

Géophysique interne

Principales lignes structurales du Maroc nord-oriental : apport de la gravimétrie

Touria Chennouf^{a,*}, Driss Khattach^a, Abdellah Milhi^b,
Pierre Andrieux^c, Pierre Keating^d

^a *Laboratoire de géosciences appliquées (LGA), faculté des sciences, BP 524, Oujda, Maroc*

^b *École pratique des mines de Touissit, Touissit par Oujda, Maroc*

^c *Département de géophysique appliquée, université Paris-6, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France*

^d *Commission géologique du Canada, 601, rue Booth, Ottawa (Ontario), K1A 0E8, Canada*

Reçu le 12 décembre 2006 ; accepté après révision le 26 mars 2007

Disponible sur Internet le 23 mai 2007

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Le présent travail, basé sur les différentes techniques de traitement des données gravimétriques couvrant le Maroc nord-oriental (gradient horizontal, prolongement vers le haut, déconvolution d'Euler), a permis de mettre en évidence les différentes structures géologiques présentes dans la région (faille, bassin, diapir...), qui sont parfois partiellement ou totalement masquées par la couverture sédimentaire. Une carte structurale du secteur a été dressée à partir de ces résultats, qui confirme l'existence de failles déjà reconnues ou supposées par les études structurales classiques en précisant leur tracé et pendages, et met en évidence de nouveaux accidents profonds ou superficiels, restés inconnus jusqu'à nos jours. Les accidents les plus profonds sont orientés essentiellement suivant deux directions : N080°–085° et N055°–065°, avec une dominance de cette dernière famille ; leur profondeur peut aller jusqu'à 4500 m. Les directions N080°–085° correspondent aux failles de Kbdana, de Sidi Bouhouria, de Naima et de Guefait, et les directions N055°–065° correspondent à la faille de Ras El Ma (parallèle à la côte méditerranéenne) et aux failles de Moulouya, de Madagh, d'Angad et des Zekkara. *Pour citer cet article : T. Chennouf et al., C. R. Geoscience 339 (2007).*

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

Abstract

Major structural trends in northeastern Morocco: The contribution of gravimetry. The present work is based on various filtered maps (horizontal derivative, upward continuation) and Euler deconvolution of the gravity data from northeastern Morocco. These results allow the delineation of many geological structures, such as faults, basins, or diapirs. Some of these structures are hidden totally or partially by the Mesozoic and Cenozoic cover. The results were used to make a structural map of the study area; this map confirms the existence of several faults, localised or inferred, from former geological studies. It complements information on some of them and outlines a great number of deep or near-surface faults that had remained unknown until the present time. The major features show two principal directions: N080°–085° and N055°–065°, with a predominance of the latter, and their depth can reach 4500 m. The N080°–085° directions correspond to the Kbdana, Sidi Bouhouria, Naima, and Guefait faults, and the

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : chennouf@sciences.univ-oujda.ac.ma (T. Chennouf), khattach@sciences.univ-oujda.ac.ma (D. Khattach), andrieux@ccr.jussieu.fr (P. Andrieux), PKeating@NRCan.gc.ca (P. Keating).

N055°–065° directions correspond to a fault parallel to the Mediterranean coast and the Moulouya, Madagh, Angad, and Zekkara faults. **To cite this article:** T. Chennouf et al., C. R. Geoscience 339 (2007).

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

Mots clés : Maroc nord-oriental ; Gravimétrie ; Gradient horizontal ; Prolongement vers le haut ; Déconvolution d'Euler ; Carte structurale

Keywords : Northeastern Morocco; Gravity; Horizontal derivative; Upward continuation; Euler deconvolution; Structural map

Abridged English version

Most structural studies in northeastern Morocco have been based on direct observation of outcrops, or on indirect interpretation techniques, such as morpho-structural analysis, aerial photography and remote sensing. However, these techniques remain unusable over the plains, as the structures are totally or partially hidden by the Cenozoic and Quaternary cover; moreover, many major deep features are expressed at the surface by an adaptation of the sedimentary cover in the shape of folds, or flexures, and remain difficult to observe. The purpose of the present work is to use gravity data to improve the knowledge on the structure of the basement of northeastern Morocco.

