuée dans un régime décro-chevauchant senestre [24]. L'ensemble des unités est charrié vers le sud sur la marge septentrionale du craton, tout comme l'obduction de vestiges de croûte océanique qui jalonnent l'« AMAA » et affleurent particulièrement dans le massif de Sirwa [25] et à Bou Azzer–El Graara [1,16].

Depuis la mise en évidence du complexe ophiolitique de l'Anti-Atlas [16], de nombreuses interprétations du cadre géodynamique panafricain ont été proposées. Alors que certaines admettent une subduction vers le sud, qui limiterait ainsi la marge cratonique des bassins arrière-arc au nord [16–18,24,28], d'autres, au contraire, considèrent ces domaines comme un mélange d'accrétion de bassins avant-arc, associés à une subduction dirigée vers le nord [12,13,20,24,26]. Ces divers modèles s'accordent cependant sur l'importance de l'« AMAA » comme emplacement de la paléosuture panafricaine, interprétation que Ennih et Liégeois [9] mettent en doute, en considérant cette fracture majeure comme un aulacogène intracratonique. La bordure septentrionale du craton Ouest-Africain est alors à rechercher plus au nord, sans doute le long de la « faille Sud-Atlantique » [9].

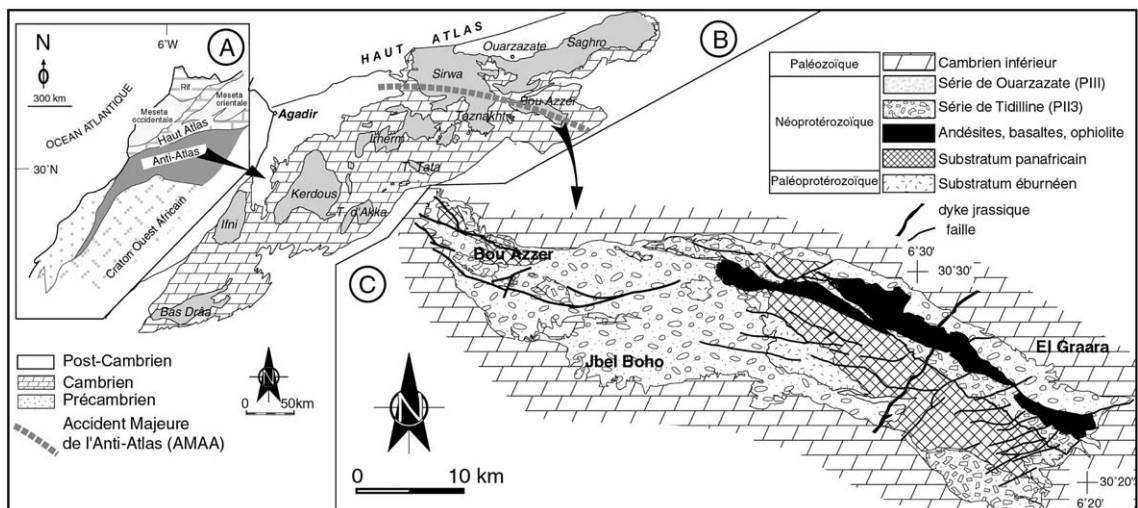


Fig. 1. (A) Les grands domaines structuraux du Maroc ; (B) Schéma géologique de l'Anti-Atlas ; (C) Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Bou Azzer–El Graara (d'après [16]).

Fig. 1. (1) General geological map of Morocco; (B) Simplified geological map of the Anti-Atlas belt; (C) Geological map of Bou Azzer–El Graara inlier (simplified from [16]).

Dans cette note, et sur la base de données aéromagnétiques, une modélisation de la géométrie du complexe ophiolitique panafricain de Bou Azzer–El Graara est présentée. Ses résultats permettront de contraindre les diverses hypothèses relatives à la géodynamique panafricaine dans l'Anti-Atlas.

