

Structures profondes du volcanisme quaternaire du Moyen Atlas central (Maroc): Apports de la cartographie aéromagnétique

Deep quaternary volcanic structures in the central Middle Atlas (Morocco): Contributions of aeromagnetic mapping

Hassan MHIYAOUI^{1*}, Ahmed MANAR², Toufik REMMAL¹, Mustapha BOUJAMAOU³, Fouad EL KAMEL¹, Mounir AMAR⁴, Mehdi MANSOUR¹ & Iz-Eddine EL AMRANI EL HASSANI⁵

1. Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences Ain Chock, Laboratoire des Géosciences Appliquées à l'Ingénierie d'Aménagement. *(hmhiyaoui@yahoo.fr).
2. Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Direction de la Géologie. Rabat.
3. Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences et techniques, département de Géologie, Errachidia.
4. Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Meknès.
5. Université Mohammed V de Rabat, Institut Scientifique, Laboratoire de Géologie et de Télédétection, Rabat.

Résumé: La carte du champ magnétique résiduel du Moyen Atlas central (Maroc) montre d'importantes anomalies focalisées sur les différentes structures émissives du volcanisme plio-quaternaire. Les différents types de filtres mathématiques appliqués au champ magnétique réduit au pôle du Moyen Atlas, notamment le « Tilt Derivative » et la « Déconvolution Euler », indiquent une séparation bien nette entre les anomalies superficielles et celles d'origines profondes liées aux corps magmatiques. Ces différents traitements ont permis d'établir une cartographie des différentes sources magmatiques à l'origine des anomalies magnétiques, leurs niveaux de mise en place ainsi que leur mode de gisement. Les formes circonscrites simples ou complexes sont mises en place à un niveau superficiel (1 km) dans des zones d'ouverture locales induites par le jeu d'accidents décrochants senestres dans un régime tectonique général compressif. Les formes laccolitiques sont plus profondes et étagées (> 1 km). Elles sont liées à l'incursion du magma dans des zones de décollement ouvertes par le jeu distensif des failles et/ou dans des galeries d'origine karstique.

Mots-clés : Volcanisme quaternaire, Moyen Atlas, champ magnétique résiduel, cartographie magnétique, structures profondes.

Abstract: The map of the residual magnetic field of the central Middle Atlas (Morocco) shows significant anomalies focused on different emissive structures of Plio-Quaternary volcanism. The different types of mathematical filters applied to the reduced magnetic field in the central Middle Atlas, in particular the Tilt Derivative and Euler deconvolution indicate a clear separation between surface anomalies and those with deep origin related to magmatic bodies. These various treatments made possible to establish cartography of the various magmatic sources at the origin of the magnetic anomalies, their installation levels as well as their mode of occurrence. Simple or complex circumscribed forms are implemented on a superficial level (1 km) in local areas opening induced remobilization of sinistral strike-slip faults in general tectonic compression setting. Laccolitic forms are deeper and staggered (> 1 km). They are linked to the incursion of magma in the separation zones opened by extensional faulting and/or original karst galleries.

Keywords: Quaternary volcanism, Middle Atlas, residual magnetic field, aeromagnetic mapping, deep structures.

Abridged English version

The Middle Atlas is an intracontinental chain, which has a fairly high relief with altitudes above 2000 m. The data reveals no deep seismic crustal root in the Middle Atlas chain (Makris *et al.* 1985, Tadili *et al.* 1986, Bensari 1978, Van der Meijde *et al.*

2003). The Moho is located between 30 km and 35 km, a crustal thickness below that necessary for isostatic equilibrium able to maintain the high altitude of the chain (Fullea Urchulutegui *et al.* 2006, Missenard 2006). The Cenozoic shortening of

Mesozoic formations of the Middle Atlas is weak, less than 5 km to explain by itself the major uprising in the chain (Gomez *et al.* 1998, Arboleya *et al.* 2004). This lithospheric anomaly is marked by volcanism expressed in the Eocene by the Taourit dyke field in the NE of Middle Atlas (Mokhtari & Velde 1988); Rekkame volcanism (Rachidi *et al.* 1997); Tamazzert Complex (Mourtada *et al.* 1997), which reached its peak in terms of volume in the Miocene (volcanoes Siroua: 11 to 3 My - massive Sahro: 10 to 2.8 My, Berrahma et Delaloye 1989; Berrahma *et al.* 1993 - Middle Atlas, Harmand & Cantagrel 1984) and continues at Pliocene-Quaternary (Middle Atlas, El Azzouzi *et al.* 2010; Rif north Eastern, El Bakkali 1995).

On an immense sheet of basalt which extends up to the Rif foreland, the quaternary volcanism occupies an area of 874km², a volume of 2.62 km³ and has an emission rate of 2.91 km³ / year. There are 105 monogenic volcanoes (15 Neogene, Quaternary 90), 70% of which are Strombolian cones and 30% correspond to maars relayed by strombolian activity.

According to the aeromagnetic cartography, conducted by "la Direction des Mines de la Géologie et de l'Energie" D.M.G.E. in 1974. Maps of the digitized magnetic field form part of a range between -4.5 ° to -5.5 ° longitude and 33 ° to 34 ° latitude, topographic maps covering the 1/100.000 of Azrou, Sefrou, El Hajeb and Boulemane. The residual magnetic field reduced to the pole deciphered the distribution of magnetic anomalies, relating to the geology of the limestone plateau of Azrou and surrounding areas, especially the quaternary volcanism.

The map of the magnetic field reduced to the pole is marked by small circumscribed high frequency anomalies (El Koudiat and Outgui), elongated along major accidents (ATT, ANMA) or reflect the deep magnetic signature (Dayet Ifrah anomaly, upward continuation, Fig. 3). The Dayet Ifrah anomaly is characterized by a volcanic manifestation in the surface less developed, because of the weak faults network.

The Tit derivative operator (fig. 4), shows values restricted between $-\pi/2$ and $+\pi/2$ (Miller and Singh 1994).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial M}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}}$$

Where $\frac{\partial M}{\partial z}$ is the first vertical derivative of the potential field M, and $\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}$ is the horizontal gradient of the field.

Salem *et al.* (2007) have shown that half-distance between $\pm\pi/4$ contours provides an estimate of the source depth for vertical contacts or the distance between zero and $+\pi/4$ or $-\pi/4$ contour obtained from the TDR corresponds to the depth to the top of the vertical contact model, as well as highlighting major lineaments responsible for magma drain to the surface, where the lineaments derived from TDR filter agree largely with major accidents (ATT, ANMA) that compartmentalize the middle Atlas plateau.

Euler deconvolution is calculated for IS = 0, which furnishes faults lineaments of largest throws or contacts of infinite scale structures (Reid *et al.* 1990, Fitzgerald *et al.* 2004, Amar *et al.* 2012). These Euler solutions are between 0 and 2000m deep, taking particularly networks of major accidents (ATT, ANMA). In the NE of Dayet Ifrah, the junction between the limestone plateaus of Ifrane and Imouzzer is highlighted by a transverse lineament (WNW-ESE) with a deepening of solutions to the East from 1000 to 3000m in accordance with subsidence toward the NE of elementary strips redistributed by transverse faults (Charrière 1990).

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T)$$

(x_0, y_0, z_0): position of a magnetic source, the total field T is detected at (x, y, z).

B: regional value of the total magnetic field.

N: degree of homogeneity often called structural index (SI), which characterizes the type of source and the rate of change of field depending on the distance.

Euler deconvolution is calculated for SI = 0, which furnishes faults lineaments of largest throws or contacts of infinite scale structures (Reid *et al.* 1990, Fitzgerald *et al.* 2004, Amar *et al.* 2012). These Euler solutions are between 0 and 2000m deep, taking particularly networks of major accidents (ATT, ANMA). In the NE of Dayet Ifrah, the junction between the limestone plateaus of Ifrane and Imouzzere is highlighted by a transverse lineament (WNW-ESE) with a deepening of solutions to the East from 1000 to 3000m in accordance with subsidence toward the NE of elementary strips redistributed by transverse faults (Charrière 1990).

For IS = 1 related to faults with limited rejection, dykes and sills (Reid *et al.* 1990, Oruç & Selim 2011), magmatic edifices of Azrou plate are

underlined by outlines, with depths reaching 2000 m, in agreement with the results obtained by processing TDR. Concerning the anomaly of Dayet Ifrah, the Euler solutions are marked by alignments in three steps, which penetrate between 500 and 5000 m, in the direction of RTP anomalies. These alignments are superimposed to accidents determined by analysis of satellite images (Menjour *et al.* 2016).

A simulation of the shape and depth of magmatic bodies is conducted using GM-System module of Geosoft Oasis Montaj, using a magnetic susceptibility of 0.015 (cgs) (mean magnetic susceptibility measured in basalts of the Middle Atlas, El Azzab & El Wartiti 1998 b), over two profiles [AA'] and [BB']. Magmatic bodies on major accidents seem deeper until 5km and have limited extension. In both cases the magma reservoirs are in the form of laccoliths, adjacent to the path of ATT and ANMA faults. This structural arrangement suggests the intrusion of magma in a fragile Banking in favor of separation zones, opened consecutively to the normal faulting that drain magma toward the lateral expansion areas (Witkind 1973, Roman Berdiel 1995).

INTRODUCTION

De nombreuses formations volcaniques d'âge néogène et quaternaire se répartissent en bordure occidentale du bassin méditerranéen (Fig. 1). À l'instar du massif Central en France, ou du complexe de l'oranaise en Algérie, le causse moyen atlasique a été le siège d'une importante activité volcanique durant l'époque plio-quaternaire (Najid 1979).

Le Moyen-Atlas a fait l'objet d'une campagne de cartographie aéromagnétique, exécutée par la Compagnie Africaine de Géophysique (CAG) en 1974 pour le compte de la Direction des Mines, de la Géologie et de l'Energie, sur l'ensemble du Moyen Atlas, de la Haute Moulouya et du Haut Atlas oriental (D.M.G.E. 1974).