Northeastern Morocco spreads between the Mediterranean Sea to the north and the High Plateaus to the south; it shows a succession of mountain ranges (Kebdana, Beni Snassen, and the Oujda–Taourirt mountains) that delimit two depressions (the Triffa plain in the north and the Taourirt–Oujda corridor in the south) (Fig. 1). The morphology of these zones results from the superposition of several Alpine tectonic phases. After the Hercynian orogeny, the first tectonic events subjected the area to a distension that began in the Trias and continued during Jurassic times [15,16,18]. A compressive mode started in the Late Cretaceous, with a paroxysm in the Late Miocene; it is at the origin of an Atlasic folding, with a large radius of curvature and an average direction N070°–N090°, of a combined strike-slip faults set (NW–SE and NE–SW) and of reverse faults with the same direction, as the ENE–WSW Atlasic folds.

The Palaeozoic series are recognized in the restricted inliers that pierce the Mesozoic and Cenozoic cover. Cambro-Ordovician, Silurian, Devonian, and Carboniferous are recognized in different inliers. Particularly, the flyschoid Devonian deposits crop out extensively in the Beni Snassen inliers. The Palaeozoic formations are crossed by granitic bodies dated to Late Carboniferous to Early Permian.

The sedimentary cover is formed by a thick succession of essentially Lower and Middle Mesozoic carbonates, marls and a few sandstones; the base of the

succession is composed by the fluvatile, evaporate sediment and dolerite flow attributed to Trias–Lias times [19,21,22]. Everywhere, the Jurassic series correspond to thick limestones and marls. The Cretaceous and Tertiary deposits are concentrated in the northern part of the area and in the Taourirt–Oujda corridor. The Quaternary series are thin and show the lacustrine and basalts flow essentially in the northern part of the studied region.

The principal and immediate information that the classic Bouguer anomaly map provides is the distribution of heterogeneities of rocks density. Inspection of the Bouguer anomaly map of the study area (Fig. 2) reveals the existence of several positive and negative anomalies. Gravity highs are well correlated with mountain ranges reflecting the Palaeozoic basement uplift in Beni-Snassen, Kebdana, and Oujda-Taourirt belts; gravity lows over the Triffa plain and the Taourirt–Oujda corridor are associated with the filling of these areas by light sediments. These zones are delimited by strong gradients. In order to make better use of these data, we used various filtering techniques, Euler deconvolution and a multiscale analysis of the geological contacts based on the horizontal gradient at a series of upward continuation heights [1,2,12]. The success of these interpretation techniques was shown in many studies [4,5,8,13,14].

The gravity field above the vertical contact between rocks of different densities shows a top on the side of the low-density rocks and a bottom on the side of the high-density rocks. The inflection point is located just above the contact. The location of the maximum of the horizontal gradient outlines the contact; in the case of a dipping contact, the maximum stays close to the contact, but moves in the down-dipping direction with increasing depths or equivalently with increasing upward continuation heights [2,6,8]. The superimposition of horizontal derivative maxima from the Bouguer anomaly and from its upward continuation at several heights up to 3000 m by steps of 250 m (Fig. 3A) shows alignments outlining the contacts and gives information about their dip. The statistical analysis of the various contacts interpreted as faults (Fig. 3B) indicates four major fault patterns: N00, N050°–070, N130°–145°,

and N080°–095°, with a clear predominance of the last family. The comparison of these results with previous structural maps and studies in northeastern Morocco confirms the existence of many faults already observed or supposed, completes information on some of them and denotes a great number of major or surface faults that remained unknown until now.