2. Le cadre géologique

Dans l'Anti-Atlas central, le long de l'«AMAA», la boutonnière de Bou Azzer–El Graara correspond à l'érosion d'un pli hercynien affectant la couverture cambrienne (Fig. 1C). L'essentiel du socle protérozoïque sur lequel elle repose est un mélange de fragments de roches d'arc et de lambeaux d'une série ophiolitique incomplète et démembrée [1,16,20], cimentée par des métasédiments, metabasites et serpentines déformées. Ces séquences sont traversées par des plutons de diorites quartziques, de diorites ainsi que des dykes de diabases.

Les roches ophiolitiques de Bou Azzer–El Graara affleurent sur une longueur de 15 km et une largeur de 4 km (Fig. 1C). Elles correspondent à des fragments de roches basiques et ultrabasiques (harzburgite, dunite, werhlite, clinopyroxénite...), incluses dans une matrice de serpentine. L'ensemble de ces roches mantelliques est tectoniquement emballé au sein de séries complexes interprétées comme des mélanges d'accrétion au sud, d'origine magmatique, métamorphique ou sédimentaire et des associations de métagrauwackes, basaltes et andésites, considérées comme des assemblages d'avant-arc au nord [24].

L'âge néoprotérozoïque du complexe ophiolitique de l'Anti-Atlas, fixé à 788 ± 10 Ma (Rb/Sr) [5] par datation de l'effet thermique de dykes basiques associés, a été récemment précisé à $762 \pm 1/-2$ Ma, âge U/Pb sur zircon du plagiogranite de Tasriwine, dans le massif de Sirwa [23].

La déformation panafricaine le long de l'«AMAA» est hétérogène et syn-schisteuse ; elle résulte de la collision oblique entre la marge cratonique et l'arc de Saghro (environ 615–565 Ma) [12] et affecte l'ensemble de ces séries, selon une tectonique pelliculaire à vergence sud, dominée par une cinématique décro-chevauchante senestre [24] dans un climat métamorphique de faciès schiste vert à amphibolite. Des bassins syn-collisionnels molassiques (série de Tidilline) se développent lors de phases tardives panafricaines, sous le même régime transpressif [12]. Ces structurations panafricaines seraient postérieures à la mise en place de la diorite déformée d'Ait Ahmane, datée à 650 ± 2 Ma [23] et antérieures à la mise en place de la granodiorite tardi-orogénique de Bleïda datée par U/Pb, dans un premier temps à 615 ± 12 Ma [8] puis à $579 \pm 1,2$ Ma [15].

Malgré le caractère morcelé et incomplet de la suite ophiolitique de Bou Azzer–El Graara, il est actuellement admis que ces roches sont bien représentatives d'une lithosphère océanique néoprotérozoïque, d'où elles ont été extraites par obduction lors de la collision panafricaine [6,24,27,28]. L'association, en outre, de roches de haute pression/faible température, représentées par des schistes bleus [14], est en faveur d'un contexte de subduction néoprotérozoïque le long de l'«AMAA», considéré ainsi comme une paléosuture panafricaine.

3. Étude magnétique

3.1. Les données aéromagnétiques

Les données magnétiques utilisées dans cette étude ont été enregistrées lors de levés aéromagnétiques réalisés en 1976 par la compagnie Hunting Geology and Geophysics Ltd, pour le compte du ministère de l'Énergie et des Mines du Maroc. Elles ont été mises à notre disposition sous forme de valeurs du champ total, corrigées des variations diurnes. C'est une couverture aéromagnétique réalisée à une altitude de 2600 m suivant des profils nord–sud espacés de 4 km (Fig. 2C). La soustraction du champ géomagnétique international de référence (IGRF) de ces valeurs nous a permis d'obtenir une carte du champ magnétique résiduel de l'Anti-Atlas (Fig. 2A). Le calcul de la réduction au pôle des données a permis d'établir la carte présentée sur la Fig. 2B.

