

# Contribution de la cartographie aéromagnétique à l'étude de l'Accident Nord Moyen Atlasique et des rides anticlinales voisines durant le Maastrichtien (Sud-Ouest du Moyen Atlas, Maroc)

## *Contribution of aeromagnetic mapping for studying the North Middle Atlas Accident and the neighbouring anticline ridges during the Maastrichtian (South-West of Middle Atlas, Morocco)*

Wiame EL MOUTCHOU<sup>1\*</sup>, Mohamed SAADI<sup>1</sup>, Ahmed MANAR<sup>2</sup> & Assia IDRISSE<sup>1</sup>

1. Laboratory of Geosciences, Water and Environnement, Departement of Geology, Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Morocco \*(wiame17el@gmail.com).

2. Direction de Géologie, Ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable, Rabat.

**Résumé.** Le Sud-Ouest du Moyen Atlas au Maroc est l'un des secteurs clés importants pour comprendre l'évolution du Moyen Atlas central, qui a fait l'objet de nombreuses études sur son évolution géodynamique depuis le Jurassique jusqu'au Cénozoïque. Cette étude mettra en évidence le rôle de l'Accident Nord Moyen Atlasique (ANMA) et les structures anticlinales associées dans la mise en place des bassins sédimentaires: Baqrit-Timahdit-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou et Tighboula durant le Maastrichtien, par utilisation de la cartographie aéromagnétique à l'identification de la profondeur d'ANMA et les structures associées sur la répartition des séries sédimentaires.

Ainsi, l'analyse de la carte aéromagnétique de la partie sud-ouest du Moyen Atlas a permis l'identification des anomalies magnétiques et de la profondeur, et la détermination du pendage et du positionnement de ces failles, en s'appuyant sur l'examen géomagnétique. Plusieurs traitements ont été appliqués à la carte de la zone d'étude : réduction au pôle, gradient horizontal et déconvolution d'Euler, qui nous ont permis de confirmer le prolongement en profondeur de la faille majeure: l'Accident Nord Moyen Atlasique, précédemment cartographiée dans la carte géologique du Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas. En plus, cette méthode nous a permis de révéler de nouvelles failles annexes de la structure majeure en sub-surface qui n'ont pas été reconnues jusqu'à présent et de préciser leur prolongement et leur profondeur, il s'agit des systèmes orientés NE-SW, NW-SE et N-S, interprétés comme des failles synsédimentaires responsables de la subsidence du bassin et du contrôle de la répartition et la géométrie de la série maastrichtienne.

**Mots-clés:** Accident Nord Moyen Atlasique, Données aéromagnétiques, Réduction au pôle, Gradient horizontal, Déconvolution d'Euler, Sud-Ouest Moyen Atlas, Maroc.

**Abstract.** This study highlights the role of the North Middle Atlas Accident (NMAA) and associated anticlinal ridges in the development of the sedimentary basins: Baqrit-Timahdit-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou and Tighboula during the Maastrichtian, and the contribution of aeromagnetic mapping to the identification of the depth of the NMAA and associated structures on the distribution of the sedimentary series.

Thus, the analysis of the aeromagnetic data of the south-western part of the Middle Atlas has allowed the characterization of magnetic anomalies, to identify the depth, dip and emplacement of these faults, based on the geomagnetic examination. Several treatments were applied to the map of the study area: reduction to pole, horizontal gradient and Euler deconvolution, which allowed us to confirm the dip of the major fault: the North Middle Atlas Accident, previously mapped in the geological map of the South-Western Middle Atlas Range. In addition, this method allowed us to reveal new faults related to the major subsurface structure that yet recognized and to specify their extension and depth. These set of faults are mainly NE-SW, NW-SE and N-S trending, interpreted as synsedimentary faults responsible for the subsidence of the basin and the control of the distribution and geometry of the Maastrichtian series.

**Keywords:** North Middle Atlas Accident, Aeromagnetic data, Reduction to pole, Horizontal gradient, Euler deconvolution, Southwest of the Middle Atlas, Morocco.

### Abridged English Version

#### Introduction

Based on geomagnetic analysis, the aeromagnetic mapping of the south-western Middle Atlas has allowed us to characterize the aeromagnetic anomalies and to determine the deepening and location of these faults. Several treatments were applied to the residual magnetic field map of the study area: pole reduction, horizontal gradient and Euler deconvolution, which confirmed the vertical extension of the major fault: the

North Middle Atlas Accident. Moreover, this method revealed new additional faults not previously identified related to the major basement structure and their extension and depth. These are a set of NE-SW, NW-SE and N-S oriented faults, interpreted as synsedimentary faults.

#### Geographic and geological setting

The Upper Cretaceous and Paleogene series are located in the south-western part of the Moroccan Middle Atlas. On the south-western edge of this intracontinental chain evolve

five Atlantic obedience sedimentary basins: Baqrit-Timahdit-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou and Tirhboula, which are the seat of a thick Campanian-Maastrichtian series (Charroud 1990). The geometry of these basins as well as the nature of their filling are controlled by the remobilization of the North Middle Atlas Fault Zone and related structures (Feddan 1988, Ait Slimane 1989, Charroud 1990). This study presents, therefore, the contribution of aeromagnetic mapping in the lateral delineation of the North Middle Atlas Fault and related structures and examines its possible rooting (Fig. 1).

### Material and methods

The aeromagnetic data used in this work were obtained from the Ministry of Energy Transition and Sustainable Development in paper format.

We use the cartographic tools of the Arc gis software, Oasis montaj (Geosoft 2007, licence from the Ministry of Energy Transition and Sustainable Development).

The aeromagnetic data are then processed using several mathematical techniques in the same software, according to the workflow of extraction in such studies (Fig. 4).

In this work, the horizontal gradient was applied to the RTP grid of the study area, with the aim of detecting and mapping linear structures, identified by sharp variations in the magnetic field (Blakely & Simpson 1986). The revealed structures can be interpreted as geological contacts or underground faults.

The horizontal gradient equation (Cordell & Grauch 1985) is written as:

$$GH(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$$

T is the total field reduced at the pole,  $\frac{\partial T}{\partial x}$  and  $\frac{\partial T}{\partial y}$  are the first horizontal derivatives following respectively x and y.

In order to better characterize the tectonic anomalies and faults in the region, we applied Euler's deconvolution (Thompson 1982, Reid *et al.* 1990), with a structural index equal to zero, which allows us to highlight the depth of the magnetic faults and thus compile the magnetic lineament map of the study area. Thompson (1982) showed that Euler's homogeneity equation can be written as:

$$N(B-T) = \frac{(X-X_0)\partial T}{\partial x} + \frac{(Y-Y_0)\partial T}{\partial y} + \frac{(Z-Z_0)\partial T}{\partial z}$$

(x0, y0, z0): position of the magnetic source;

(x, y, z): position of observation point;

T: total field detected at (x, y, z);

B: regional value of the total field;

N: degree of homogeneity often referred to as the structural index (SI), which characterizes the type of source and the rate of change of the field with distance.

### Results

The depth of the aeromagnetic structures extracted by the Euler solution shows that the geophysical faults generally NE-SW trending have taken a high depth value, namely the major North Middle Atlas Accident F1, the South Middle Atlas Accident F2 and the associated structure of the Oued Maleh ridge F4, in contrast to the Felledi Accident F3 and the Tichoukt F5. These faults have a depth that varies between 11 m and 2400 m according to the Euler solutions (Fig. 10).

The results obtained from the Euler deconvolution method show a compatibility between the horizontal gradient and the geological map of the study area. This arrangement provides important information on the positioning and rooting of geological structures and their role in the distribution of Maastrichtian deposits in the southwestern Middle Atlas.

## INTRODUCTION

Les séries du Crétacé supérieur et du Paléogène se localisent dans la partie Sud-Ouest de la chaîne intracontinentale du Moyen Atlas marocain où évoluent les cinq bassins sédimentaires d'obédience atlantique: Baqrit-Timahdit-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou et Tirhboula, et qui sont le siège d'une épaisse série campano-maastrichtienne (Charroud 1990). La géométrie de ces bassins, ainsi que la nature de leur remplissage sont contrôlées par la remobilisation de la zone d'Accident Nord Moyen Atlasique et des structures annexes (Feddan 1988, Ait Slimane 1989, Charroud 1990).

La partie Sud-Ouest du Moyen Atlas a fait l'objet de nombreuses recherches aux disciplines différentes; sédimentologique, structurale, géodynamique et paléontologique (Feddan, 1988, Ait slimane 1989, Charroud, 1990, Echarfaoui 1991, El Azzab 1998, Hinaje 2004, Mouflih *et al.* 2006, Mhiyaoui *et al.* 2016, Mountaj *et al.* 2019, Chakir *et al.* 2019, El Attmani *et al.* 2021). Ces travaux sont basés sur des observations de terrain pour décrire la géométrie des bassins au niveau de la série maastrichtienne, mais ils n'ont pas démontré le rôle et la profondeur des failles notamment l'Accident Nord Moyen Atlasique et les structures adjacentes dans la répartition des dépôts maastrichtiens. Cette étude présente donc la contribution de la cartographie aéromagnétique pour délimiter latéralement la position de l'Accident Nord Moyen Atlasique et les structures annexes et examiner son prolongement en profondeur.

L'objectif de ce travail est d'affiner l'interprétation qualitative des anomalies magnétiques relevées dans la partie Sud-Ouest du Moyen Atlas marocain, en utilisant des traitements géophysiques, tels que le gradient horizontal (GH) et la déconvolution d'Euler (DE), qui nous permettront de confirmer le prolongement en profondeur de la faille majeure: Accident Nord Moyen Atlasique et leurs structures annexes.

### CADRE GEOGRAPHIQUE ET STRUCTURAL.

La partie Sud-Ouest de la chaîne intracontinentale du Moyen Atlas au Maroc est délimitée essentiellement par plusieurs accidents régionaux, orientés NE-SW, parmi eux l'Accident Nord Moyen Atlasique (ANMA) qui joue un rôle très important et sépare le Moyen Atlas septentrional en deux parties structurellement différentes : le causse moyen atlasique tabulaire au NW et le Moyen Atlas plissée au SE. L'accident Nord Moyen Atlasique correspond à la première ride anticlinale de Colo (1961).