Le traitement des anomalies magnétiques du Moyen Atlas a permis de mettre en évidence l'existence d'anomalies de petites et grandes longueurs d'onde liées à des sources très aimantées, en l'occurrence les basaltes plio-quaternaires, et des anomalies allongées le long d'accidents majeurs, tels que l'Accident Nord Moyen Atlasique (ANMA), l'Accident de Tizi n'Tretten (ATT) et l'Accident Sud Moyen Atlasique (ASMA) (El Azzab & El Wartiti 1998a).

L'objectif de ce travail est d'affiner l'interprétation qualitative des anomalies magnétiques relevées dans le Causse moyen atlasique marocain en faisant appel à des techniques de traitement géophysique, notamment l'Opérateur « Tilt Derivative » (TDR),

The abundance of peridotite enclaves in basalts reflects a rapid ascent of magma to the surface, without identifying textural clues pertaining to the physico-chemical imbalances due to the introduction of the enclaves in the host rock (Lakroud *et al.* 2015). Also the petro-mineralogical data they attest to a short stay of magma in the crust, which explains the absence of large magma chambers.

Major accidents NE-SW of regional amplitude and to a lesser degree, those with directions NNW-SSE and ENE-WSW, merge with the alignments of karst depressions that truffent the limestone formations of the Lias (Martin 1981). Effusions of basalts that cover these formations at the Causse, generate cryptokarsts whose the arrangement accommodates to the direction of major faults. The anomaly of Dayet Ifrah would be linked to magma flow in a separation zone between the Paleozoic basement and the Meso-Cenozoic cover around 2 km deep. This level is compatible with the average thickness of the cover which could also host magmatic incursions in favor of the karst system initiated in accordance with the direction of major accidents.

développé par Miller & Singh (1994), et la déconvolution Euler (DE) (Thompson 1982, Reid *et al.* 1990) qui permettent de tracer en profondeur le contact des corps magmatiques et de délimiter leur toit, ainsi que de faire ressortir les grands linéaments responsables du drainage du magma vers la surface. Dans cette étude, nous présentons dans un premier temps une synthèse géologique sur le Causse moyen atlasique à partir de nos propres observations de terrain et sur la base des travaux antérieurs sur l'activité volcanique de cette région (Martin 1981, Charrière 1990, Fedan 2001, El Azzouzi *et al.* 2010; Bosh *et al.* 2014) et afin de mettre l'accent sur la configuration des corps magmatiques enfouis et de préciser le rôle du contexte structural et de la karstification dans la mise en place du magma basaltique plio-quaternaire dans cette partie de la chaîne atlasique, l'interprétation des anomalies magnétiques du champ résiduel relatives au Causse Moyen Atlasique Marocain est réalisée en faisant appel à des techniques de traitement mathématique.

CADRE GÉOLOGIQUE ET MORPHO-STRUCTURAL

Aspect géomorphologique

Le Moyen Atlas présente un relief assez élevé avec des altitudes dépassant les 2000 m. A l'instar du Haut Atlas, les données de la sismique profonde ne révèlent aucune racine crustale sous la chaîne du Moyen Atlas (Makris *et al.* 1985, Tadili *et al.* 1986, Bensari 1978, Van der Meijde *et al.* 2003). Le Moho,

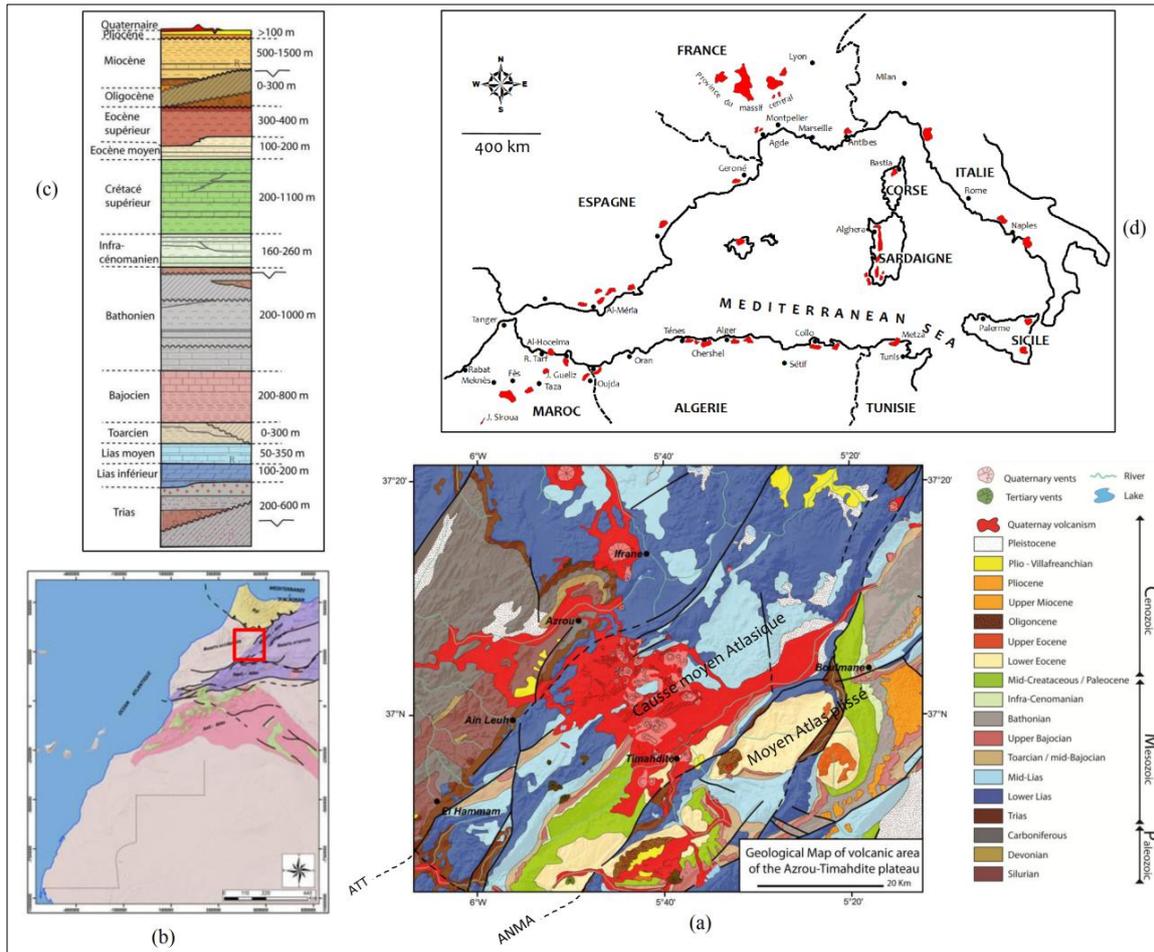


Figure 1. a, Localisation du domaine volcanique dans la chaîne du Moyen Atlas (Martin 1981, modifiée); b, Principaux domaines structuraux du Maroc (Provinces du nord); c, Présentation synthétique de la succession lithologique du Moyen Atlas; d, Position du volcanisme du Moyen Atlas dans le cadre au volcanisme néogène et quaternaire de la Méditerranée occidentale (Najid 1979).

Figure 1. a, Location of the volcanic domain in the Middle Atlas chain (Martin 1981, modified); b, Main structural domains of Morocco (northern provinces); c, Synthetic presentation of Middle Atlas lithological succession; d, Middle Atlas volcanism position into western Mediterranean neogene and quaternary volcanism frame (Najid 1979).

R situé entre 30 et 35 km, indique une épaisseur crustale en deçà de celle nécessaire pour un équilibre isostatique à même de maintenir l'altitude élevée de la chaîne (Fullea Urchulutegui *et al.* 2006, Missenard 2006).

Le raccourcissement cénozoïque des formations mésozoïques du Moyen Atlas est trop faible (moins de 5 km) pour expliquer à lui seul le soulèvement important de la chaîne (Gomez *et al.* 1998, Arboleya *et al.* 2004).

La modélisation de la structure lithosphérique marocaine sur la base de paramètres impliquant la gravimétrie, le géoïde, le flux de chaleur et la topographie a permis de mettre en évidence l'implication d'un composant asthénosphérique dans la topographie de la chaîne atlasique (Tadili & amdani 1983, Seber *et al.* 1996, Frizon de Lamotte *et al.*

2004, Zeyen *et al.* 2005, Missenard *et al.* 2006, Babault *et al.* 2008). Les profils géophysiques font ressortir un amincissement lithosphérique inférieur à 100 km le long d'une lanière orientée NE-SW, étendue d'au moins 600 km sur 150 km de largeur, de l'Anti-Atlas occidental jusqu'au front rifain en passant par le Haut et le Moyen Atlas.

Cette anomalie lithosphérique est jalonnée par un volcanisme exprimé dès l'Eocène par le champ de dykes de Taourirt au NE du Moyen Atlas (Mokhtari & Velde 1988), le volcanisme du Rekkame (Rachidi *et al.* 1997) et le complexe de Tamazert (Mourtada *et al.* 1997). Le volcanisme aurait atteint son paroxysme en terme de volume au Miocène dans l'Anti-Atlas (Berrahma & Delaloye 1989, Berrahma *et al.* 1993) et le Moyen Atlas (Harmand & Cantagrel 1984) et se poursuivait durant le plio-Quaternaire au Moyen Atlas (El Azzouzi *et al.* 2010) et au Rif nord-oriental (El Bakkali 1995).