3.2. Interprétation qualitative

L'analyse de la carte du champ magnétique résiduel montre que le relief magnétique du domaine de l'Anti-Atlas est perturbé par de nombreuses anomalies de différentes longueurs d'onde dont la plupart se superposent à des affleurements du socle précambrien. Ceci paraît plus évident dans l'Anti-Atlas occidental, où le champ magnétique, particulièrement agité, reflète l'hétérogénéité de la teneur du socle en minéraux magnétiques. D'autres anomalies coïncident plutôt avec des zones recouvertes par les dépôts plus récents, notamment à l'est de Tata, ou encore au sud d'Errachidia. Certaines de ces anomalies sont probablement à associer aux magmas mésozoïques injectés dans la couverture paléozoïque.

L'importante anomalie, objet de cette étude, qui s'étend sur plus 200 km dans l'Anti-Atlas central (A–A', Fig. 2A), est une anomalie de direction WNW–ESE, qui se superpose parfaitement à l'«AMAA». Elle présente une forme bipolaire, dont le pôle positif est largement plus développé que le pôle négatif.

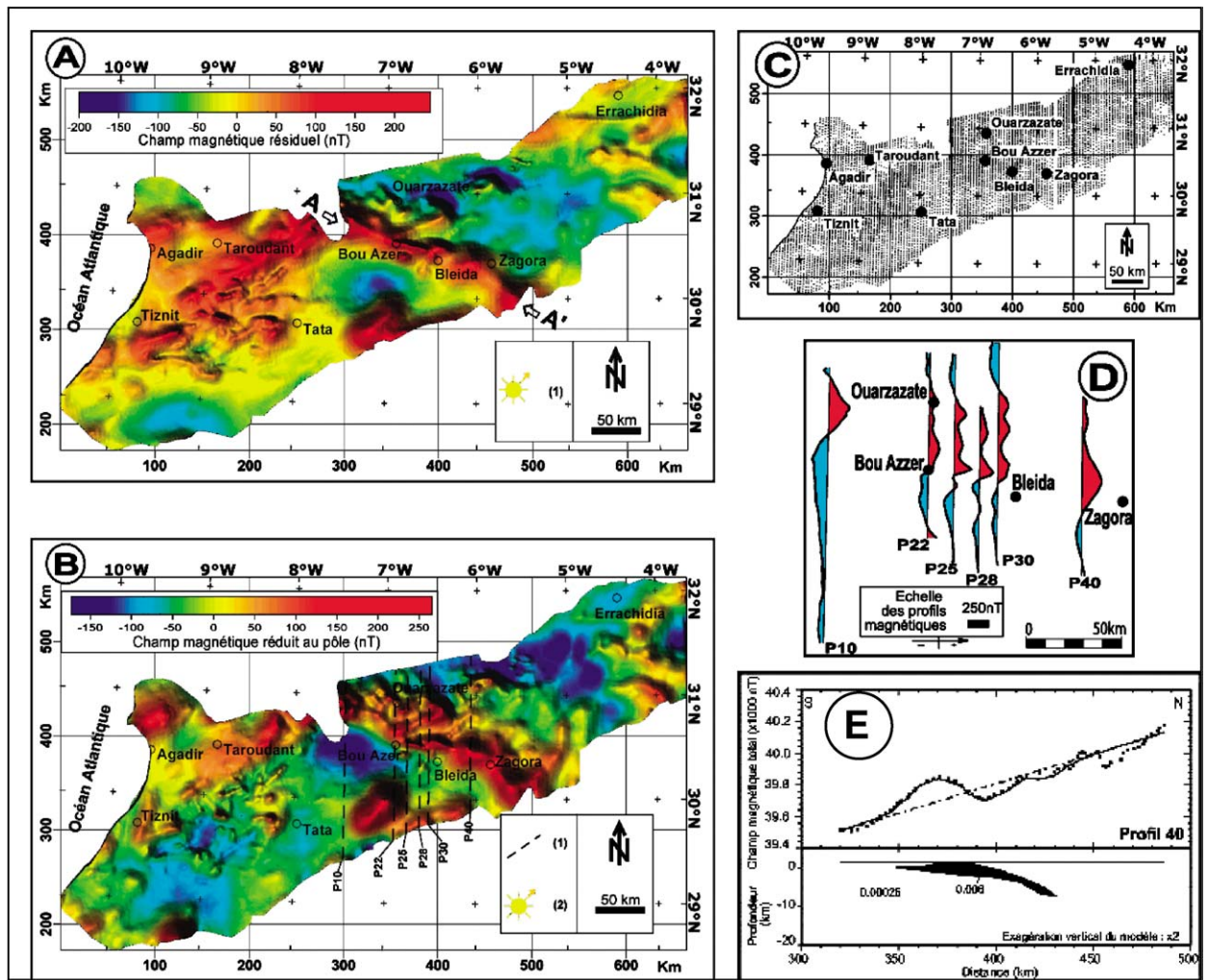


Fig. 2. (A) Carte du champ magnétique résiduel de l'Anti-Atlas : (1) direction de l'ombrage, (A–A') localisation de l'anomalie magnétique de l'Anti-Atlas central. (B) Carte du champ magnétique résiduel réduit au pôle de l'Anti-Atlas : (1) profils utilisés dans la modélisation (P10, P22, P25, P28, P30 et P40); (2) direction de l'ombrage. (C) Lignes du vol du levé aéromagnétique. (D) Profils magnétiques du champ réduit au pôle. (E) Modélisation magnétique des corps ophiolitiques panafricains de Bou Azzer–El Graara.

Fig. 2. (A) Map of the residual magnetic field of the Anti-Atlas: (1) shading direction, (A–A') location of the central Anti-Atlas negative anomaly. (B) Map of the residual magnetic field reduced to the pole magnetic field of the Anti-Atlas: (1) profiles used in the modelling (P10, P22, P25, P28, P30 and P40); (2) shading direction. (C) Flight lines of the aeromagnetic survey. (D) Reduced to the pole magnetic field profiles. (E) Magnetic modelling of the Bou Azzer–El Graara Pan-African ophiolitic body.