### Cadre géographique

La zone d'étude comprend la partie Sud-Ouest du Moyen Atlas qui est située à l'ouest du méridien Boulemane et appartient au Moyen Atlas plissé. Elle comprend les zones synclinales de Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou et les rides anticlinales adjacentes, le causse et la zone de passage de l'Accident Nord Moyen Atlasique, le synclinal de Baqrit-Timahdit-Guigou et la ride anticlinale adjacente. La structure de la partie étudiée est caractérisée par des zones faillées délimitant de grands dépocentres sous-bassins crétacés à

paléogènes ; Bekrit-Timahdite- Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Bekrit et Ouediksou, majoritairement orientés NE-SW (Ouarhache *et al.* 2012, Mountaj *et al.* 2019) (Fig. 1). Dans le détail, cette zone comprend les éléments structuraux suivants:

L'Accident Nord Moyen Atlasique est constitué par quatre rides sub-parallèles, orientées NE-SW, leur jeu en décrochement senestre synchrone de la sédimentation mésozoïque est attesté par des discordances progressives (Duée *et al.* 1978).

Charroud (1990) a décrit l'influence de cet accident et ces structures annexes sur la sédimentation campano-maastrichtienne:

- La première ride anticlinale de Colo (1961), la ride liasique de Hayane, élément de la ligne structurale majeure de l'Accident Nord Moyen Atlasique qui sépare les bassins résiduels de Baqrit-Timahdit-Guigou et de Bou Anguer, il a contrôlé la répartition des dépôts campano-maastrichtiens dans ces deux bassins.
- La ride d'Oued Maleh est une structure annexe de l'Accident Nord Moyen Atlasique qui sépare les bassins résiduels d'Ain Nokra et Oudiksou, elle a été réactivée au cours du Campanien et du Maastrichtien.
- La ride de Tichoukt a été réactivée durant le Campanien et le Maastrichtien, elle a joué le rôle d'une barrière paléogéographique entre Tighboula et Oudiksou.
- L'accident de Felledi a séparé la structure synforme d'Ain Nokra et de Bou Anguer.

## Cadre structural

La structure du Moyen Atlas est caractérisé par des zones faillées séparant des panneaux tabulaires ou de larges structures synformes majoritairement orientés SW-NE (Ouarhache 2012). Les bassins sédimentaires crétacés (Aptien-Sénonien inférieur) correspondent à des grabens NE-SW limités par des failles normales NNE-SSW à NE-SW, ce sont l'Accident Nord Moyen Atlasique et les structures annexes (Fig. 2) (Hinaje 2004, Hinaje *et al.* 2015).

La géométrie de ces bassins, ainsi que la nature de leur remplissage sont contrôlés par la remobilisation de la zone de l'Accident Nord Moyen Atlasique et des structures annexes (Fedan 1989, Charroud 1990). Ces accidents correspondant généralement à un héritage hercynien, furent réactivés en un contexte extensif pendant le Mésozoïque, puis repris en compression lors des serrages alpins et demeurent souvent le siège d'une activité néotectonique (Charrière 1990, Ouarhache 2012). Les étapes de l'évolution structuro-sédimentaire de cette partie sud-ouest du Moyen Atlas reflète les variations eustatiques que la tectonique locale a perturbé (Charroud 1990).

Les recherches précédentes (Fedan 1988, Ait Sliman 1989, Charrière 1990, Charroud 1990, Ouarhache 2012, Hinaje 2004, Hinaje *et al.* 2015, El Azzab 1998, Mhiyaoui *et al.* 2016, Zafaty 2023) ont été fondées sur la cartographie, le volcanisme et l'évolution géodynamique structuro-sédimentaire de la partie sud-ouest du Moyen-Atlas, en revanche, ils n'ont pas étudié la relation qui combine entre les

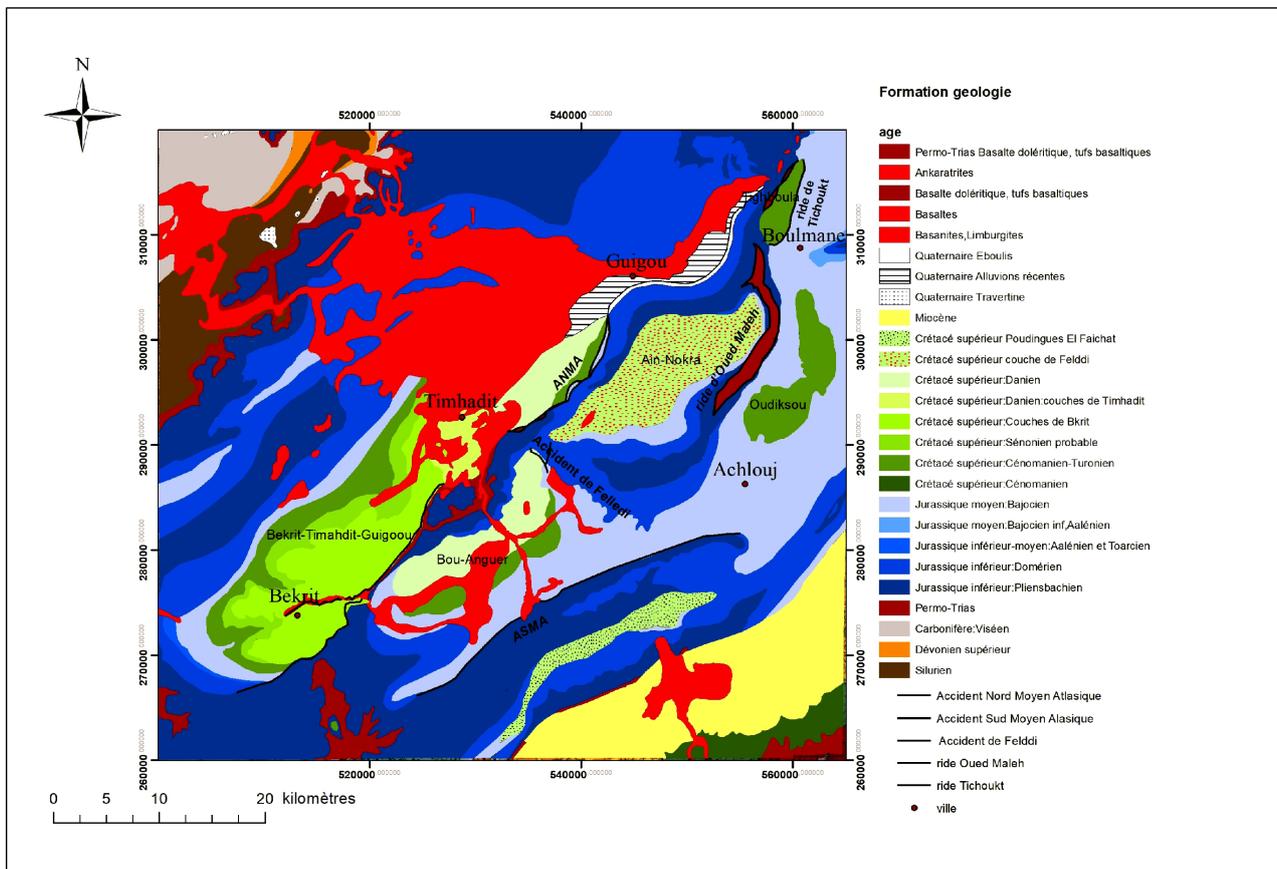


Figure 1. Carte géologique de la zone d'étude, Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas (Termier 1932), digitalisée.  
 Figure 1. Geological map of the study area in the Southwest of the Middle Atlas chain (Termier 1932), digitised.

linéaments géophysiques et les dépôts maastrichtiens. Dans le présent travail, nous exploitons les données aéromagnétiques pour démontrer la relation entre la profondeur de l'Accident Nord Moyen Atlasique et les structures annexes, ainsi que la répartition des dépôts maastrichtiens dans les bassins sédimentaires : Baqrit-Timahdit-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou. Pour résoudre cette complexité, nous allons utiliser les méthodes magnétiques suivantes.

## DONNEES ET METHODOLOGIE

### Données aéromagnétiques

Les cartes aéromagnétiques utilisées dans ce travail ont été obtenues auprès du Ministère Marocain de la Transition Énergétique et du Développement Durable - Direction de la Géologie (levé de 1974 au Moyen Atlas, constitué des lignes de direction NW-SE équidistants de 3 km et des traverses de direction NE-SW espacées de 8 km (Fig. 3)). Pour une altitude barométrique de vol de 2600 m compte tenu du relief qui varie entre 1800 m et 2200 m. Les références géomagnétiques correspondent au levé sont IGRF: Mars 1974, une inclinaison de 47° nord et une déclinaison de 7° ouest.

Pour cette étude, nous avons sélectionné quatre cartes du champ magnétique couvrant les cartes topographiques au 100.000ème d'Azrou, Boulmane, Midelt et Itzer, il s'agit d'un domaine compris entre 4°45'20 à 5°24' de longitude et 32°56'15 à 33°17'60 de latitude.

Les cartes aéromagnétiques afférentes au champ magnétique résiduel (Fig. 3) ont été numérisées et traitées

à l'aide des filtres et des opérateurs mathématiques par le logiciel Oasis Montaj de Geosoft (Geosoft 2007, licence du Ministère de la transition énergétique et développement durable).

### Méthodologie

Les données ont été tirées des cartes, en suivant le processus décrit sur la Figure 4. Les valeurs des contours du champ magnétique résiduel ont été digitalisées au point d'intersection avec les lignes de vol et les lignes de traverse par le logiciel Arc gis et transférées sur une grille à mailles régulières du logiciel Oasis montaj (Geosoft Inc. 2007).

La base de données, obtenue à partir de ces procédures, nous a permis de produire la carte du champ magnétique résiduel, en utilisant les outils cartographiques du logiciel Oasis montaj (Geosoft Inc. 2007). La carte résiduelle a ensuite été traitée par plusieurs techniques mathématiques par le même logiciel (Fig. 4).

La première étape du processus de filtrage consiste à réduire au pôle la carte de l'anomalie magnétique par l'application du filtre RTP (Reduction To the Pole) qui a pour but de replacer les anomalies magnétiques à l'aplomb de leurs sources (Baranov 1957) et de délimiter latéralement les sources magnétiques. Ce filtre est calculé en choisissant la direction de l'IGRF (International Geomagnetic Reference Field) au centre de la carte d'anomalie magnétique (7° Ouest et 47° Nord) à l'époque de l'acquisition (nous avons choisi la date du 01-10-1974) comme une approximation de la direction de l'aimantation.