When we superimpose the maxima calculated from Bouguer anomaly maps extended upward as far as altitudes of 2000 m, 2500 m, and 3000 m (Fig. 4), a great number of linear features, to be compared with those of Fig. 3, are not represented. The remaining linear features correspond, in theory, to the deepest faults and show two principal directions: N055°–N065° and N080°–N085°.

Euler deconvolution was used to determine source depths and localization. Solutions are well grouped and correlated with various contacts previously deduced from horizontal derivative maxima (Fig. 5). Their depth can reach 4500 m. The deepest contacts are mainly directed along two directions, ENE–WSW and NE–SW in accordance with the results obtained from the upward extension. These directions recall the Hercynian orogeny fault directions in the eastern Meseta and in the southeastern Oujda belts [10,11,23,24].

The obtained results permitted to draw a structural map of northeastern Morocco (Fig. 6). This map complements former classic structural studies (Fig. 7) and underlines the importance of using gravity data filtering for mapping the geological contacts. They also provide a new insight into the structure of the surveyed area, particularly in the plains.

1. Introduction

Le Maroc nord-oriental a fait l'objet, depuis longtemps, de plusieurs études structurales basées sur les observations classiques du terrain, à l'échelle de l'affleurement, ou sur des techniques d'interprétation indirectes qui se sont développées au cours de ces dernières décennies, telles que l'analyse morphostructurale et l'analyse des images spatiales et aéroportées [3,7,9–11,19–21,23,24]. Cependant, ces techniques demeurent inadaptées au niveau des plaines, et ce d'autant plus qu'un grand nombre d'accidents profonds, s'exprimant en surface par une adaptation de la couverture souple sédimentaire, en forme de plis ou de flexures, restent difficiles à observer. L'apport de la gravimétrie peut être capital pour identifier ces failles, leurs limites et leurs organisations spatiales sous la couverture. La carte gravimétrique générale du Maroc ($d = 2,67$), rassemblant de nombreux levés de détail et de semi-détail effectués au cours de la période 1946–1965, a

été élaborée en sept feuilles au 1:500 000 [25] ; l'interprétation de cette carte s'est limitée à une description qualitative des principales anomalies observées [26]. Une réinterprétation approfondie, utilisant les techniques modernes de filtrage, des données de la feuille d'Oujda a apporté des éléments nouveaux permettant de délimiter les structures géologiques profondes présentes au Maroc oriental, notamment les principaux accidents tectoniques qui l'affectent [27]. Cependant, les différents traitements ont été effectués sur une grille assez large, de 1,5 km, calculée à partir de données issues de la numérisation des courbes isogals de la carte gravimétrique au 1:500 000 (intervalle : 5 mgal). Pour la présente étude, nous disposons de données numériques relatives à 5450 stations de mesure, couvrant la partie nord-est du Maroc oriental : Oujda, El Aioun, Berkane et les pays des horsts. Cela permettra, en appliquant des techniques de traitement récentes, telles que l'analyse multiéchelle des contacts géologiques basée sur le couplage des techniques du gradient horizontal, le prolongement vers le haut et la déconvolution d'Euler [1,12–14], d'apporter plus de précisions sur le tracé des principaux accidents qui affectent la région, sur leur extension, leur profondeur et leur degré d'importance.

2. Contexte géologique

Le secteur étudié, situé dans le Nord-Est du Maroc, s'étend entre la mer Méditerranée, au nord, et les Hauts Plateaux, au sud (Fig. 1) ; il présente, du nord vers le sud, une succession de chaînes montagneuses (Kebdana, Beni Snassen et les monts d'Oujda-Taourirt) qui délimitent deux couloirs déprimés (la plaine des Triffa, au nord, et le couloir Taourirt–Oujda, au sud).