Aux latitudes de la zone étudiée, et en l'absence d'aimantation rémanente, ceci correspond à la signature magnétique d'un corps à pendage vers le nord. En effet, à $30^{\circ}30'N$, latitude moyenne de l'anomalie, l'inclinaison du champ magnétique terrestre avoisine 45° . On peut facilement montrer, par modélisation magnétique, qu'un corps vertical provoquerait une anomalie bipolaire, dont le négatif serait aussi important que le positif. En revanche, un corps à pendage nord engendre une anomalie dont le négatif est plus faible que le positif, ce qui est le cas de l'anomalie de l'Anti-Atlas central.

On peut donc conclure que le corps magnétique présente un pendage vers le nord. Le caractère non rémanent de l'aimantation de ce corps a déjà été mis en évidence par la campagne de mesures des propriétés physiques des roches de la boutonnière de Bou Azzer–El Graara, réalisée par la société russe Technoexport dans le cadre d'un programme d'exploration minière dans cette boutonnière [21].

Après réduction au pôle des données magnétiques, une anomalie bipolaire est transformée en anomalie unipolaire comportant uniquement un pôle positif centré sur le corps responsable de l'anomalie. La Fig. 2B

montre que, dans le cas de la signature magnétique de l'Anti-Atlas central, la réduction au pôle conduit à une anomalie asymétrique, caractérisée par l'existence d'un pôle négatif au sud de l'« AMAA », ce qui confirme son pendage vers le nord.

3.3. Analyse quantitative

3.3.1. La susceptibilité magnétique

Les valeurs de susceptibilité magnétique mesurées par la société Technoexport dans la boutonnière de Bou Azzer–El Graara (Tableau 1) [21] ont été effectuées sur des échantillons récoltés, aussi bien en surface, que dans des galeries minières et des sondages. Elles montrent une variation moyenne entre 0,006 pour les roches ophiolitiques et 0,00025 pour les roches encaissantes (en unité CGS).