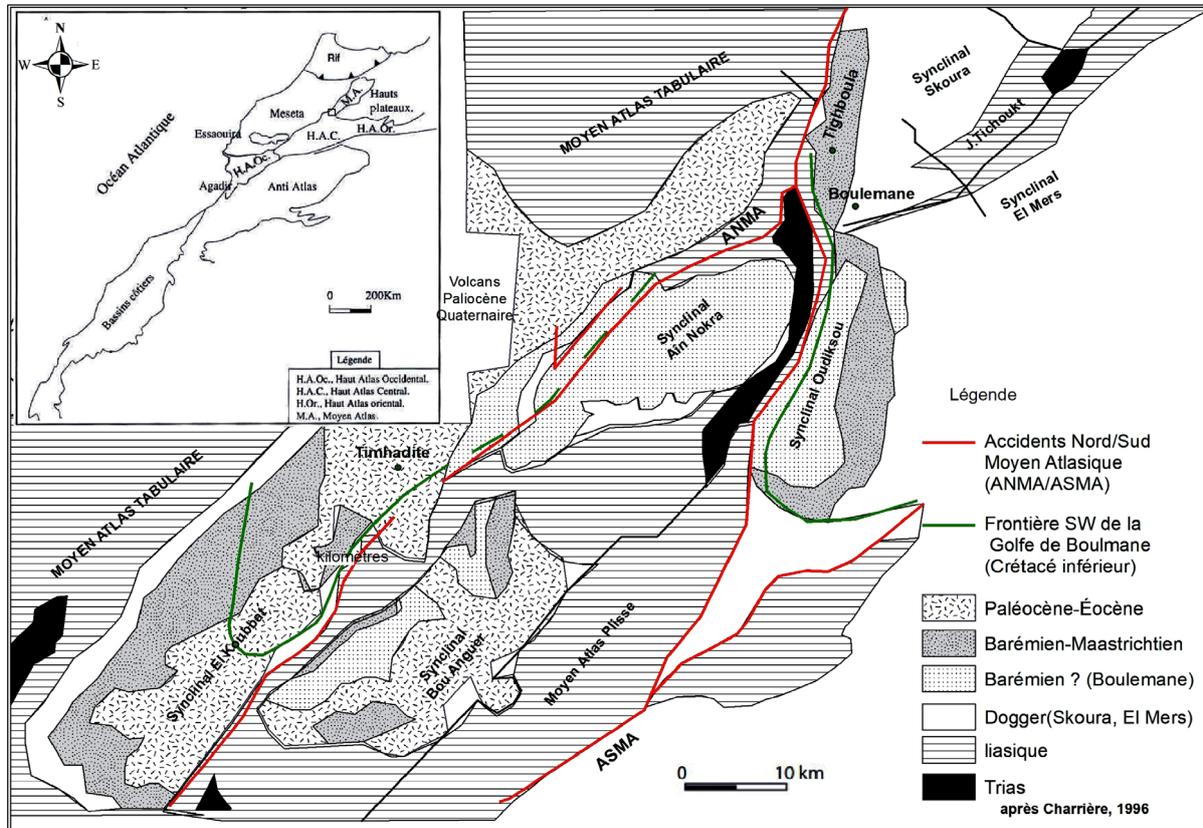


Figure 2. Limites sud-ouest des dépôts du Crétacé Supérieur-Eocène dans les synclinaux du Moyen Atlas (Frizon de Lamotte *et al.* 2008).  
 Figure 2. Southwestern limits of the Upper Cretaceous-Eocene deposits in the Middle Atlas synclines (Frizon de Lamotte *et al.* 2008).

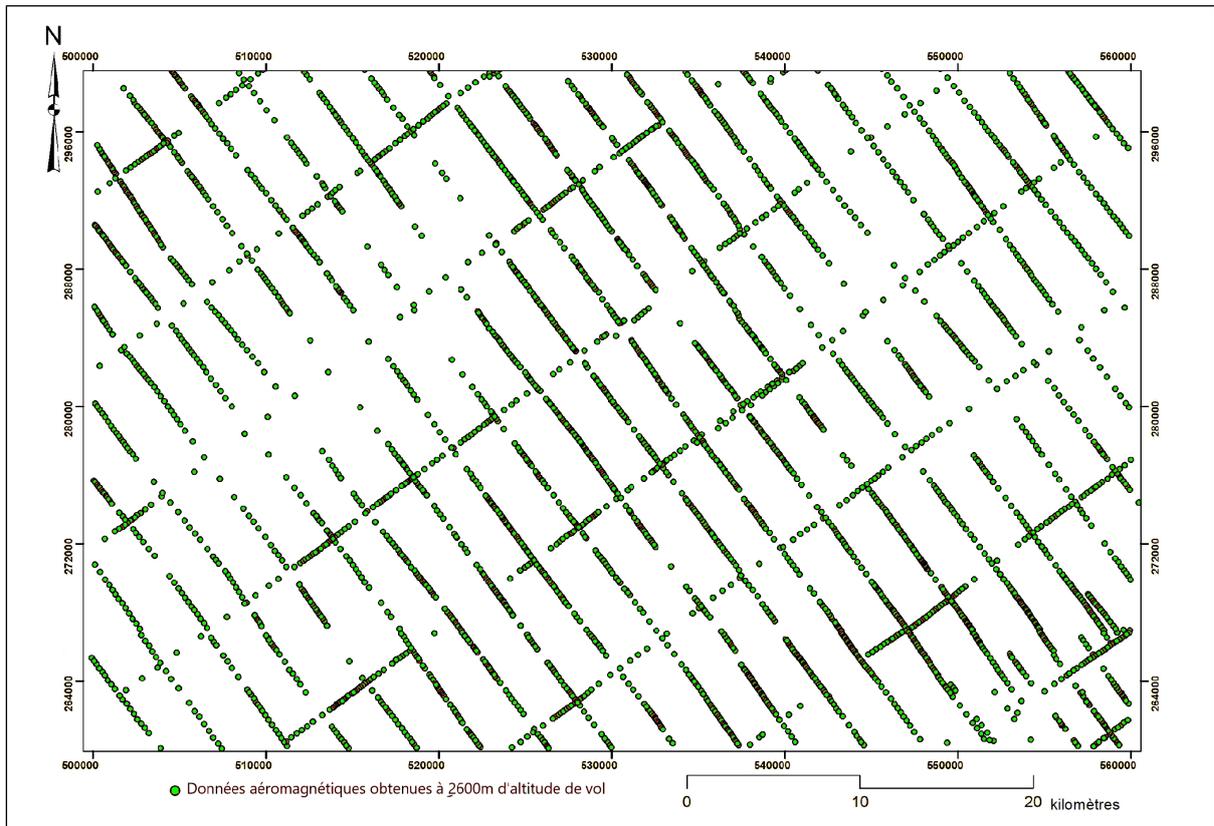


Figure 3. Carte représentative des lignes de vol et des lignes de liaison des levés aéromagnétiques.  
 Figure 3. Representative map of aeromagnetic survey flight lines and link lines.

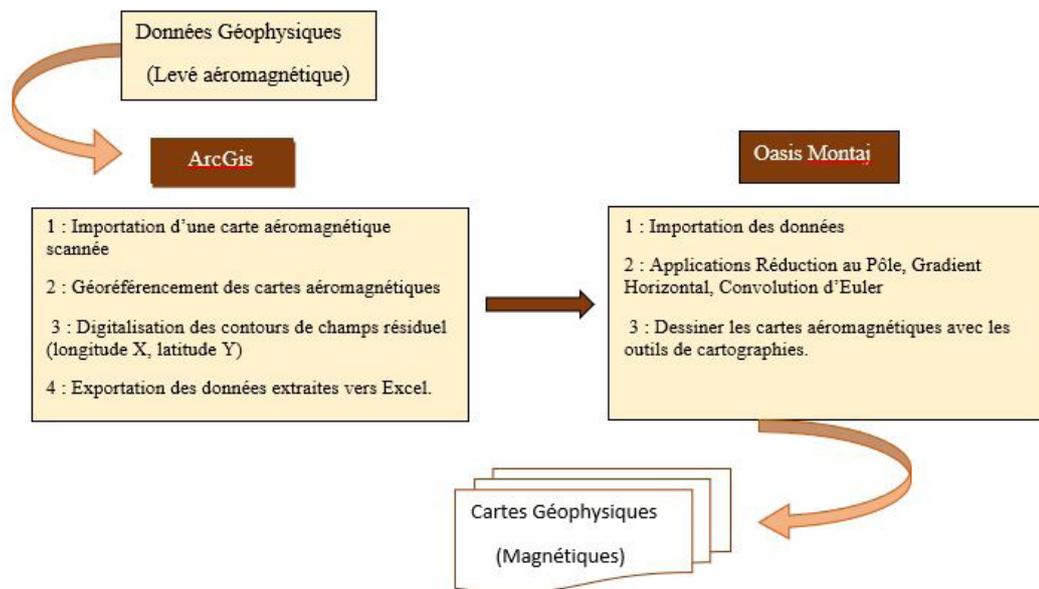


Figure 4. Etapes de travail d'extraction et de traitement des données aéromagnétiques.  
 Figure 4. Aeromagnetic data extraction and processing work steps.

La carte réduite au pôle (RTP) sera utilisée comme carte de base pour les traitements suivants: le gradient horizontal et la déconvolution d'Euler.

Le filtre du gradient horizontal est une approche simple qui consiste à localiser les structures linéaires, telles que les contacts lithologiques et les failles à partir des données géophysiques potentielles (Cordell & Grauch 1985). Cette méthode est efficace pour la détection des bords de source (Cordell 1979, Amiri *et al.* 2011, Azaiez *et al.* 2011, Duffréchou *et al.* 2013, Gabtni *et al.* 2013, Bouya *et al.* 2013a, 2013b, Bouya & El Ouardi 2014, Mhiyaoui *et al.* 2016, Nait Bba *et al.* 2019, Idrissi *et al.* 2021, Benyas *et al.* 2022). Dans le cadre de ce travail, le gradient horizontal a été appliqué à la grille RTP de la zone d'étude dans le but de détecter et de localiser des structures linéaires, identifiées par des variations brutales du champ magnétique (Blakely & Simpson 1986). Les structures révélées peuvent être interprétées comme contacts géologiques ou des failles souterraines.