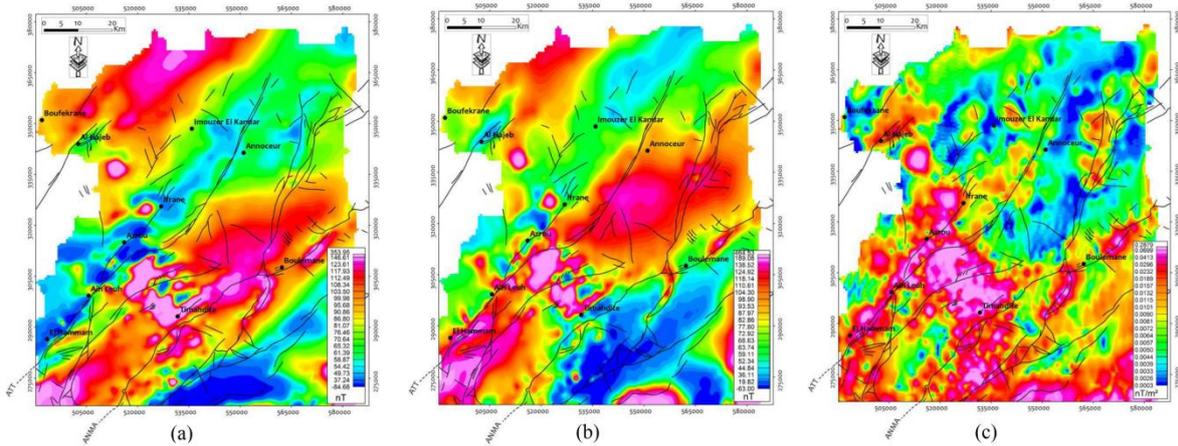


Figure 2. a. Carte du champ magnétique résiduel du Moyen Atlas, b. Carte d'anomalie magnétique réduite au pôle. c. carte du signal analytique.

Figure 2. a. Map of the residual magnetic field of the Middle Atlas, b. map of the residual magnetic field reduced to the magnetic pole. (c) map of the analytical signal.

Volcanisme plio-quaternaire du Moyen Atlas

Le plateau calcaire d'Azrou-Timahdite, dans le Moyen Atlas, est percé de volcans néogènes qui surgissent au milieu d'une immense nappe de basalte qui s'étend jusqu'à l'avant-pays rifain.

La chaîne des volcans du Moyen Atlas, au sens large, comprend les édifices du plateau carbonaté entre Azrou et Timahdite et ceux du domaine plissé particulièrement au nord de Boulmane, le long de l'Accident Médio-Moyen Atlasique (AMMA) entre Skoura et Tazouta (Fig. 1). La couverture volcanique occupe plus de 7 % de la surface totale. La densité des points d'émissions (80 %) se rencontre sur le Causse d'Azrou-Timahdite où les 90 appareils volcaniques recensés s'égrènent selon deux trainées orientées NNW-SSE sur 50 km de long. Les événements émergent au milieu d'une nappe de coulées de basaltes débordant largement sur les formations quaternaires anciennes jusqu'à la plaine de Saïs au nord (avant-pays rifain). Elles sont canalisées à l'est par la dépression de l'oued Guigou et à l'ouest par les vallées des oueds Beht et Oum Rbia.

Du point de vue minéralogique et géochimique quatre faciès pétrographiques peuvent être distingués : des basaltes alcalins formant l'essentiel de l'entablement volcanique ; des basanites ; des néphélinites et des basaltes subalcalins qui arment la structure des édifices volcaniques.

Les datations K-Ar sur roche-totale ont révélé des âges miocène moyen et supérieur (16,25 à 5,87 Ma) et plio-quaternaire (3,92 à 0,67 Ma) (Harmand & Cantagrel 1984, Morel & Bellon 1996, El Azzouzi *et al.* 2010).

Dans la chaîne du Moyen Atlas, le dynamisme éruptif de type strombolien est dominant et à l'origine

de la majorité des édifices volcaniques (70% environ), formés de cônes à cratère bien individualisé. Toutefois, il peut arriver que ce magma basique générateur d'une quantité anormale de gaz par vaporisation d'eau superficielle, donne naissance à des manifestations beaucoup plus explosives de type phréato magmatique qui est à l'origine des maars.

APPORT DE LA CARTOGRAPHIE MAGNETIQUE AEROPORTEE

Le levé géophysique par cartographie aéromagnétique réalisé par la D.M.G.E (1974) au Moyen Atlas constitue de lignes de direction NW-SE équidistantes de 3 km et de traverses de direction NE-SW espacées de 8 km. Pour une altitude barométrique de vol de 2.600 m compte tenu du relief qui varie entre 1.800 m et 2.200 m. Les références géomagnétiques correspondantes au levé sont (IGRF : Mars 1974, une inclinaison de 47° nord et une déclinaison de 7° ouest). Pour cette étude, quatre cartes du champ magnétique sont sélectionnées couvrant les cartes topographiques au 100.000^{ème} d'Azrou, Sefrou, El Hajeb et Boulemane, de ce fait un domaine compris entre -4,5° à -5,5° de longitude et de 33° à 34° de latitude.

Les cartes magnétiques afférentes au champ magnétique résiduel ont été numérisées et traitées à l'aide de filtres et opérateurs mathématiques par le logiciel de traitements des données magnétiques Oasis Montaj de Geosoft (Geosoft 2006).

Traitements mathématiques des données magnétiques

Champ magnétique résiduel, réduction au pôle et signal analytique

La carte obtenue du champ magnétique résiduel, montre des anomalies de formes, de tailles et d'intensités variables en fonction de la distribution d'aimantations dans le sous sol (Fig. 2a). Des anomalies de grandes longueurs d'onde entre -84 nT à 353 nT et de direction NE-SW, semblent accommodées par la structure des linéaments majeurs. Les valeurs d'intensité les plus élevées traduisent les signatures magnétiques des occurrences

magmatiques plio-quaternaires et des accidents majeurs qui traversent la région (El Azzab & El Wartiti 1998 a).

Afin de mieux quantifier l'interprétation de la carte du champ magnétique résiduel, plusieurs filtres mathématiques sont appliqués à cette carte, notamment celui de la réduction au pôle. Ce filtre permet de ramener l'anomalie magnétique à l'aplomb de sa source (Baranov 1957) (Fig. 2b).

Le calcul du signal analytique (Fig. 2c) sert à éliminer le mieux possible, la partie du signal liée à la direction du champ magnétique et de l'aimantation.

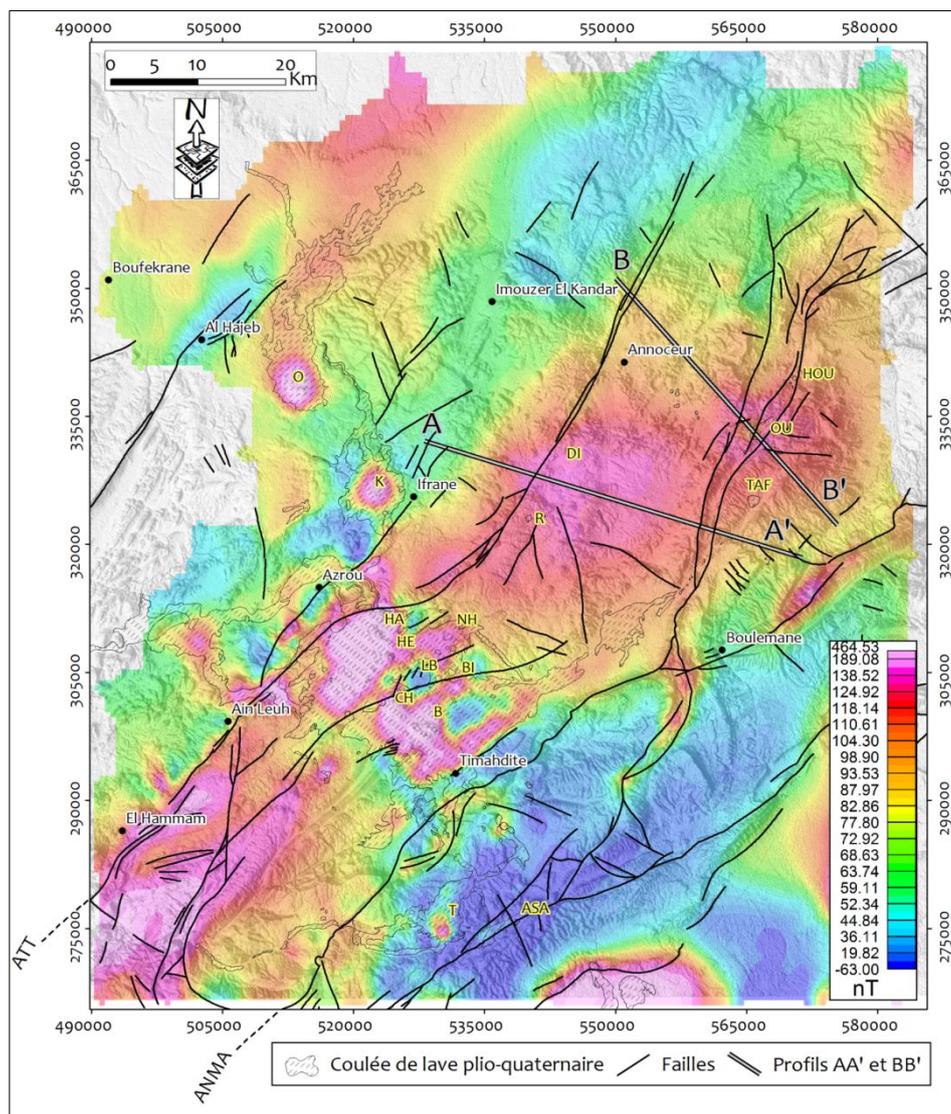


Figure 3. Carte du champ magnétique résiduel réduit au pôle du Moyen-Atlas. ATT : Accident de Tizi n'Tretten, ANMA : Accident Nord Moyen Atlasique, ASMA : Accident Sud Moyen Atlasique, AAO : Accident d'Ait Oufella, O : Outgui, K : Elkoudiat, HE : Hebri, HA : Habri NH : N'ait Lhaj, B : Boutagarouine, BI : Bouibaghatène LB : Lboutatène, R : Regada, DI : Dayat Ifrah, OU : Ouaoussentecht, TAF : Tafraoute, HOU : Houirt, ASA : Aguelmam Sidi Ali, T : Tamarrakoi.