3.3.2. Modélisation des anomalies magnétiques

La modélisation magnétique de l'ophiolite de Bou Azzer–El Graara est calculée le long de profils subméridiens sélectionnés parmi les lignes de vol du levé aéromagnétique, signalées plus haut. Les profils 22, 25, 28 et 30 traversent la boutonnière et sa suture ophiolitique, alors que les profils 10 et 40 passent par ses deux bordures (Fig. 2C). La modélisation a été effectuée à partir du champ magnétique total, en utilisant une méthode inverse. Les modèles de départ sont établis en tenant compte des paramètres géométriques de terrains préétablis. La coupe modélisée (Fig. 2E) montre que la structure ophiolitique s'enracine en profondeur, avec un pendage vers le nord. Ce modèle est assez bien contraint, car ses limites d'affleurement en surface et sa susceptibilité magnétique sont connues. Compte tenu de l'incertitude qu'on a sur la correspondance entre les courbes observées et calculées et des nombreux essais réalisés, on peut tolérer une variation maximale d'environ 5% sur le pendage et la profondeur maximale du corps.

Tableau 1
Susceptibilité moyenne en fonction du type de roche

Type de roche	Susceptibilité moyenne (uem-cgs)
Rhyolites	0,000 130
Formation de Tidilline	0,000 170
Formation de Ouazazate (volcano-détritique)	0,000 520
Diorite	0,000 100
Roches vertes	0,000 450
Gneiss	0,000 130
Basaltes	0,005 720
Serpentines	0,006 250

4. Discussions et conclusions

De la modélisation magnétique des différentes roches basiques et ultrabasiques de l'ophiolite de l'Anti-Atlas central, on peut retenir les points suivants : (i) l'anomalie magnétique produite est caractérisée par une parfaite continuité le long de l'« AMAA » et sa modélisation montre un enracinement dans la croûte continentale supérieure ; (ii) le pendage obtenu par modélisation magnétique du complexe ophiolitique de Bou Azzer–El Graara est sans ambiguïté orienté vers le nord.

Ainsi, la nature ophiolitique de ces roches mantelliques de l'Anti-Atlas central est admise et leur géométrie au sein de la croûte supérieure à présent établie. Cependant, leur signification géodynamique dans le contexte panafricain peut faire appel à deux hypothèses concurrentes : (i) la première associe ce complexe ophiolitique à un plan de subduction et elle considère que l'« AMAA » souligne l'emplacement de la paléosuture panafricaine ; (ii) la seconde hypothèse postule que ces roches océaniques sont insérées dans un plan de chevauchement à vergence sud, tout en étant à l'origine de la même signature magnétique qu'une véritable suture ophiolitique.

Cette seconde interprétation, selon laquelle la suture panafricaine est située plus au nord, est compatible avec la localisation de cette suture le long de l'actuelle limite sud-atlasique proposée récemment [9]. Elle amène cependant à se poser deux questions : d'une part, celle de la présence, non encore démontrée, d'arguments géophysiques pour une localisation de la suture panafricaine le long de la limite sud-atlasique ; d'autre part, celle de l'absence – ici aussi – à ce jour d'arguments structuraux en faveur de chevauchements crustaux panafricains de grande ampleur, susceptibles d'avoir transporté des éléments ophiolitiques sur plusieurs dizaines de kilomètres.

C'est pourquoi, en l'absence d'arguments géophysiques et structuraux définitifs en faveur de la seconde hypothèse, nous concluons à l'enracinement de la masse ophiolitique le long de l'« AMAA ». Notre modélisation magnétique corrobore donc les modèles géologiques en faveur de l'existence d'une suture panafricaine le long de l'Anti-Atlas central, avec une polarité nord de la subduction [12–14,19,24,26,28]. Cette polarité est, d'ailleurs, conforme à celles des autres domaines orogéniques panafricains, où les plans de subduction de la paléolithosphère océanique péri-cratonique contournent et pendent de façon divergente par rapport au craton Ouest-Africain, lors de l'assemblage du Gondwana occidental au Néoprotérozoïque [13].

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le service de géophysique du ministère de l'Énergie et des Mines du Maroc (Rabat) pour les données aéromagnétiques mises à leur disposition. Ils remercient également J.-P. Liégeois et D. Gasquet pour leurs corrections et suggestions constructives.