L'équation du gradient horizontal (Cordell & Grauch 1985) s'écrit comme suit:

$$GH(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$$

T est le champ total réduit au pôle,  $\frac{\partial T}{\partial x}$  et  $\frac{\partial T}{\partial y}$  sont les dérivées premières horizontales suivant respectivement x et y.

Afin de mieux caractériser les anomalies et les accidents tectoniques de la région, nous avons appliqué la déconvolution d'Euler (Thompson 1982, Reid *et al.* 1990).

La méthode de la déconvolution d'Euler permet de localiser et de délimiter les corps magnétiques, les dykes, les contacts géologiques, les cylindres et les sphères selon leur indice structural (SI: Reid *et al.* 1990) (Tab. 1).

Afin de mieux caractériser les accidents tectoniques de la région, nous avons appliqué un indice structural égal à zéro (SI=0), ce qui nous a permis de mettre en évidence la profondeur des anomalies magnétiques et de compiler la carte des linéaments magnétiques de la zone d'étude. Thompson (1982) a démontré que l'équation d'homogénéité d'Euler peut s'écrire comme suit :

$$N(B-T) = \frac{(X-X_0)\partial T}{\partial x} + \frac{(Y-Y_0)\partial T}{\partial y} + \frac{(Z-Z_0)\partial T}{\partial z}$$

( $x_0, y_0, z_0$ ): position de la source magnétique;

( $x, y, z$ ): position de point d'observation;

T: champ total détecté à ( $x, y, z$ );

B: valeur régionale du champ 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 (Tableau.1).

Tableau 1. N valeurs de la source géométrie (Reid *et al.* 1990).

Table 1. N values of source geometry (Reid *et al.* 1990).

Modèle géologique	Indice Structural (N)
Sphère	3
Pipe	2
Cylindre horizontale	2
Dyke/ Sill	1
Contact (Faille)	0

## RESULTATS ET INTERPRETATION

### Analyse des données aéromagnétiques

#### Carte du champ magnétique résiduel

La carte de l'anomalie magnétique résiduelle a été établie par le logiciel Oasis Montaj (Geosoft Inc., 2007). Elle est tracée à l'aide de la méthode d'interpolation minimum courbature (Minimum Curvature) et elle présente des valeurs d'anomalie allant de -92.04 à 80.57 nT. Nous observons sur cette carte d'importantes anomalies de forme d'organisation, d'orientation et d'intensité différentes.

Cette carte montre une importante anomalie d'une forte intensité (rouge sur la figure), allongée NE-SW, située au centre de la carte et qui sépare deux anomalies d'une faible intensité (couleur bleue) (Fig. 5).

#### Carte réduite au pôle

La configuration géométrique des anomalies magnétiques en deux lobes rend difficile l'analyse et l'interprétation des cartes magnétiques.

Pour diminuer les effets de polarité et trouver les sources causales correspondantes des anomalies magnétiques (Baranov 1957, Baranov & Naudy 1964), on introduit la transformation de la réduction au pôle.

L'analyse de la carte du champ magnétique réduit au pôle (Fig. 6) révèle une meilleure définition des anomalies magnétiques. Les anomalies de forte intensité allant de 3.46 à 152.06 nT sont orientées NNE-SSW ou bien N-S / NE-SW (A2, A4 et A5). Les anomalies de faible intensité sont concentrées dans le centre de la carte (A3), sont, aussi orientées NE-SW.

L'analyse de la carte géologique de la zone d'étude montre que les anomalies d'une forte intensité magnétique A2, A4 et A5 sont localisées sur la couverture cénozoïque (Fig. 7), A2 et A4 sont constitués des roches volcaniques de type maar, cône et tufs, et l'anomalie A5 est conciliable avec une activité volcanique du type strombolienne (El Azzouzi *et al.* 2010). En ce qui concerne l'anomalie A3, elle se rencontre dans les bassins résiduels ; Baqrit-Timahdite-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra et Oudiksou

#### Carte du gradient horizontal

Le gradient horizontal est utilisé pour la localisation des contacts et limites des sources magnétiques sur le plan horizontal, il est également utile pour la détection des discontinuités majeures du sous-sol (Bournas 2001, Harrouchi 2017, Idrissi 2021).

Les résultats obtenus à l'aide du gradient horizontal (Fig. 9) déterminent les limites des structures responsables de ces anomalies qui sont présentées sous des formes quasi-linéaires ; les anomalies de faibles intensités sont concentrées au niveau du Mésozoïque. Elles sont liées à des terrains de moyenne à faible aimantation et qui sont les bassins sédimentaires: Baqrit-Timahdit-Guigou, Bou Anguer, Ain Nokra et de Oudiksou, majoritairement orientés SW-NE (Charroud 1990, Ouarhache *et al.* 2012), et séparés dans la région de Bekrit par la ride liasique qui marque la zone de passage de l'Accident Nord Moyen Atlasique. Tandis que les anomalies de forte intensité se calent avec des formations géologiques très aimantées d'âge cénozoïque, ce style structural général se caractérise par l'existence de rides anticlinales étroites intrudées parfois par des roches magmatiques (Termier 1936, Colo 1961, Fedan 1988).

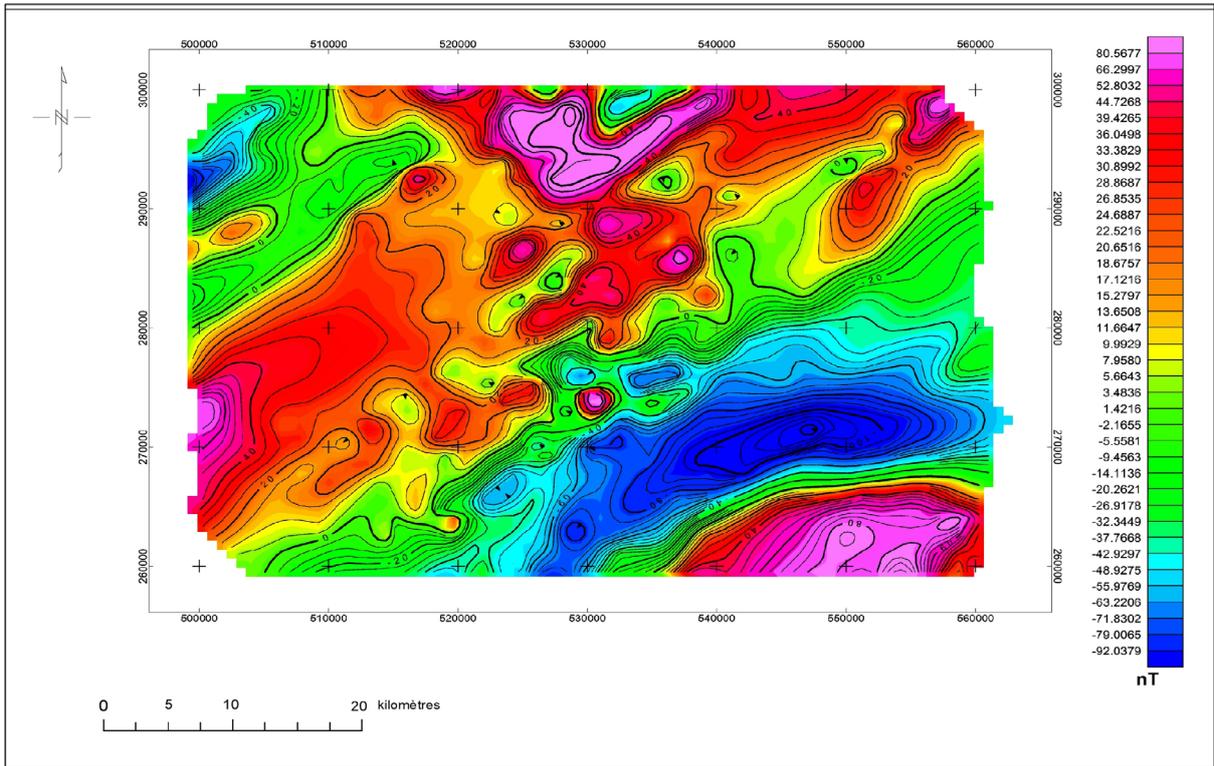


Figure 5. Carte de l'anomalie magnétique résiduelle de la partie Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas.  
 Figure 5. Residual magnetic anomaly map of the southwestern part of the Middle Atlas chain.

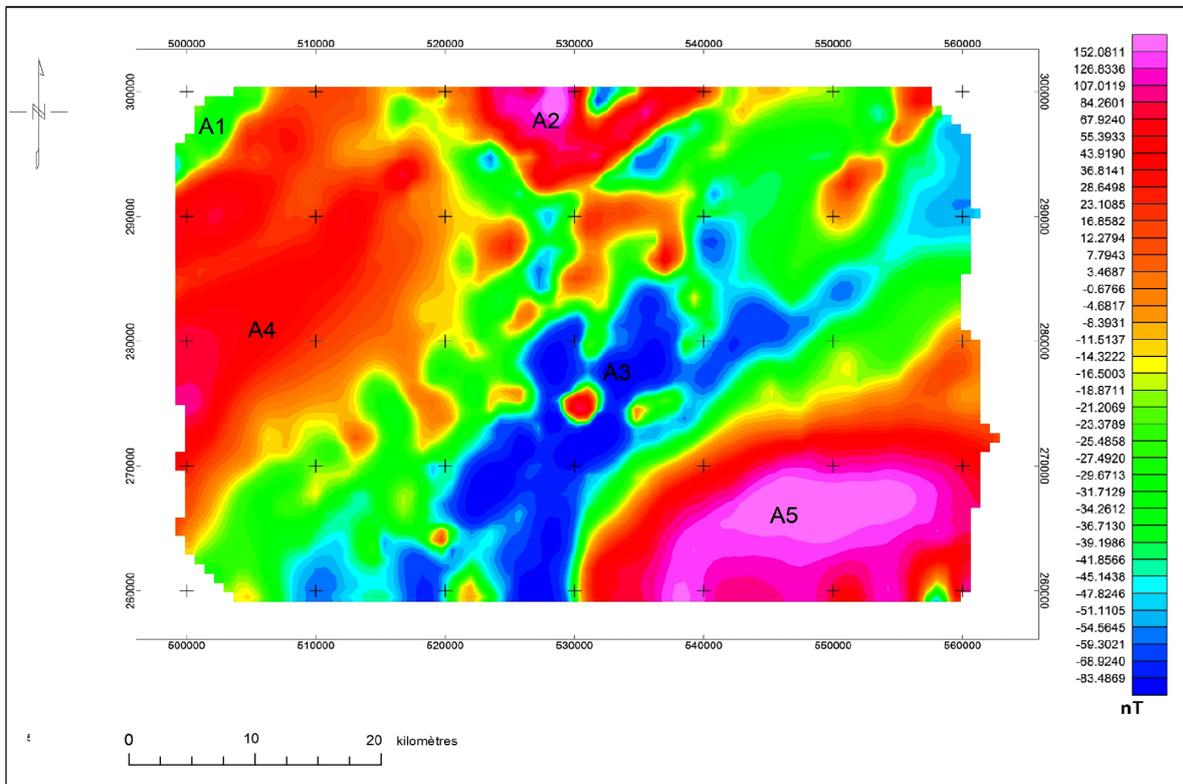


Figure 6. Carte de la réduite au pôle de la partie Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas.  
 Figure 6. Map of the reduced pole area of the southwestern part of the Middle Atlas chain.