Figure 3. Map of the reduced residual magnetic field to the magnetic pole of the Middle Atlas. ATT : Tizi n'Tretten Accident, ANMA : Nord Middle Atlasic Accident, ASMA : South Middle Atlasic Accident, AAO : d'Ait Oufella Accident, O : Outgui, K : Elkoudiat, HE : Hebri, HA : Habri NH : N'ait Lhaj, B : Boutagarouine, BI : Bouibaghatène LB : Lboutatène, R : Regada, DI : Dayat Ifrah, OU : Ouaoussentecht, TAF : Tafraoute, HOU : Houirt, ASA : Aguelmam Sidi Ali, T : Tamarrakoi.

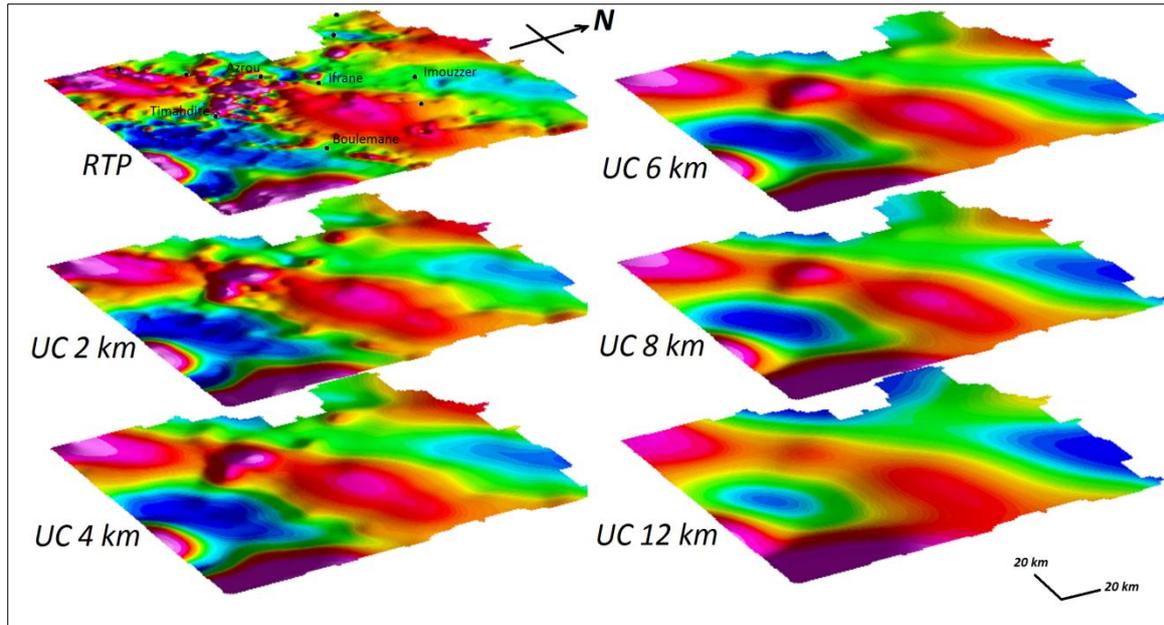


Figure 4. Prolongements vers le haut du champ RTP à 2, 4, 8 et 12 km.
 Figure 4. Upward continuation of the RTP field to 2, 4, 8 and 12 km.

Ainsi, par exemple, en cas de forte rémanence, la localisation sur le plan horizontal de la source peut être obtenue plus facilement par le calcul du signal analytique de l'anomalie que par la double réduction au pôle (Nabighian 1972, 1984). Les valeurs maximales de l'énergie du signal sont bien enregistrées au droit des dépocentres volcaniques superficiels, et le long des grands accidents du socle. Ces dernières structures sont mieux révélées de par l'amplitude du signal, en comparaison avec la carte réduite au pôle. A l'entour de ces foyers volcaniques, des anomalies de plus courte longueur d'onde s'interfèrent et forment des alignements orientés NE-SW ponctués localement d'événements, qui suggèrent la présence de laves enfouies à faible profondeur (Fig. 3). Les coulées qui empruntent les vallées aussi bien à l'est qu'à l'ouest du plateau, ne produisent pas d'anomalies magnétiques. Les anomalies d'Outgui et d'El Koudiate sont à l'aplomb de deux cratères volcaniques bien individualisés au milieu d'une zone peu magnétique.

L'anomalie d'Outgui est caractérisée par un gradient horizontal qui diminue progressivement vers le NW, parallèlement à l'enracinement probable du corps magmatique. L'anomalie d'El Koudiate souligne un corps magmatique vertical, vu le contraste élevé de la susceptibilité magnétique entre l'encaissant et le corps magmatique. Les anomalies magnétiques d'Outgui et d'El Koudiate s'atténuent à un prolongement vers le haut, respectivement de 8 km et de 4 km (Fig. 4).

L'anomalie de Dayet Ifrah localisée au NE du plateau d'Azrou, est de loin la plus importante. Elle

s'étend sur environ 15 km de diamètre, ne couvrant cependant que de rares structures "cratériques" en surface (Fig. 2). Un seul événement surgit à la faveur d'un nœud tectonique formé par la jonction de fractures NS et NW-SE. L'anomalie présente une grande longueur d'onde, d'où elle persiste à un prolongement vers le haut de 8 km (Fig. 3), ce qui indiquerait la présence d'une formation magmatique en profondeur.

Dans le plateau volcanique entre Azrou et Timahdite, apparaissent plusieurs anomalies magnétiques, coincées entre les deux couloirs de failles (ATT et ANMA). L'anomalie NW délimitée par l'accident de Lbouatène (LB) au sud, est la plus intense (290 nT) et se positionne à l'aplomb d'une source exprimée par une dizaine de volcans dont le plus important est celui de Jbel Hebri.

Dans la partie sud vers Timahdite, les anomalies sont de plus courtes longueurs d'ondes (268 nT) et sont engendrées par les volcans de Chdeifate à l'ouest et le complexe volcanique de Boutagrouine à l'est. L'anomalie NW persiste à un prolongement vers le haut de 8 km, comparativement à ses congénères de la partie sud qui s'atténuent à cette hauteur (Fig. 4).

L'opérateur « Tilt derivative »

Le « Tilt derivative » (TDR) calcule l'inverse de la tangente du rapport du module des dérivées partielles horizontales avec la dérivée verticale du champ magnétique (Miller & Singh 1994, Verduzco *et al.* 2004).

L'équation de cette transformation correspond à :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial M}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}}$$

M correspond au champ magnétique réduit au pôle.

Salem *et al.* (2007) ont montré que pour un contact vertical, la valeur nulle de l'angle correspond à la limite de la structure ($h = 0$), la distance entre la valeur (0,785 sur la carte transformée) et la valeur nulle est égale à la profondeur de la structure ($h = Zc$) (Bouiflane 2008, Oruç & Selim 2011).

Dans le Causse moyen atlasique, le rubanement magnétique de TDR s'aligne avec le trajet des grands accidents NE-SW (Fig. 5). La profondeur des toits des corps magmatiques n'y dépasse pas 0,5 km. A hauteur d'Azrou, là où les accidents majeurs subissent un fléchissement d'orientation ENE-WSW, les anomalies TDR sont plus circonscrites et d'orientation NS à NNE-SSW. Elles dessinent des lambeaux en échelon gauche par rapport à la direction des failles. Dans cette partie du plateau, les corps magmatiques sont relativement plus profonds d'environ 1,2 km.