La plaine des Triffa constitue une vaste dépression subsidente remplie de sédiments néogènes et quaternaires. Le couloir Taourirt–Oujda comprend cinq zones plus ou moins vastes et individualisées, qui sont d'ouest en est : le secteur de Taourirt, la plaine de Naima, la plaine de Sidi Bou-Houria, la plaine de Bessara–Beni Oukil et la plaine des Angad. Le massif des Kebdana constitue la continuité orientale de la chaîne du Gareb, qui forme un linéament de direction est–ouest. Il correspond à un olistostrome d'âge Tortonien, qui repose sur des terrains déformés du Miocène moyen ou du Jurassique [7]. La chaîne des Beni Snassen, ainsi que les monts d'Oujda-Taourirt, sont souvent rattachés au Moyen Atlas, la plus grande partie du relief étant formée par les séries mésozoïques, qui s'échelonnent du Trias au Jurassique supérieur. Elles se déposent en discordance sur un socle paléozoïque allant du Cambro-Ordovicien au Carbonifère. Les terrains

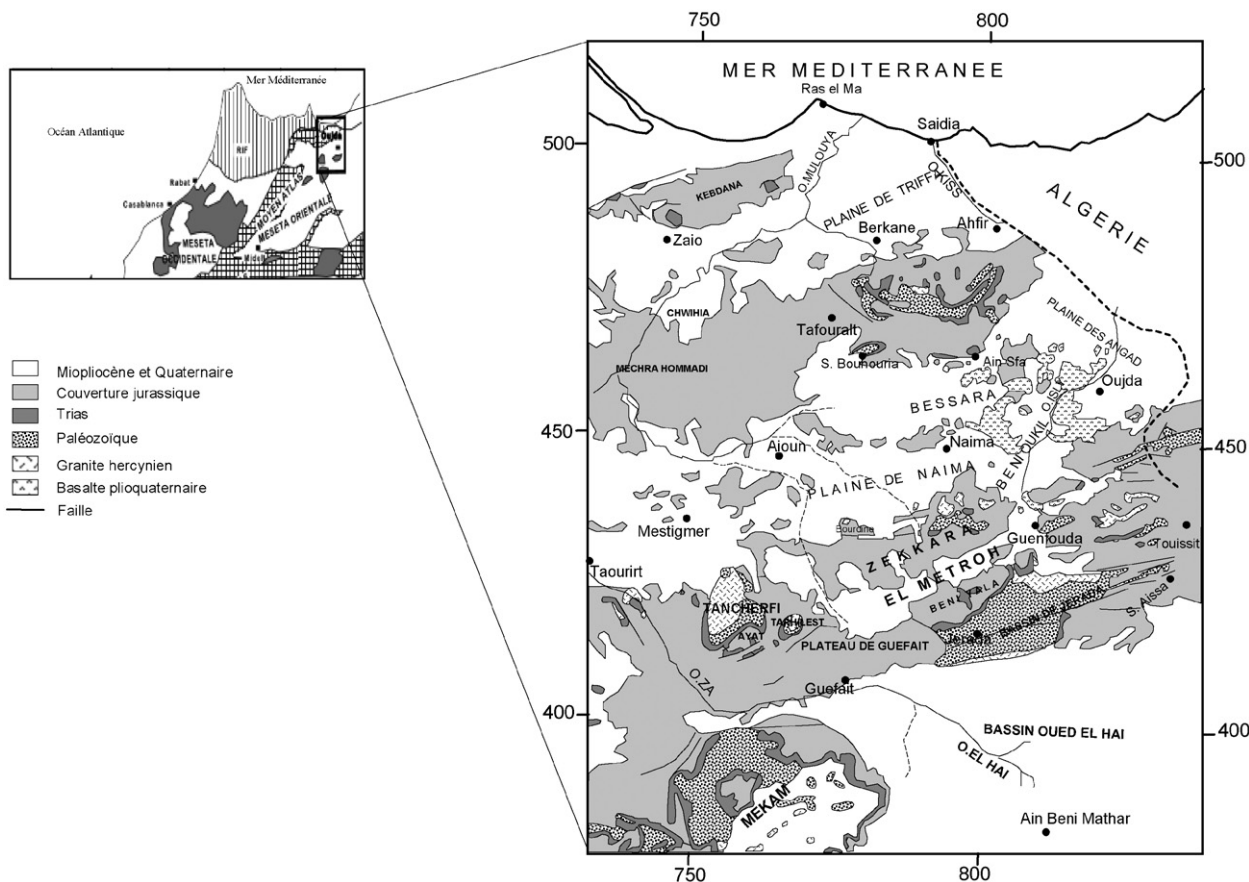


Fig. 1. Carte géologique du Maroc nord-oriental d'après la carte géologique du Maroc au 1:1 000 000 (1985).

Fig. 1. Geological map of northeastern Morocco, after the geological map of Morocco at 1:1 000 000 (1985).

anté-Carbonifère sont déformés par la phase éovarisque [10] ; ils sont recouverts en discordance par une série carbonifère, à caractère volcano-sédimentaire et à niveaux charbonneux bien connus dans la région de Jerada [20]. Elle est plissée suivant la direction ENE–WSW par une deuxième phase compressive tardihercynienne. Cette phase s'inscrit dans un contexte transpressif dextre, guidé par un réseau de failles de direction $N070^{\circ}\text{--}090^{\circ}$ [11]. L'évolution hercynienne se termine par la mise en place de massifs granitiques qui affleurent localement au niveau des boutonnières (Beni Snassen, Zekara, Guenfouda, Tancherfi, Tarhilest. . .) ; ces manifestations magmatiques sont syn- à tarditectoniques.

Après la pénélplanation post-hercynienne, les premiers événements tectoniques ont soumis la région à une distension qui débute pendant le Trias et continue durant le Jurassique [15,16,18]. La sédimentation commence par des dépôts clastiques continentaux triasiques, composés d'argiles rouges, d'évaporites et de basaltes