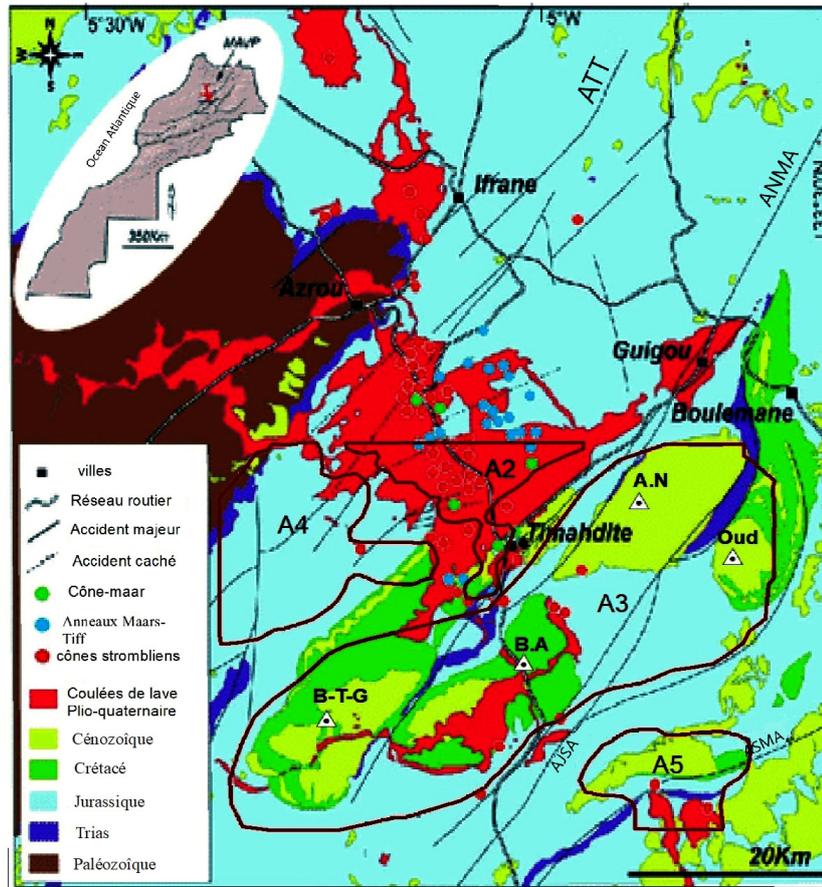


Figure 7. Situation géographique et carte géologique des bassins sédimentaires du Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas (Amine, 2019), montrant la distribution de la couverture méso-cénozoïque, ainsi que la localisation des anomalies A2, A4 et A5 qui sont proches, d'une manière générale, des volcans quaternaires. Abréviations: TTF: Faille de Tizi-n-Tretten; NMAF: Faille du Nord Moyen Atlas; JSAF: Faille de Jbel Sidi Ali; SMAF: Faille Sud du Moyen-Atlas; B-T-G: Baqrit-Timahdite-Guigou; B.A: Bou-Angeur; A.N: Ain-Nokra; Oud: Oudiksou.

Figure 7. Geographic location and geological map of the southwestern sedimentary basins of the Middle Atlas chain (Amine, 2019), showing the distribution of the Meso-Cenozoic cover, as well as the location of the A2, A4 and A5 anomalies which are generally close to Quaternary volcanoes. Abbreviation: TTF: Tizi-n-Tretten Fault; NMAF: North Middle Atlas Fault; JSAF: Jbel Sidi Ali Fault; SMAF: South Middle Atlas Fault; B-T-G: Baqrit-Timahdite-Guigou; B.A: Bou-Angeur; A.N: Ain-Nokra; Oud: Oudiksou.

A partir de la carte du gradient horizontal de la zone d'étude, on a généré un ensemble de linéaments de différentes directions, qui se répartissent dans l'espace selon trois directions (Fig. 8).

La direction NE-SW dominante, la direction NS, la direction EW et la direction NW-SE séparent de larges structures synformes correspondantes aux zones d'accumulation sédimentaire d'âge crétacé supérieur (Fedan 1988).

Les linéaments géophysiques de direction NE-SW sont situés au milieu et dans la partie SE de la carte. Les travaux précédents (Fedan 1988, Charroud 1990, El Azzab 1998, Hinaje 2004, Duée *et al.* 1978, Harmand & Moukadiri 1986) ont associé ces directions aux événements tectoniques correspondants au rejeu de l'ANMA qui est localisé au centre de la carte, et à l'ASMA dans partie SE de la carte.

Les failles de directions N-S, E-W et NW-SE qui délimitent l'accident majeur sont situées au milieu de la carte, elles correspondent aux structures annexes de l'Accident Nord Moyen Atlasique sous forme de rides anticlinales: la ride de l'accident de Felledi, la ride de Tichoukt et la ride d'Oued Maleh (Charroud 1990, Fedan 1988, Colo 1961, Termier 1936).

### La carte de déconvolution d'Euler

La déconvolution d'Euler a été appliquée à la grille RTP, notons que l'indice structural zéro permet la détermination et la localisation des failles et des contacts géologiques (Reid *et al.* 1990), généralement utilisé pour indiquer des failles à grande échelle (Harrouchi *et al.* 2016) et mettre en évidence plusieurs failles de subsurface (Idrissi *et al.* 2021). Dans le présent travail, nous avons effectué plusieurs tests (plus de 30 tests) en faisant varier différents paramètres surtout la taille de la fenêtre et la tolérance, avec un indice structural égal à zéro. Ceci, nous a permis de remarquer que les meilleurs résultats ou regroupements des solutions sont obtenus pour une taille de fenêtre égale à 11, et une valeur de la tolérance de 20 % (Fig. 10). Les profondeurs des structures d'ordre géologique sont d'une valeur allant de 11 à 2477 m.

La carte des solutions d'Euler (Fig. 10) permet de déterminer la position des sources magnétiques qui sont disposées selon des formes linéaires avec leurs profondeurs correspondantes.

Les résultats obtenus montrent une compatibilité avec les résultats du gradient horizontal. Les principaux systèmes des linéaments magnétiques qui forment des failles orientées NE-SW sont principalement représentés par l'Accident Nord

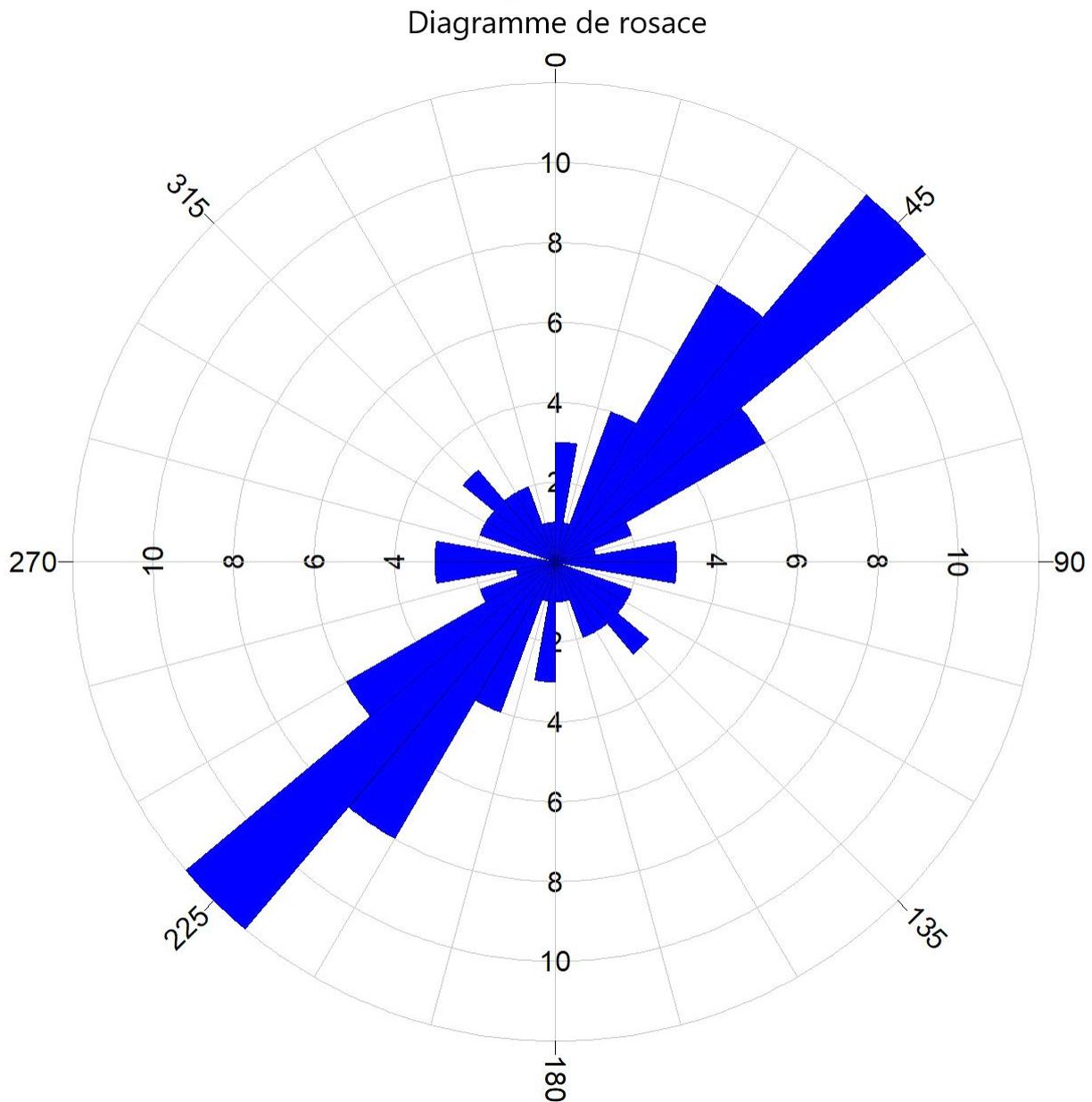


Figure 8. Rosace des orientations des linéaments.  
 Figure 8. Rosette of lineament orientations.