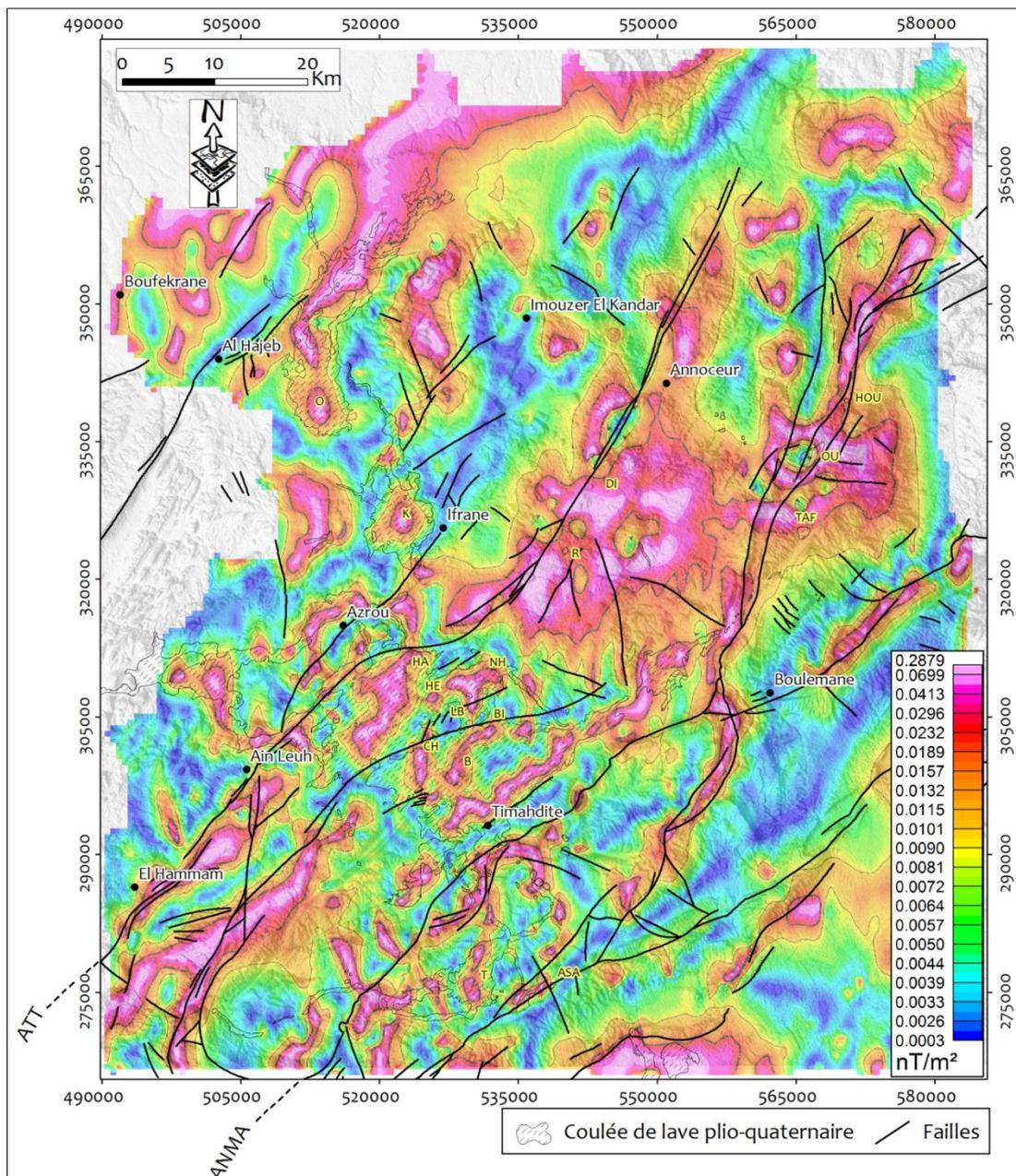


Figure 5. Carte du champ magnétique réduit au pôle transformée par la méthode du « Tilt derivative » du Moyen Atlas (même légende que la figure 3).

Figure 5. Map of the reduced residual magnetic field to the magnetic pole Transformed by the method of the Tilt derivative of the Middle Atlas (same legend as figure 3).

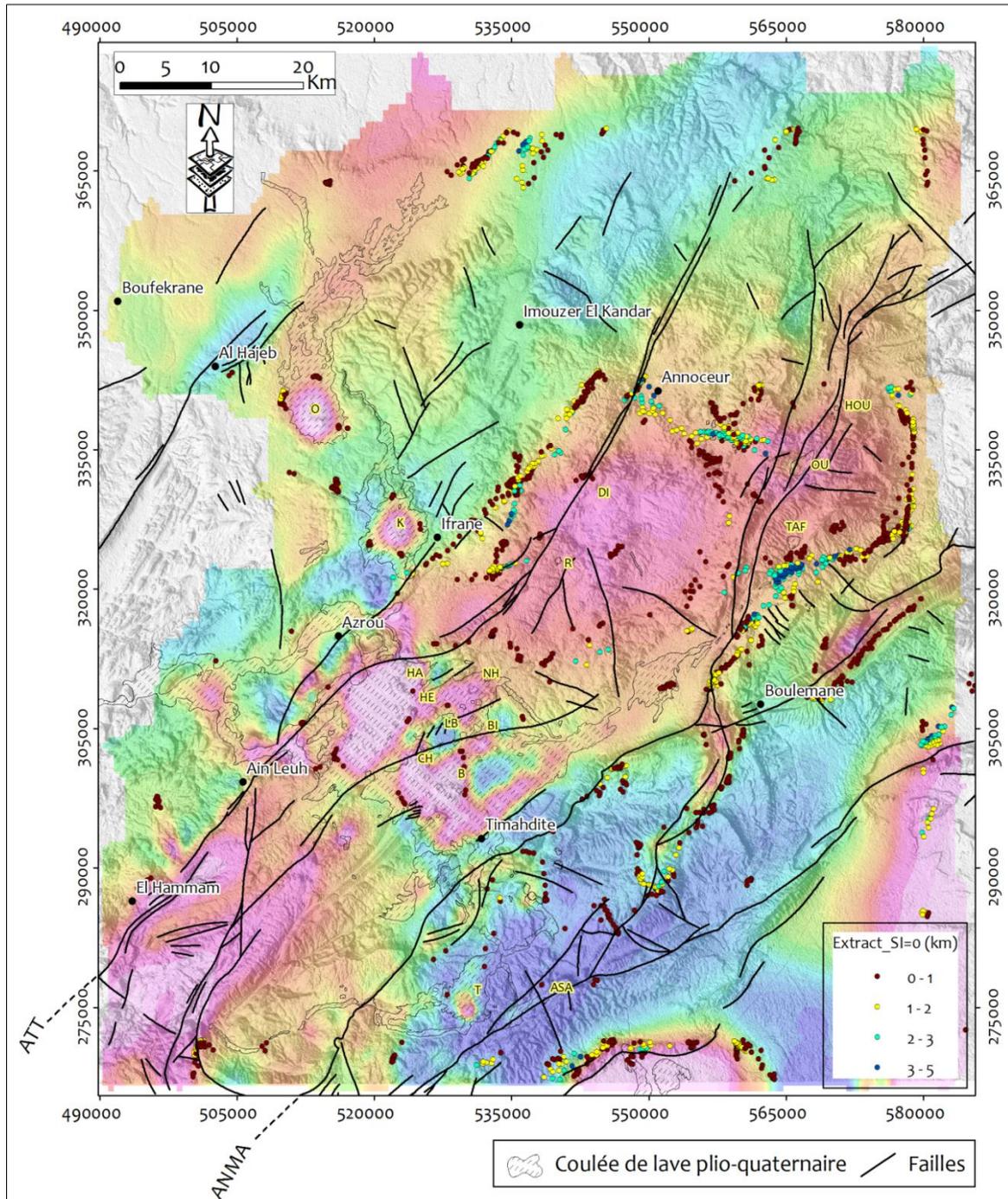


Figure 6. Superposition des solutions Euler $SI = 0$ et des accidents géologiques du Moyen Atlas sur le champ magnétique RTP (même légende que la figure 3).

Figure 6. Superposition of Euler solutions $SI = 0$ and geological accidents of the Middle Atlas on the RTP magnetic field (same legend as figure 3).

La déconvolution Euler

La déconvolution Euler (DE) est une méthode mathématique permettant d'estimer la profondeur des sources, en particulier dans le cadre des champs de potentiels magnétiques ou gravimétriques Thompson (1982) Reid *et al.* (1990). Cette technique est basée sur l'équation d'homogénéité d'Euler qui fait apparaître un "indice structural" correspondant au

degré d'homogénéité de la source. On peut ainsi déterminer à la fois la profondeur et la structure de la source sans apporter d'hypothèse a priori (Moreau 1996). En plus, les résultats ne sont pas affectés par la présence de rémanence (Ravat 1996).

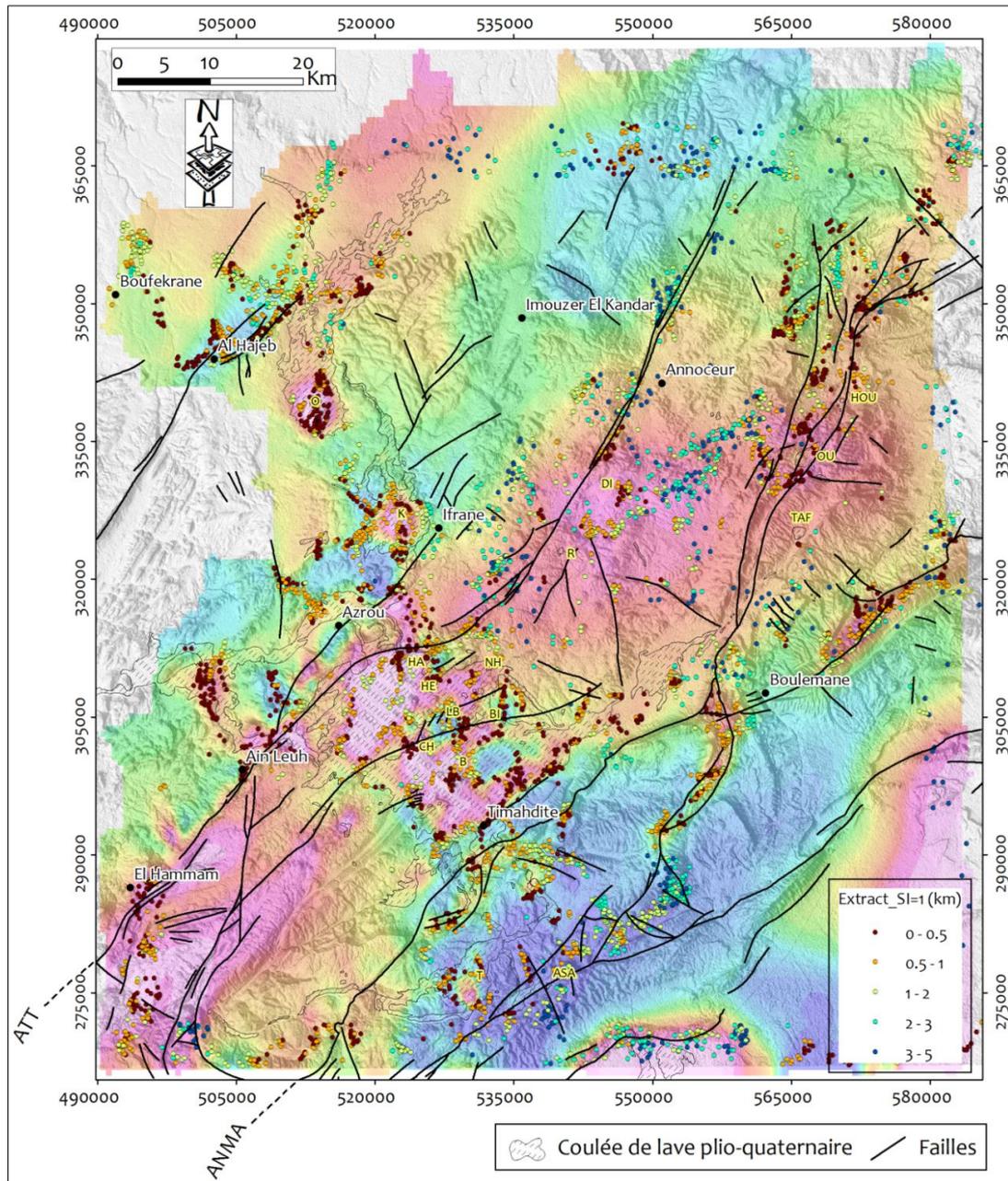


Figure 7. Superposition des solutions Euler SI = 1 et des accidents géologiques du Moyen Atlas sur le champ magnétique RTP (même légende que la figure 3).