doléritiques [19,21,22] ; le volcanisme tholéiitique présent dans les séries triasiques est cohérent avec une étape de *rifting* intracontinental à l'échelle de la marge nord-ouest africaine. La transgression franche sur le socle est caractérisée par la mise en place d'une mégaséquence mésozoïque, représentée par des dépôts essentiellement carbonatés marins au Jurassique inférieur et moyen ; au Jurassique supérieur–Crétacé inférieur, le remplissage sédimentaire est marqué par le retour à la sédimentation terrigène argileuse et sableuse. Après une longue émergence depuis la fin du Jurassique supérieur (monts d'Oujda, Hauts Plateaux) ou depuis le Crétacé inférieur (couloir Taourirt–Oujda, Beni Snassen), la sédimentation reprend à partir du Miocène inférieur à moyen ; les sédiments marins du Crétacé sont peu profonds, clastiques ou carbonatés. Ils sont localement coiffés en discordance majeure par des dépôts cénozoïques.

Un régime compressif s'annonçant à partir de la fin du Crétacé supérieur, avec un paroxysme au Miocène

supérieur, est responsable d'un plissement atlasique à grand rayon de courbure et de direction moyenne N070°–N090° (positions actuelles des Beni Snassen, l'axe d'El Aioun-Naima, le plateau de Zekkara et le plateau de Guefait–BeniYala–Jerada), et d'un jeu de décrochements conjugués NW–SE dextres et NE–SW senestres et de failles inverses ayant la même direction que les plis atlasiques ENE–WSW.

3. Données et méthode

Les données gravimétriques proviennent en grande partie d'une campagne de détail (Fondazione Ing. C.M. Lericci, 1967), réalisée pour le compte de la direction des Mines et de la Géologie (DMG), qui couvre la région Oujda–El Aioun-Berkane sous forme de 13 cartes, au 1:50 000, d'anomalie de Bouguer calculée pour la densité de réduction 2,20 g/cm³. Ces données ont été complétées par le relevé régional de la société Les Consultants BMJ Inc., effectué en 1982 dans la chaîne des horsts à la demande du ministère de l'Énergie et des Mines du royaume du Maroc (MEMRM) [28], dans le but de disposer au total de 5450 stations de mesures. La densité moyenne des mesures est de l'ordre de 0,74 station/km². Elle n'est pas homogène : elle est beaucoup plus importante au niveau des plaines qu'au niveau des régions montagneuses. Une seule grille carrée régulière, au pas de 250 m, a été calculée à partir du semis des points numérisés.