Moyen Atlasique F1 et l'Accident Sud Moyen Atlasique F2, et leurs structures annexes, telles que : la ride de l'accident de Felledi F3, la ride de Tichoukt F5, la ride d'Oued Maleh F4, orientées N-S, NNE-SSW et NW-SE. Ces failles relèvent une profondeur qui varie entre 11 m à 2400 m selon les solutions d'Euler.

### DISCUSSION

La combinaison entre les résultats obtenus selon la carte des déconvolutions d'Euler, gradient horizontal et la carte géologique de la zone SW du Moyen Atlas ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La superposition des linéaments aéromagnétiques avec les systèmes de failles cartographiés (Fig. 11) et la présence du résultat de rosace, à la lumière des études géologiques précédentes, nous ont permis de préciser l'existence, la profondeur et le pendage des grands accidents majeurs Nord

Moyen Atlasique (F1) et Sud Moyen Atlasique ( F2) qui ont orientés NE-SW de profondeur qui dépasse (2477 m) et des pendages N 45°, l'activation de ces failles varisques qui sont orientées NE-SW lors de l'extension triasique a été à l'origine de la formation des premiers dépôts sédimentaires, magmatiques et détritiques (Michard 1976, Mattauer *et al.* 1977, Charrière 1990, Laville & Piqué 1991, Piqué *et al.* 2002, Hinaje 2004, Hinaje *et al.* 2015). Les failles qui sont orientés NW-SE, NNE-SSW, ainsi que les rides anticlinales; la ride de l'accident de Felledi (F3), la ride d'Oued Maleh (F4), de profondeur qui varie entre (11 à 1381 m) et de pendage N 135°/ N15°, contrôlent la sédimentation durant le Mésozoïque et Cénozoïque (Charrière 1990, Piqué *et al.* 2002). Cette superposition a également permis d'illustrer de nouvelles structures de direction N-S et E-W, qui ont été définies en fonction de l'application de gradient horizontal

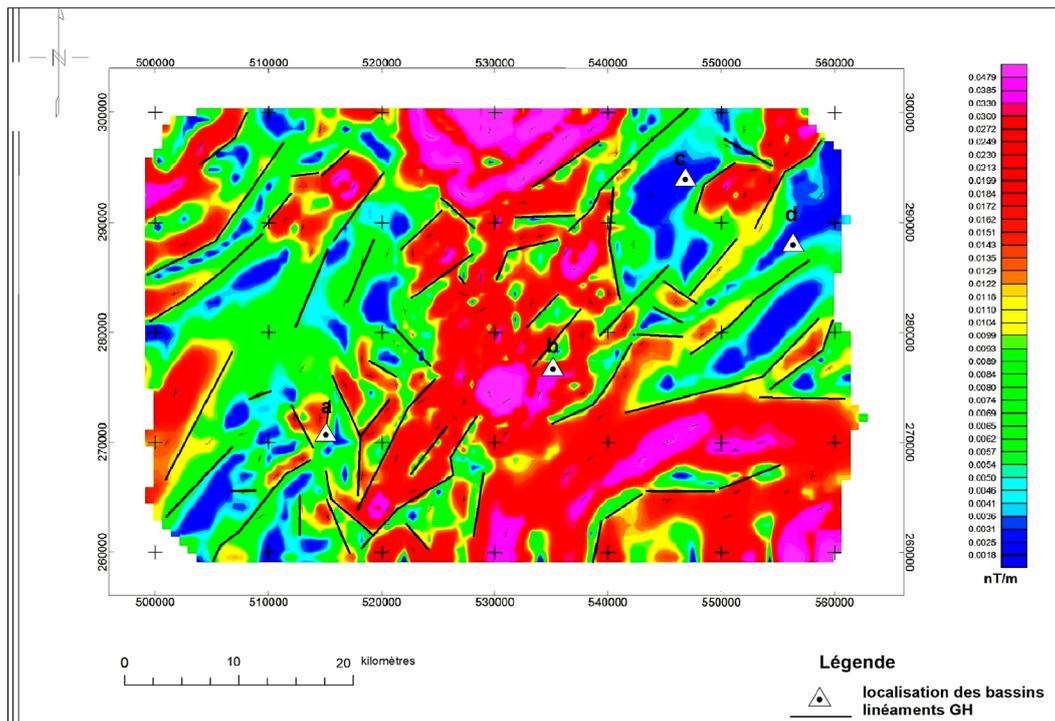


Figure 9. Carte du gradient horizontal de la partie Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas. Localisations des bassins: a) Baqrit-Timahdite-Guigou; b) Bou-Angeur; c) Ain-Nokra; d) Oudiksou.

Figure 9. Horizontal gradient map of the southwestern part of the Middle Atlas chain. Basin locations: a) Baqrit-Timahdite-Guigou; b) Bou Angeur; c) Ain Nokra; d) Oudiksou.

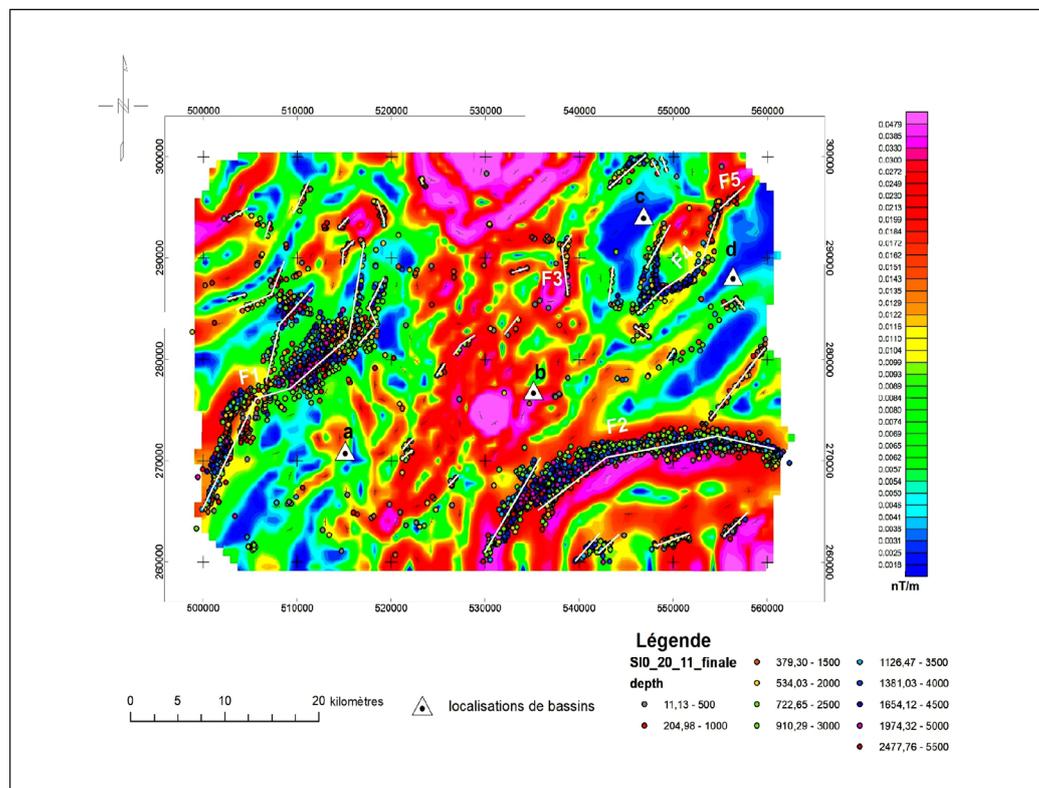


Figure 10. Carte de la distribution spatiale des solutions de la déconvolution d'Euler, (indice structural : IS=0), superposée à la carte du gradient horizontal de la partie Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas. Localisations des bassins: a) Baqrit-Timahdite-Guigou; b) Bou Angeur; c) Ain Nokra; d) Oudiksou.

Figure 10. Map of the spatial distribution of Euler deconvolution solutions, (structural index: IS=0), superimposed on the horizontal gradient map of the south-western part of the Middle Atlas chain. Basin locations: a) Baqrit-Timahdite-Guigou; b) Bou Angeur; c) Ain Nokra; d) Oudiksou.