Références

- [1] H. Admou, Structuration de la paléosuture ophiolitique panafricaine de Bou Azzer-Sirwa (Anti-Atlas central, Maroc), thèse, université Cadi-Ayyad, 2000, 172 p.
- [2] H. Aït Malek, D. Gasquet, J.-M. Bertrand, J. Leterrier, Géochronologie U–Pb sur zircon de granitoïdes éburnéens et panafricains dans les boutonnières d'Igherm, du Kerdous et du Bas Drâa (Anti-Atlas occidental, Maroc), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Iia 327 (1998) 819–826.
- [3] R. Charlot, Caractérisation des événements éburnéens et panafricains dans l'Anti-Atlas marocain. Apport de la méthode géochronologique Rb/Sr, thèse d'État, université de Rennes, déposée à la Société géologique de France, 1978, 220 p.
- [4] N. Clauer, Utilisation de la méthode Rb–Sr pour la datation d'une schistosité de sédiments peu métamorphisés : application au Précambrien II de la boutonnière de Bou Azzer–El Graara (Anti-Atlas, Maroc), Earth Planet. Sci. Lett. 22 (1974) 404–412.
- [5] N. Clauer, Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires : application à la géochronologie de la couverture du craton Ouest-Africain, Mém. Sci. Géol. (Strasbourg) 45 (1976) 256 p.
- [6] G. Choubert, L'accident majeur de l'Anti-Atlas, C. R. Acad. Sci. Paris 234 (1949) 1172–1173.
- [7] G. Choubert, Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas. Tome I, Notes Mém. Serv. géol. Maroc 162 (1963) 352 p.
- [8] J. Ducrot, J.R. Lancelot, Datation à 615 Ma de la granodiorite de Bleïda et conséquences sur la chronologie des phases tectoniques et magmatiques panafricaines dans l'Anti-Atlas marocain, Bull. Soc. géol. France 7 (1979) 495–499.
- [9] N. Ennih, J.-P. Liégeois, The Moroccan Anti-Atlas: The West African craton passive margin with limited Pan-African activity. Implications for the northern limit of the craton, Precamb. Res. 112 (2001) 289–302.
- [10] B. Hassenforder, La tectonique panafricaine et varisque de l'Anti-Atlas dans le massif de Kerdous (Maroc), thèse d'État, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1987, déposée à la Soc. géol. France, 249 p.
- [11] D. Gasquet, P. Chevremont, T. Baudin, F. Chalot-Prat, C. Guerrot, A. Cocherie, J. Roger, B. Hassenforder, A. Cheilletz, Polycyclic magmatism in the Tagragra d'Akka and Kerdous–Tafelst inlier (Western Anti-Atlas, Morocco), J. Afr. Earth Sci. 39 (2004) 267–275.
- [12] K. Hefferan, J.A. Karson, A. Saquaque, Proterozoic collisional basin in a Pan-African suture zone, Anti-Atlas Mountains, Morocco, Precamb. Res. 54 (1992) 295–319.
- [13] K. Hefferan, H. Admou, J.A. Karson, A. Saquaque, Anti-Atlas (Morocco) role in Neoproterozoic Western Gondwana reconstitution, Precamb. Res. 103 (2000) 89–96.
- [14] K. Hefferan, H. Admou, R. Hilal, J.A. Karson, A. Saquaque, T. Juteau, M. Bohn, S. Samson, J. Kornprobst, Proterozoic blueschist-bearing mélange in the Anti-Atlas Mountains, Morocco, Precamb. Res. 118 (2002) 179–194.
- [15] J.D. Inglis, J.S. MacLean, S.D. Samson, R.S. D'Lemos, H. Admou, K. Hefferan, A precise U–Pb zircon age for Bleïda granodiorite, Anti-Atlas, Morocco: implications for the timing of deformation and terrane assembly in the eastern Anti-Atlas, J. Afr. Earth Sci. 39 (2004) 277–283.