Figure 7. Superposition of Euler solutions SI = 1 and geological accidents of the Middle Atlas on the RTP magnetic field (same legend as figure 3).

L'application des données magnétiques est décrite par Thompson (1982) et par Reid *et al.* (1990) en se basant sur la relation:

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T)$$

(x_0, y_0, z_0) : position d'une source magnétique dont le champ total T est détecté en (x, y, z) .

B : valeur régionale du champ magnétique total.

N : degré d'homogénéité appelé souvent indice structural (IS) qui caractérise le type de source et le taux de variation du champ en fonction de la distance. A partir du champ mesuré en surface, on pourra donc déterminer les inconnues x_0, y_0, z_0 et B.

L'application de la DE sur le champ magnétique résiduel réduit au pôle nécessite le calcul de 3 dérivées selon X, Y et Z.

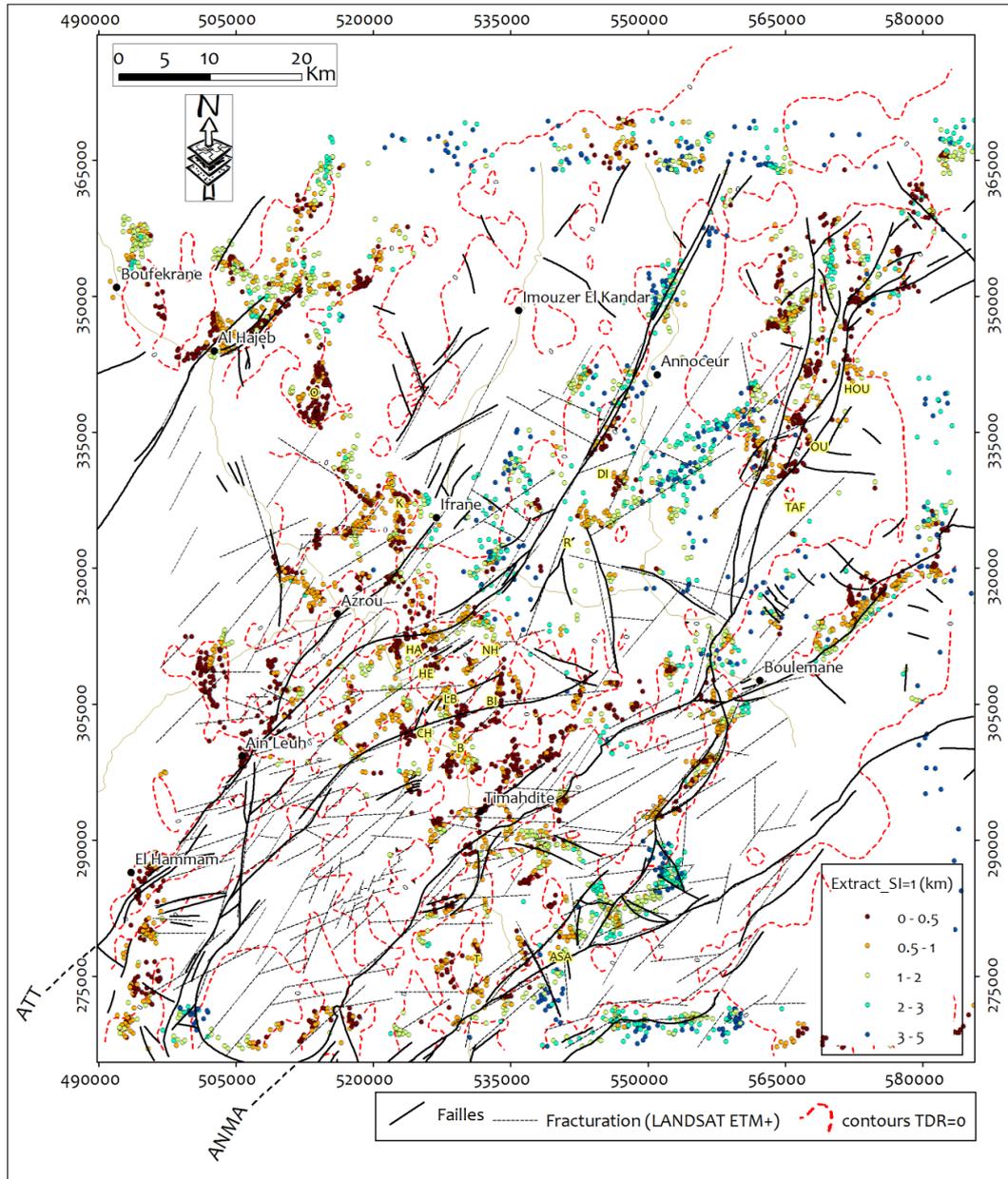


Figure 8. Carte des contours $\Theta=0$ (TDR), superposée sur les linéaments issus de l'analyse des images satellitaires LANDSAT ETM+ (Menjour 2016), les solutions Euler SI=1 et les failles cartographiées (Martin 1981, Harmand & Mokadiri 1986). (même légende que la figure 3).

Figure 8. Map of the contours $\Theta = 0$ (TDR), superimposed on the LANDSAT ETM + satellite images (Menjour 2016), the Euler solutions SI = 1 and the mapped faults (Martin 1981, Harmand & Mokadiri 1986). (same legend as figure 3).

Sachant que l'altitude barométrique est constante à 2.600 m, les profondeurs des solutions Euler ont été comparées aux altitudes de deux modèles numériques de terrain MNT N33W05 et N33W06, afin d'éliminer les solutions aberrantes où l'élévation est supérieure à l'altitude au terrain.

INTERPRETATION

Les linéaments déduits du filtre TDR concordent en grande partie avec les grands accidents (ATT,

ANMA) qui compartimentent le Causse moyen atlasique (Fig. 4). Au niveau du plateau volcanique d'Azrou Timahdite, ces linéaments longent les trajectoires jalonnées par nombreux volcans. Cela permet d'envisager que le drainage du magma a serait lié au rejeu de ces accidents dont les trajectoires sont jalonnées par de nombreux volcans. Au niveau de Dayet Ifrah les anomalies s'égrènent suivant une direction NE-SW à ENE-WSW, parallèle à l'extension des accidents majeurs. En surface, le terrain situé à l'plomb de ces anomalies est peu volcanisé et montre une faible densité de fracturation.

Les solutions de la (DE) ont été calculées pour $IS = 0$ (Fig. 6) correspondant aux failles à grands rejets ou aux contacts des structures d'ampleur infinie (Reid *et al.* 1990, Fitzgerald *et al.* 2004) et $IS = 1$ relatif aux failles de faible rejet, sills et dykes (Reid *et al.* 1990, Oruç & Selim 2011) (Fig. 7). Le choix de ces indices est dicté par le contexte géologique régional.

Les solutions de la (DE) calculées avec $IS = 0$, fournissent des linéaments entre 0 et 2.000 m de profondeur, qui empruntent particulièrement les réseaux des grands accidents ATT et ANMA (Fig. 6).

Au NE de Dayet Ifrah, la jonction entre les Causses d'Ifrane et d'Imouzzère est soulignée par un linéament transverse (WNW-ESE) de la DE avec un approfondissement des solutions vers l'est de 1.000 à 3.000 m conformément à un affaissement vers le NE des lanières élémentaires redécoupées par des failles transverses (Charrière 1990).

Les foyers magmatiques révélés sur la carte des anomalies magnétiques réduites au pôle du Causse moyen atlasique, notamment ceux des secteurs de Hebri, Chdeifate, Koudiat et Outgui, apparaissent bien circonscrits par les solutions de la DE jusqu'à 1.000 m de profondeur (Fig. 6).

Les solutions de la DE calculées avec $IS = 1$, soulignent davantage les contours de ces foyers et confirment la profondeur des réservoirs magmatiques notamment dans le secteur de Hebri (1.000 à 2.000 m), en accord avec les résultats obtenus par la transformation TDR (Fig. 7).

Ces solutions font apparaître dans la région de Dayet Ifrah, des alignements qui s'enfoncent en trois paliers, particulièrement marqués entre 500 m et 5.000 m, dans la direction des anomalies mises en évidence sur la carte du champ magnétique réduite au pôle. A noter que la compilation des linéaments obtenus par les traitements TDR et DE montre un parallélisme aussi bien avec les accidents

cartographiés sur le terrain (Martin 1981, Charrière 1990) qu'avec ceux déterminés par l'analyse des images satellitaires (Menjour *et al.* 2016) (Fig. 8).