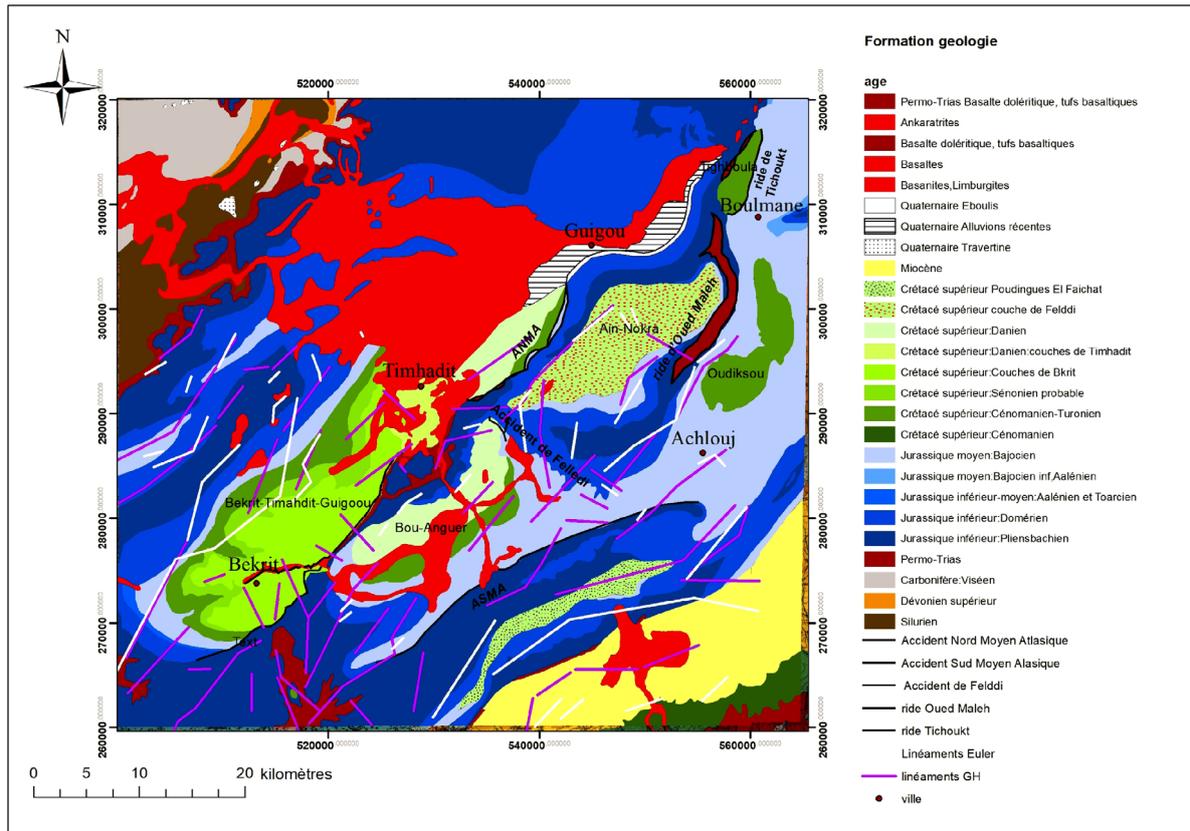


Figure 11. Linéaments aéromagnétiques de la zone d'étude, superposés sur la carte géologique au 1/200.000 de la partie Sud-Ouest de la chaîne du Moyen Atlas.

Figure 11. Aeromagnetic lineaments of the study area, superimposed on the geological map of the southwestern part of the Middle Atlas chain.

et déconvolution d'Eleur, de pendage ( $N5^\circ/N90^\circ$ ) et de la profondeur varie entre (11 à 1654m).

- La comparaison entre les données magnétiques de la carte RTP (Fig. 6) et la carte géologique montre que les anomalies d'une forte intensité magnétique A2 et A4 sont localisées sur la couverture cénozoïque (Fig. 7), constituée des roches volcaniques de type maar; marquée par des dépôts conglomératiques et de calcaire rose de l'Eocène, ainsi que de basaltes des cônes volcaniques constitués de scories, de tufs, de bombes et de laves cordées. L'âge de cette dernière activité volcanique est de  $0,67 \pm 0,09$  Ma. (El Azzouzi *et al.* 2010). Vers le Sud-Est, au niveau de la zone de passage de l'accident d'Aït Oufella (A.S.M.A), on trouve l'anomalie A5 compatible avec une activité volcanique de type strombolienne d'âge pliocène moyen supérieur. Elle est datée à  $2,27 \pm 0,13$  Ma (El Azzouzi *et al.* 2010). En revanche l'anomalie A3 est située sur une couverture de séries méso-cénozoïques des bassins résiduels Bekrit-Timahdite- Guigou, Bou Anguer, Aïn Nokra, Bekrit et Oudiksou, majoritairement orientés NE-SW (Ouarhache *et al.* 2012, Mountaj *et al.* 2019). Cette variation d'anomalie est due à un changement au niveau des formations géologiques et à l'aspect structural de la région d'étude.

- Les corrélations lithostratigraphiques, acquises par Charroud (1990) (Fig. 12), montrent l'épaississement de la série campano-maastrichtienne au sud-ouest du Boulemane, ces variations sont liées à la réactivation de l'Accident Majeur Nord Moyen Atlasique et ces structures annexes au cours du Campanien-Maastrichtien (Fedan 1988, Aït Slimane 1989, Charroud 1990), qui bordent les structures synclinales (Zafaty

2023), Bekrit-Timahdite- Guigou, Bou Anguer, Aïn Nokra, Bkrite et Oudiksou. On peut déduire donc que ces structures ont un rôle important sur la subsidence du bassin sédimentaire au SW de Boulemane durant le Crétacé supérieur, avec un approfondissement progressif en allant du SW vers le NE.

Cet agencement fournit des informations importantes sur le positionnement et l'approfondissement des structures géologiques et leur rôle sur la répartition des dépôts maastrichtiens dans le Sud-Ouest du Moyen-Atlas.

## CONCLUSION

Les linéaments structuraux extraits par la méthode du Gradient Horizontal et de déconvolution d'Euler appliqué aux données aéromagnétiques a révélé un résultat significatif en ce qui concerne la localisation et la profondeur des structures géologiques d'une manière précise à leurs sources réelle, les principaux contacts structuraux qui sont orientés NE-SW et NW-SE, notamment l'Accident Nord Moyen Atlasique, l'Accident Sud Moyen Atlasique et l'accident d'Oued Maleh et l'accident de Felledi. Ils ont également permis et de mettre en évidence d'autres structures de subsurface de directions N-S et E-W qui se caractérisent par des profondeurs importantes (méthode d'Euler). L'influence de ces failles est marquée par la subsidence des bassins Baqrit-Timahdite-Guigou et Oudiksou et le soulèvement des structures synformes de Bou Anguer, Aïn Nokra et Tighboula au cours du Campano-Maastrichtien (Feddan 1988, Charroud 1990, Andreu & Tronchetti 1996). Ces interprétations corroborent les résultats obtenus à partir de l'analyse des données aéromagnétiques.

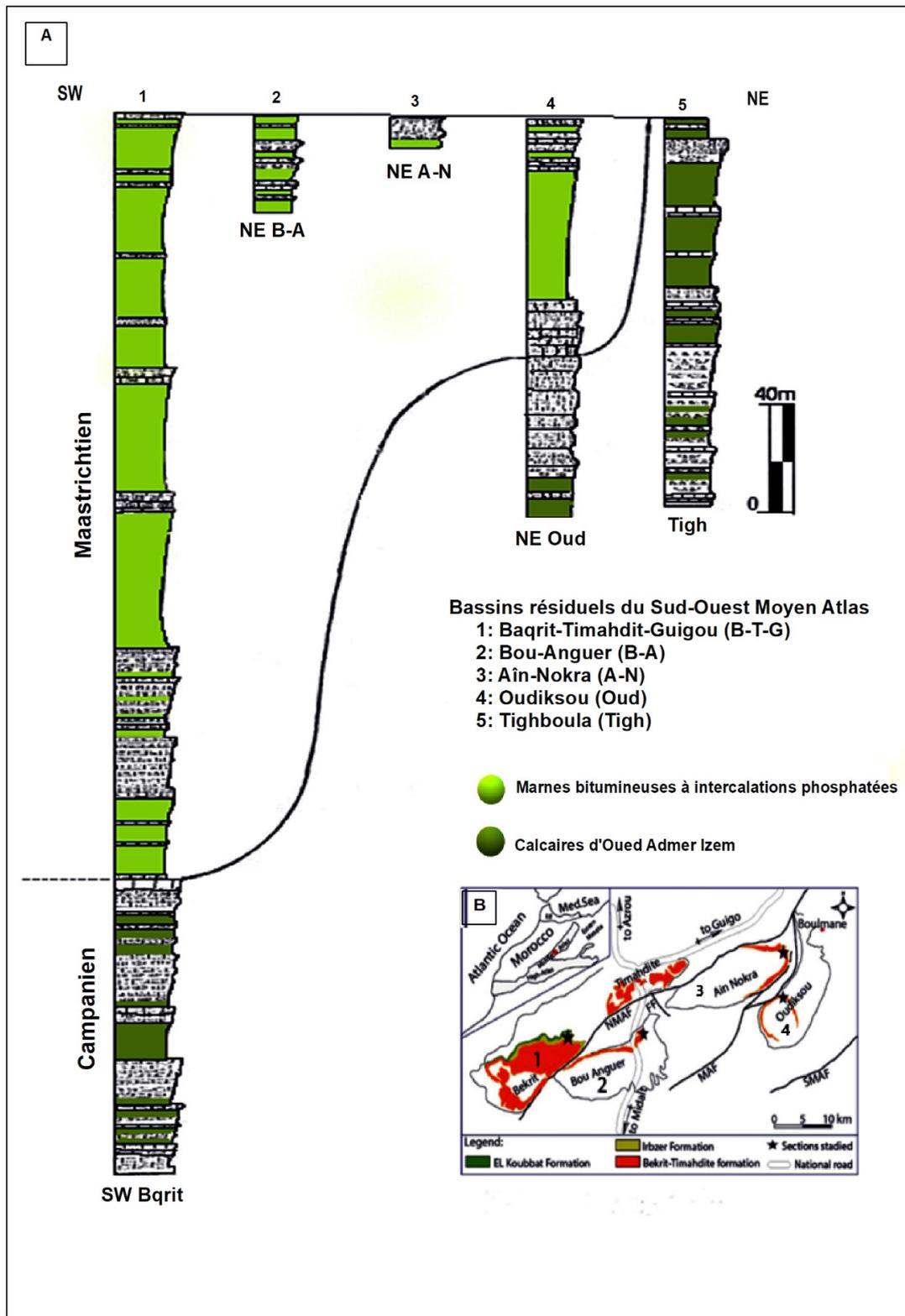


Figure 12. A: Corrélation du Campano-Maastrichtien à l'échelle de tous les bassins résiduels (Charroud 1990). B: Carte schématique de la partie sud-ouest du Moyen Atlas. Faille de Felledi (FF), Faille Nord Moyen Atlasique (NMAF), faille Moyen Atlasique (MAF), faille Sud Moyen Atlasique (SMAF), (El Attmani 2021).

Figure 12. A: Campanian-Maastrichtian correlation at the scale of all residual basins (Charroud 1990). B: Schematic map of the southwestern part of the Middle Atlas. Felledi Fault (FF), North Middle Atlas Fault (NMAF), Middle Atlas Fault (MAF), South Middle Atlas Fault (SMAF), (El Attmani 2021).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions le Ministère de la transition énergétique et développement durable - Direction de la Géologie de nous avoir fourni les données aéromagnétiques en format papier. Les évaluateurs anonymes et l'Editeur du journal Hamid Slimani sont remerciés pour leurs commentaires et suggestions.