- [16] M. Leblanc, Ophiolites précambriennes et gîtes de Cobalt : Bou Azzer (Maroc), thèse d'État, université Paris-6, 1975, Mém. Centre Géol. Géophys. Montpellier, 329 p.
- [17] M. Leblanc, J.-R. Lancelot, Interprétation géodynamique du domaine panafricain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir des données géologiques et géodynamiques, Can. J. Earth Sci. 17 (1980) 142–155.
- [18] M. Leblanc, A. Moussine-Pouchkine, Sedimentary and volcanic evolution of a Neoproterozoic continental margin (Bleïda, Anti-Atlas, Morocco), Precamb. Res. 70 (1994) 25–44.
- [19] S.C. Loughlin, M.P. Hawkins, M. Gillespie, R.P. Barnes, J. Evans, M. Horstwood, F. Darbyshire, Proterozoic volcanism and crustal evolution in the Anti-Atlas mountains, southern Morocco, in: 19th Colloquium of African Geology, El Jadida, Morocco, 2002, pp. 121–122.
- [20] D.D. Naidoo, S.H. Bloomer, A. Saquaque, K.P. Hefferan, Geochemistry and significance of metavolcanic rocks from Bou Azzer–El Graara ophiolite (Morocco), Precamb. Res. 53 (1991) 79–97.
- [21] B.V. Obraztsov, L.V. Kounaev, R.I. Sokolov, V.G. Prokhorov, G.A. Babernov, E.A. Barinov, Y.I. Morgounov, A.A. Serebrennikov, A.M. Popov, Recherches géologiques sur les gisements de cobalt de la région de Bou Azzer (Anti-Atlas, Maroc), Rapport inédit, société Technoexport, 1971, 172 p.
- [22] G. Rocci, G. Bronner, M. Deschamps, Crystalline basement of the West Africa Craton, in: R.D. Dallmeyer, J.P. Lécroché (Eds.), The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives, Springer Verlag, Berlin, 1991, pp. 31–61.
- [23] S.D. Samson, J.D. Inglis, R.S. D'Lemos, H. Admou, J. Blichert-toft, K. Hefferan, Geochronological, geochemical, and Nd–Hf isotopic constraints on the origin of Neoproterozoic plagiogranites in the Tasriwine ophiolite, Anti-Atlas orogen, Morocco, Precamb. Res. 135 (2004) 133–147.
- [24] A. Saquaque, H. Admou, S. Karson, K. Hefferan, I. Reuber, Precambrian accretionary tectonics in the Bou Azzer–El Graara region. Anti-Atlas, Morocco, Geology 17 (1989) 1107–1110.
- [25] L.J.G. Schermerhorn, E. Wallbrecher, K.M. Huch, Der Subduktionskomplex, Granitplutonismus und Schertektonik im Grundgebirge des Sirwa-Doms (Anti-Atlas, Marokko), Berl. Geowiss. Abh. A 66 (1986) S301–S322.
- [26] A. Soulaïmani, M. Bouabdelli, A. Piqué, L'extension continentale au Néo-Protérozoïque supérieur–Cambrien inférieur dans l'Anti-Atlas (Maroc), Bull. Soc. géol. France 147 (2003) 83–92.
- [27] R.J. Thomas, L.P. Chevallier, P.G. Gresse, R.E. Harmer, B.M. Eglinton, R.A. Armstrong, C.H. de Beer, J.E.J. Martini, G.S. de Kock, P.H. Macey, B.A. Ingram, Precambrian evolution of the Sirwa Window, Anti-Atlas Orogen, Morocco, Precamb. Res. 118 (2002) 1–57.
- [28] R.J. Thomas, A. Fekkak, N. Ennih, E. Errami, E.S. Loughlin, P.G. Gresse, L.-P. Chevallier, J.P. Liégeois, A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas orogen, Morocco, J. Afr. Earth Sci. 39 (2004) 217–226.
- [29] G.J. Walsh, J.N. Aleinikoff, F. Benziane, A. Yazidi, T.R. Armstrong, Pb–zircon geochronology of the Paleoproterozoic Tagragra de Tata inlier and its Neoproterozoic cover, western Anti-Atlas, Morocco, Precamb. Res. 117 (1–2) (2002) 1–20.