Une simulation des formes et de la profondeur des corps magnétiques anormaux a été réalisée à l'aide du module GM-System de Geosoft Oasis Montaj. Le principe de cette technique est d'ajuster l'anomalie calculée à celle observée sur le champ magnétique réduit au pôle en tenant compte de la topographie (Fig. 9). Pour cela on a considéré que l'aimantation est purement induite, avec une susceptibilité magnétique égale à 0,015 (cgs) qui correspond à la moyenne des susceptibilités magnétiques mesurées dans les basaltes du Moyen Atlas (El Azzab & El Wartiti 1998 b).

Le tracé des deux profils AA' et BB' tient compte de la position de l'anomalie respectivement en dehors ou sur le trajet des accidents majeurs (Fig. 3). Les corps magmatiques au droit des grands accidents semblent plus profonds jusqu'à 5 km et d'extension limitée. Dans les deux cas les réservoirs magmatiques se présentent sous forme de laccolites, adjacents au tracé des failles ATT et ANMA (Fig. 9).

Cette disposition structurale suggère l'intrusion du magma dans un encaissant fragile à la faveur de zones de décollement ouvertes consécutivement au jeu normal des failles qui drainent le magma vers des zones d'expansion latérales (Witkind 1973, Roman Berdiel 1995).

Un tel mode de gisement peut être également expliqué par des incursions à la faveur de galeries karstiques, creusées dans les formations calcaires présentes dans les différentes séries de la couverture méso-cénozoïque.

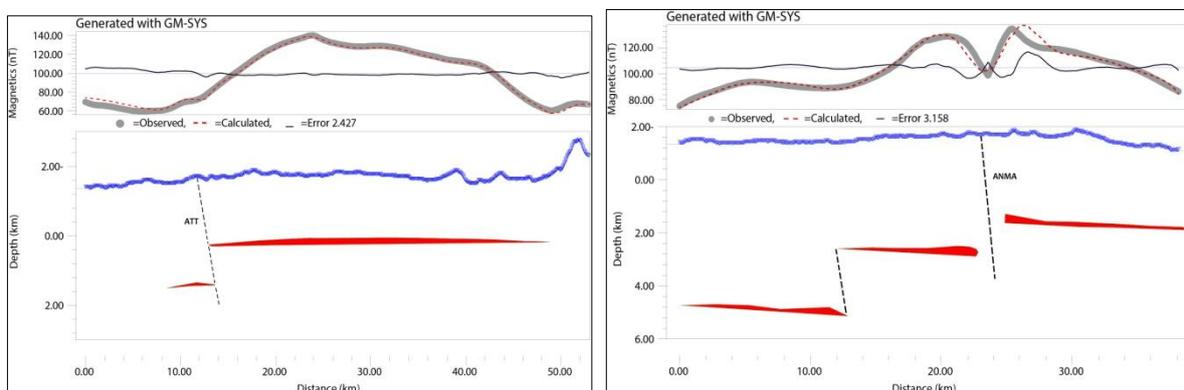


Figure 9. Modèle proposé sur le module GM-system de Geosoft Oasis montaj le long des profils [AA'] et [BB'] sur la carte du champ magnétique résiduel réduit au pôle.

Figure 9. Model proposed on the Geosoft Oasis montaj GM-system along the profiles [AA'] and [BB'] on the map of the residual magnetic field reduced to the magnetic pole.

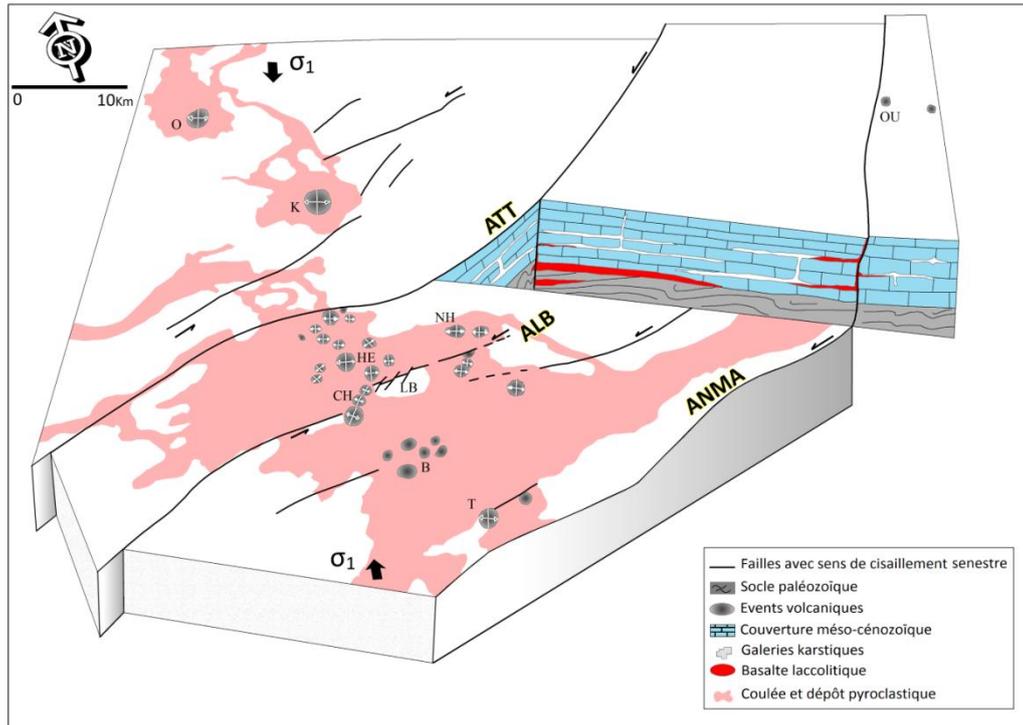


Figure 10. Modalités de mise en place du magmatisme plio-quaternaire dans le causse Moyen Atlasique (même légende que la figure 3).

Figure 10. Implementation modalities of plio-quaternary magmatism in the Middle Atlasic cause. (same legend as figure 3).

SYNTHESE ET CONCLUSION

L'interprétation des anomalies aéromagnétiques du Causse d'Azrou et des régions avoisinantes, sur la base de méthodes de traitement récentes notamment

l'opérateur TDR et la DE, a permis de comprendre les modalités de la dynamique volcanique durant le Plio-Quaternaire, dans cette partie de la chaîne moyen atlasique.

Les anomalies magnétiques observées sur la carte réduite au pôle et/ou filtrée par l'opérateur TDR sont généralement de petite taille, bien circonscrites (El Koudiat, Outgui), ou allongées le long des grands accidents (ATT, ANMA). D'autres formes complexes résultant de l'interférence de plusieurs anomalies ponctuelles, apparaissent particulièrement dans le plateau d'Azrou (Habri, N'Ait Lhaj, Boutagrouine, Chdeifate) et dans le Causse d'Ifrane (Dayet Ifrah).

Toutes les sources affleurent en surface sauf dans la région de Dayet Ifrah. Le prolongement vers le haut de la carte des anomalies magnétiques permet néanmoins d'envisager la présence de laccolites magmatiques enfouies de dimension relativement réduite, situés à faible profondeur (environ 1 km dans le plateau d'Azrou) et qui auraient alimenté les différents appareils volcaniques. Les volcans placés au droit des failles semblent issus de coulées enfouies plus superficiels. Les basaltes du Moyen Atlas sont particulièrement riches en enclaves de péridotite

d'origine mantellique et quelquefois de xénolites de la croûte. A cela s'ajoute des xénocristaux qui proviennent de la dislocation et de l'assimilation des nodules de péridotites au cours de l'ascension. L'abondance, la taille et la nature des enclaves dans ces basaltes apportent des informations fondamentales et directes sur la structure profonde du domaine atlasique, source de ce volcanisme. En effet, l'abondance des enclaves de péridotites (jusqu'à 20cm de diamètre) dans les basaltes traduit une ascension rapide du magma vers la surface, hormis l'existence d'indices texturaux qui témoignent des déséquilibres physico-chimiques suite à l'introduction des enclaves dans la roche hôte (Lakroud *et al.* 2015). Aussi les données pétro-minéralogiques attestent-elles d'un court séjour du magma dans la croûte, ce qui explique l'absence de grandes chambres magmatiques.

Les modalités de mise en place du magmatisme quaternaire dans le plateau du Moyen Atlas apparaissent régies par une même dynamique volcanotectonique conditionnée par le contexte karstique (Fig. 10). Le modèle volcano-tectonique préconisé par Harmand & Moukadiri (1986), Lakroud *et al.* (2015) insère l'activité volcanique dans des distensions locales induites par la remobilisation d'accidents décrochants senestres. Ce mécanisme de la tectonique syn-éruptive est déduit des structures géométriques homothétiques des modèles théoriques

ou expérimentaux (Fig. 9). Ainsi les complexes cratériques de Hebri et de Chdeifat et les volcans d'Outgui et de Koudiat se placent dans des ruptures en tension circonscrites aux terminaisons, aux zones de virgations ou de relais d'accidents anciens. Ces derniers servent également de voie d'accès au magma et son épanchement latéral aidé en cela par la nature fragile de l'encaissant argilo-calcaireux. La disposition étagée des laccolites est raccordée au déplacement distensif des failles. Elle peut être également expliquée par une infiltration du magma à la faveur de galeries karstiques creusées dans les niveaux carbonatés ou par dissolution sous-jacente de poches salifères du Trias (Martin 1981, Lakroud *et al.* 2015).

D'autre part, les accidents majeurs NE-SW d'amplitude régionale et à moindre degré, ceux de directions NNW-SSE et ENE-WSW, se confondent avec les alignements de dépressions karstiques qui truffent les formations calcaires du Lias (Martin 1981). Les épanchements de basaltes qui couvrent ces formations au niveau du Causse, ont généré des cryptokarsts dont l'agencement s'accommode avec la direction des failles majeures. L'anomalie de Dayet Ifrah serait liée à une circulation de magma dans une zone de décollement entre le socle paléozoïque et la couverture méso-cénozoïque à environ 2 km de profondeur. Ce niveau est compatible avec l'épaisseur moyenne de la couverture qui pourrait abriter également des incursions magmatiques à la faveur du réseau karstique initié conformément à l'orientation des accidents majeurs.

REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie du projet de recherche multidisciplinaire sur les géomatériaux et les géosites volcaniques du Maroc: valorisation et exploitation dans les perspectives d'un développement durable, soutenu et financé par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Ce projet est réalisé dans le cadre d'une collaboration tripartite impliquant la Faculté des Sciences Ain Chock de Casablanca, l'Institut Scientifique de Rabat et la Faculté des Sciences et Techniques - Mohammadia. Les auteurs remercient les évaluateurs qui ont contribué à l'amélioration de l'article : Le Pr. Bouiflane (Institut Scientifique Rabat), Le Pr. Jean-Louis Bodinier, Le Pr. Pierre Camps et Jean-Marie Dautria (Géosciences Montpellier). Les évaluateurs anonymes sont remerciés pour leurs commentaires et suggestions.

REFERENCES

Arboleya M. L., Teixell A., Charroud M. *et al.* 2004. A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 39, 3-5, 319-327.

Baala M. 2005. *Etude quantitative des anomalies magnétiques par le signal analytique : application à des données océaniques*. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, 223 p.

Babault J., Teixell A., Arboleya M.L. *et al.* 2008. A late Cenozoic age for long-wavelength surface uplift of the Atlas Mountains of Morocco. *Terra Nova* 20, 102-107.

Baranov V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies, *Geophysics*, 22, 359-383.

Bensari D. 1978. *Connaissance géophysique du Maroc*. Doctorat d'Etat, Grenoble, 262 p.

Berrahma M. & Delaloye M. 1989. Données géochronologiques nouvelles sur le massif volcanique du Siroua (Anti-Atlas, Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, 9, 3-4, 651-656.

Berrahma M., Delaloye M., Faure-Muret A. *et al.* 1993. Premières données géochronologiques sur le volcanisme alcalin du Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc. *Journal of African Earth Sciences*, 17, 3, 333-34.

Bouiflane M. 2008. *Cartographie aéromagnétique et magnétique multi-échelles: Etude structurale d'une région du fossé Rhénan*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1, 151p.

Charrière A. 1990. *Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au sud-est de Fès (Maroc)*. Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Paul Sabatier de Toulouse, 559p.

Direction des Mines de la Géologie et de l'Energie (D.M.G.E).1974. *Levé aéromagnétique du Maroc, domaine de Moyen-Atlas, Haute Moulouya et Haut-Atlas Oriental*. Rapport inédit. 54p.

El Azzab D., El Wartiti M. 1998. Mise en place de la chaîne volcanique du moyen atlas (Maroc): traitement des données aéromagnétiques, *Pangea*, n°29/30, 45-51.

El Azzab D., El Wartiti M. 1998. Paléomagnétisme des laves du Moyen Atlas (Maroc) : Rotations récentes, *Earth and planetary sciences*, 237, 509-512.

El Azzouzi M., Maury C., Bellon H. *et al.* 2010. Petrology and K-Ar chronology of the Neogene-Quaternary Middle Atlas basaltic province, Morocco. *Bulletin de la Société géologique de France*, t. 181, 3, 243-257.

El Bakkali S. 1995. *Volcanologie et Magmatologie du système du Gourougou (Rif Oriental, Maroc)*. Thèse, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand II, 283 p.

Fedan B. 2001. Les magmatites méso-cénozoïque du, Moyen Atlas : typologie et cadre géodynamique. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n°408, 125-134, 8 fig.

Fitz Gerald D., Reid A. & Mc Inerney P. 2004. New discrimination techniques for Euler deconvolution. *Computers & Geosciences* 30, 461-469.

Frizon De Lamotte D., Crespo-Blanc A., Saint-Bezar B., *et al.* 2004. TRASNSMED-transect I (Betics, Alboran Sea, Rif, Moroccan Meseta, High Atlas, Jbel Saghro, Tindouf Basin). In: Cavazza, W., Roure, F., Spakman, W., Stampfli, G.M., Ziegler, P.A. (Eds.), *The TRANSMED Atlas-The Mediterranean Region from Crust to Mantle*. Springer, Berlin, 91-96.

Fullea Urchulategui I., Fernandez M. & Zeyen H. 2006. Lithospheric structure in the Atlantic-Mediterranean transition zone (southern Spain, northern Morocco); a simple approach from regional elevation and geoid data. *Comptes Rendus Geosciences*. Volume 338, Issues 1-2, 140-151.

Gomez F., Allmendinger R., Barazangui M. *et al.* 1998. Crustal shortening and vertical strain partitioning in the Middle Atlas mountains of Morocco. *Tectonics*, 17, 520-533.

Harmand C. et Cantagrel J.M. 1984. Le volcanisme alcalin tertiaire et quaternaire du Moyen Atlas (Maroc) :

- chronologie K/Ar et cadre géodynamique. *Journal of African Earth Sciences*, 2, 51-55.
- Lakroud K., Remmal T., Elkamel F. *et al.* 2015. Reconstitution de la dynamique éruptive polyphasée du volcan d'Aguelmane Sidi Ali (Moyen Atlas- Maroc). 9ème *Colloque International du Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées*, p54.
- Makris J., Demnati A. & Klussmann J. 1985. Deep seismic soundings in Morocco and a crust and upper mantle model deduced from seismic and gravity data. *Annales Geophysicae*, 3, 369-380.
- Martin J. 1981. Le Moyen Atlas central. Etude. Etude Géomorphologique. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, N° 258 bis.
- Menjour F., Remmal T., Hakdaoui M. *et al.* 2016. Role of fracturing in the organization of the karst events of Azrou Plateau: contribution of space imagery. *The Indian Society of Remote Sensing Journal*, Vol. 44, 16p.
- Miller H.G & Singh, V. 1994. Potential field tilt- a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Missenard Y., Zeyen H., Frizon De Lamotte D. *et al.* 2006. Crustal versus Asthenospheric Origin of the Relief of the Atlas Mountains of Morocco. *Journal of Geophysical Research* 111-B03401.
- Mokhtari A & Velde D. 1988. Xenocrysts in Eocene camptonites from Taourirt, northern Morocco (Xénocristaux dans les camptonites éocènes du Taourirt, Maroc septentrional). *Mineralogical Magazine*, 52, 5, 587-601.
- Moreau F., Gibert D. & Saracco G. 1996. Filtering non-stationary geophysical data with orthogonal wavelets. *Geophysical Research Letter*, 23, 407 - 410.
- Morel J. M. & Bellon H. 1996. Le volcanisme quaternaire du plateau d'Azrou, Maroc. Contribution à la datation isotopique des magmas associés. 13ème *Colloque des bassins sédimentaires marocains*, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, p113.
- Mourtada S., Lebas M.J. & Pin C. 1997. Petrogenesis of Mg-carbonatites from Tamazert in the Moroccan High Atlas. *Comptes rendus de l'académie des sciences série 1, Fascicule Sciences de la terre et des planètes*, 325, 8, 559-564.
- Nabighian M. N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-sections; its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.
- Nabighian M. N. 1984. Toward a Three-dimensional Automatic Interpretation of Potential Field Data 6ia Generalized Hilbert Transforms: Fundamental Relations, *Geophysics*, 49, 780-786.
- Najid D. 1979. *Paléomagnétisme du Miocène, plio-quaternaire et du quaternaire*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 134p.
- Oruç B. & Selim H.H. 2011. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. *Journal of Applied Geophysics*, 74, 194-204.
- Rachdi H., Berrahma M., Delaloye M. *et al.* 1997. Tertiary volcanism in Rekkame (Maroc): Petrology, geochemistry and geochronology. *Journal of African Earth Sciences*, 24, 3, 259-269.
- Ravat D. 1996. Analysis of the Euler Method and Its Applicability in Environmental Magnetic Investigations JEEG, December 1996, Volume 1, Issue 3, pp. 229-238
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H. *et al.* 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics*. 55, 80-91.
- Roest W. R., Verhoef J. & Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D signal analytic, *Geophysics*, 57, 116-125.
- Roman Berdiel M. T. 1995. *Mécanismes d'intrusion des granites supracrustaux, modèles analogiques et exemples naturels*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, 258 p.
- Seber D., Barazangi M., Ibenbrahim A. *et al.* 1996. Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif-Betic Mountains. *Nature*, 379, 3125-3138.
- Salem A., William S., Fairhead J.D. *et al.* 2008. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, Volume 73, Issue 1, L1-L10.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead J.D. *et al.* 2007. Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 26, 1502-1505.
- Tadili B. & Ramdani F. 1983. Computer file of Moroccan earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 259-289.
- Tadili B., Ramdani M., Ben Sari D., *et al.* 1986. - Structure de la croûte dans le Nord du Maroc. *Annales Geophysicae*, 4, 99-104.
- Thompson D. T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.
- Van Der Meijde M. Van Der Lee S. & Giardini D. 2003. Crustal structure beneath broad-band seismic stations in the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 152, 729-739.
- Verduzco B., Fairhead, J.D; Green, C.M *et al.* 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. SEG. *The Leading Edge*, 116-119.
- Witkind I.J. 1973. Igneous rocks and related mineral deposits of the Barker quadrangle, little Belt Mountains, Montana. *Us. Geological Survey professional paper*, 752, 58.
- Zeyen H., Ayarza P., Fernandez M. *et al.* 2005. Lithospheric structure under the western African-European plate boundary: A transect across the Atlas Mountains and the Gulf of Cadiz. *Tectonics*, 24, 2, TC2001, doi: 10.1029/2004TC001639.

Manuscrit reçu le 19/04/2016
Version révisée acceptée le 03/07/2017
Version finale reçue le 11/07/2017
Mise en ligne le 12/07/2017