## REFERENCES

- Abdelmounji A. 2019. Geomorphological classification and landforms Inventory of the middle-atlas volcanic province (morocco): scientific value and educational potential. *Quaestiones Geographicae*, 38(1), 107–129.
- Aït Slimane A. 1989. *Evolution structuro-sédimentaire paléogène de la partie Sud-Ouest du Moyen Atlas (Baqrit-Timahdite-Guïgou, Bou Anguer, Ain Nokra, Oudiksou)*. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Faculté des Sciences de Marrakech, 179 p.
- Aït Slimane A., Charroud M. & Fedan B. 1989. Le Paléogène du Moyen Atlas, évolution structuro-sédimentaire et paléogéographie. Résumés d'actes du colloque de géologie Franco-Marocain. Strasbourg, 14–26 Mai 1989, CIFEG 1989/16 pp. 9.
- Amiri A., Chaqui A., Hamdi I. *et al.* 2011. Role of preexisting faults in the geodynamic evolution of northern Tunisia, insights from gravity data from the Medjerda Valley. *Tectonophysics*, 506, 1–10.
- Andreu B. & Tronchetti G. 1996. Ostracodes et foraminifères du Crétacé supérieur du synclinal d'El Koubbat, Moyen Atlas, Maroc. *Geobios*, 29, 1, 45–71.
- Azaiez H., Gabtni H., Bouyahya I. *et al.* 2011. Lineaments extraction from gravity data by automatic lineament tracing method in Sidi Bouzid Basin (central Tunisia): structural framework inference and hydrogeological implication. *International Journal of Geosciences*, 2, 373–383.
- Baranov V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudogravimetric anomalies. *Geophysics*, 22, 359–383.
- Baranov V. & Naudy H. 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29, 67–79.
- Benyas K., Aarab A., Lakhloufi A. *et al.* 2022. Contribution of the Airborne Magnetic Field to the Structural Study of the Variscan Granitoid of Rehamna, Morocco. *The Iraqi Geological Journal*, 21–39.
- Blakely R.J. & Simpson R.W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494–1498.
- Bournas N. 2001. *Interpretation des données aérogeophysiques acquises au-dessus du Hoggar oriental*. Thèse Doctorat d'état, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Faculté des Sciences de la Terre de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire, Alger, *Algeria*, 250 p.
- Chakir S., Slimani H., Hssaida T. *et al.* 2019. Dinoflagellate cyst evidence for the age, palaeoenvironment and paleoclimate of a new Cretaceous–Paleogene (K/Pg) boundary section at the Bou Angueur syncline, Middle Atlas, Morocco. *Cretaceous Research*, 106, 104219.
- Charrière A. 1990. *Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc)*. Thèse ès Sciences, Université Paul Sabatier, Toulouse, 589 p.
- Charroud M. 1990. *Evolution géodynamique de la partie sud-ouest du moyen atlas durant le passage jurassique-crétacé, le crétacé supérieur et le paléogène : un exemple d'évolution intraplaque*. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 234 p.
- Colo G. 1961-1964. Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. 2 volumes. *Notes et Mémoires du Service géologiques Maroc*, n° 139 bis, 226.
- Cordell L. 1979. Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe Country and the Espanola Basin, New Mexico. *In: Ingersoll R.V. (Ed.), 30th Field Conference, New Mexico Geological Society, Guidebook to Santa Fe Country, Socorro, NM, USA*, pp. 59–64.
- Cordell L. & Grauch V.J.S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the san Juan Basin, New Mexico. *In: Hinze W.J. (Ed.), The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps, Society of Exploration Geophysicists., Tulsa, USA, Chapter 16*, pp. 181–197.
- Duée G., Hervouët Y., Laville E. *et al.* 1978. L'Accident Nord Moyen Atlasique dans la région de Boulemane (Maroc) : une zone de coulissement synsédimentaire. *Annales de la Société géologique Nord, France XCVIII*, 98, 145–162.
- Dufréhou G., Harris L.B. & Corriveau L. 2013. Tectonic reactivation of transverse basement structures in the Grenville orogeny of SW Quebec, Canada: insights from gravity and aeromagnetic data. *Precambrian Research.*, 241, 61–84.
- Echarfaoui, H. 1991. *Etude micropaléotologie et sédimentologie du Lias-Dogger du synclinal de Bekrit (Causse Moyen Atlasique, Maroc)*. Thèse Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Mohamed V, Rabat, Maroc.
- El Azzab D. & El Wartiti M. 1998. Mise en place de la chaîne volcanique du moyen Atlas (Maroc) : Traitement des données aéromagnétiques. *Pangea*, 29, 45–51.
- El Azzouzi M., Maury R. C., Bellon H. *et al.* 2010. Petrology And K-Ar Chronology Of The Neogene-Quaternary Middle Atlasbasaltic Province, Morocco. *Bulletin de la Société géologique de France*, 181(3), 243–257.
- El Attmani M., Bouwafoud A., Elouariti S. *et al.* 2021. Late Cretaceous-Paleogene Formation of the Bekrit Syncline, Middle Atlas, Morocco: Sedimentology, Geochemistry, Palynology and Palaeoenvironments. *Open Journal of Chemistry*, 11(3), 61–80.
- Fedan B. 1988. *Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements : (Moyen-Atlas, Maroc) durant le Méso-Cénozoïque*. Thèse Doctorat d'Etat Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 338 p..
- Fedan B. 1989. *Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements: le Moyen Atlas durant le Méso-cénozoïque*. Thèse Doct. Es-Sciences, Faculté des Sciences, Rabat, 338 p., et Travaux de l'Institut Scientifique Scientifique, Série Géologie et Géographie Physique, 18, 144 p.
- Frizon de Lamotte D., Zizi M., Missenard Y. *et al.* 2008. Atlas System: Continental Evolution. *In: Michar et al. (Eds.), The Geology of Morocco: Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction*, pp. 133–202.
- Gabtni H., Jallouli C., Mickus K. *et al.* 2013. Geodynamics of the southern Tethyan Margin in Tunisia and Maghrebian domain: new constraints from integrated geophysical study. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 271–286.
- Harmand C. & Moukadiri A. 1986. Synchronisme entre tectonique compressive et volcanisme alcalin : exemple de la province quaternaire du Moyen Atlas (Maroc). *Bulletin de la Société géologique de France*, (8), 2(4), 595–603.
- Harrouchi L. 2017. *Développement de méthodes analytiques et numériques de traitements et d'interprétations de données de*

- champ de potentiel. Application à l'étude de l'In Ouzzal et des zones adjacentes.* Thèse d'état, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne, Alger, Algeria, 70 p.
- Harrouchi L., Hamoudi M., Bendaoud A. *et al.* 2016. Application of 3D Euler deconvolution and improved tilt angle to the aeromagnetic data of In Ouzzal terrane, western Hoggar, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(7), pp. 508.
- Hinaje S. 2004. *Tectonique cassante et paléochamps de contraintes dans le moyen atlas et le haut atlas central (Midelt-Errachidia) depuis le trias jusqu'à l'actuel.* Thèse de Doctorat d'Etat, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 363p.
- Hinaje S., Charroud L., Ait Brahim L. *et al.* 2015. Événements tectono-sédimentaires, paléocontraintes crétacés-cénozoïques et structuration diachrone du Moyen Atlas et du Haut Atlas central Marocains. *ScienceLib, Editions Mersenne*, 7(150409).
- Idriss A., Saadi M., Manar A. *et al.* 2021. Contribution of aeromagnetic cartography and lithostratigraphic studies to the identification of blind faults and the Cambrian deposits geometry in Jbel Saghro (eastern Anti-Atlas, Morocco), *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 62(1), 101–118.
- Geosoft Inc., 2007: Oasis montaj. [//www.geosoft.com/media/uploads/resources/brochures/OM-b-2008-10-web.pdf](http://www.geosoft.com/media/uploads/resources/brochures/OM-b-2008-10-web.pdf).
- Laville E. & Piqué A. 1991. La Distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque ; le rejeu des structures hercyniennes. *Bulletin de la Société géologique de France*, 162 (6), 1161–1171.
- Mattauer M., Tapponnier P. & Proust F. 1977. Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales ; l'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3), 521–526.
- Mhiyaoui, H. *et al.* 2016. Structures profondes du volcanisme quaternaire du Moyen Atlas central (Maroc) : Apports de la cartographie aéromagnétique. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre*, 38, 111–125.
- Michard A. 1976. Eléments de géologie Marocaine. *Notes et Mémoires du Service géologiques du Maroc*, 252, 408 p.
- Mouflih M., Samih A., Chellai E.H. *et al.* 2006. Les Cortèges Phosphatés et Bitumineux du Moyen Atlas : Contexte Sédimentologique et Génétique. *Notes et Mémoires du Service géologiques Maroc*, 514, 57–64.
- Mountaj S., Toufik R., Lakroud K. *et al.* 2019. The Volcanic Field of the Middle Atlas Cause: Highlights and Heritage Appropriation. *The Geographical Bulletin*, 60, 127–147.
- Nait Bba A., Boujamaoui M., Amiri A. *et al.* 2019. Structural modeling of the hidden parts of a Paleozoic Belt: insights from gravity and aeromagnetic data (Tadla Basin and Phosphates Plateau, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 151, 506–522.
- Ouarhache D., Charrière A., Charlot-Prat F. *et al.* 2012. Chronologie et modalités du rifting triasico-liasique à la marge sud-ouest de la Téthys alpine (Moyen Atlas et Haute Moulouya, Maroc) ; corrélations avec le rifting atlantique : simultanéité et diachronisme. *Bulletin de la Société géologique de France*, 2012, 183(3), 233–249.
- Piqué A., Tricart P., Guiraud R. *et al.* 2002. The Mesozoic-Cenozoic Atlas belt (North Africa): an overview. *Geodinamica Acta*, 15 (3), 185–208.
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H. *et al.* 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80–91.
- Termier H. 1936. Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen-Atlas septentrional. *Notes et Mémoires du Service Mines et Carte géologiques Maroc*, 33, 1566 p.
- Thompson D.T. 1982. EUDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31–37.
- Zafaty O., Oukassou M., Hicham M. *et al.* 2023. Integrated remote sensing data and field investigations for geological mapping and structural analysis. The case of SW Tichoukt ridge (Middle Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 198, 104784.

Manuscrit reçu le 17/10/2022

Version révisée acceptée le 06/11/2023

Version finale reçue le 10/11/2023

Mise en ligne le 17/11/2023