L'information principale et immédiate que fournit la carte classique des anomalies de Bouguer est la répartition des hétérogénéités en densité ; cependant, elle contient des informations beaucoup plus précieuses, comme l'amplitude des gradients horizontaux présents entre les anomalies, ou encore des anomalies de faible amplitude, souvent masquées par des anomalies régionales. Dans le but de mieux exploiter ces données et d'extraire le maximum d'information des signaux gravimétriques, nous avons utilisé les techniques modernes de filtrage du signal gravimétrique dans le domaine des fréquences, telles que l'analyse multi-échelle des contacts géologiques, basée sur la technique du gradient horizontal couplé avec le prolongement vers le haut [1], ainsi que la déconvolution d'Euler [12]. Le succès de l'application de ces traitements a été démontré par de nombreuses études antérieures [4,5,8,13,14].

Les forts contrastes que montrent les données gravimétriques sont supposés résulter de discontinuités ou interfaces telles que les failles, les flexures, les contrastes des roches intrusives, etc. Le gradient horizontal de la carte d'anomalie de Bouguer est très utile pour la localisation horizontale des contacts

géologiques, du fait que la limite entre deux blocs de densités différentes correspond aux maxima de ce gradient [2,6,8,13]. En effet, le champ gravimétrique au-dessus d'un contact vertical mettant en présence des roches de densités différentes est matérialisé par un bas du côté des roches de faible densité et un haut du côté des roches de forte densité. Le point d'inflexion se trouvera à l'aplomb de ce contact vertical. On peut se servir de cette caractéristique des anomalies gravimétriques pour localiser les changements abrupts de densité. Les maxima locaux des gradients horizontaux forment des rides étroites au-dessus des contacts géologiques, marqués par des contrastes de densités.

Pour déterminer le sens du pendage des différents contacts mis en évidence, la carte d'anomalie de Bouguer a été prolongée vers le haut jusqu'à 3000 m, par étapes de 250 m. À chaque niveau les maxima du gradient horizontal ont été localisés. En principe, les niveaux de prolongement les plus élevés correspondent aux contacts les plus profonds. Si le contact a un pendage, les maxima des gradients horizontaux se déplacent avec le prolongement vers le haut du côté du pendage et indique ainsi le sens du pendage [1]. En revanche, pour des valeurs de pendage élevées tous les maxima se superposent et resteront près de ce contact.

La technique de la déconvolution d'Euler permet une estimation de la profondeur des différents contacts, en plus de leur localisation dans le plan horizontal [12].

4. Résultats

La carte d'anomalie de Bouguer obtenue (Fig. 2) reflète les variations latérales de la densité dans le sous-sol et montre l'existence de plusieurs anomalies positives et négatives qui sont bien corrélées avec les grands traits structuraux de la région étudiée. La superposition de cette carte à la carte géologique de la région tirée à partir de la carte géologique du Maroc au 1:1 000 000 nous permet de faire les principales observations suivantes :

- au nord du secteur d'étude, une anomalie négative allongée de direction ENE–WSW, encadrée par les Beni-Snassen au sud et le massif des Kebdana au nord, se superpose à la dépression des Triffa, remplie par des sédiments néogènes et quaternaires. De forts gradients délimitent cette anomalie, au nord comme au sud ;
- le passage au massif des Kebdana, au nord, se traduit par un fort gradient NE–SW, au niveau de Oued Moulouya ;
- le massif des Beni-Snassen se caractérise par un ensemble d'anomalies positives orientées ENE–WSW,

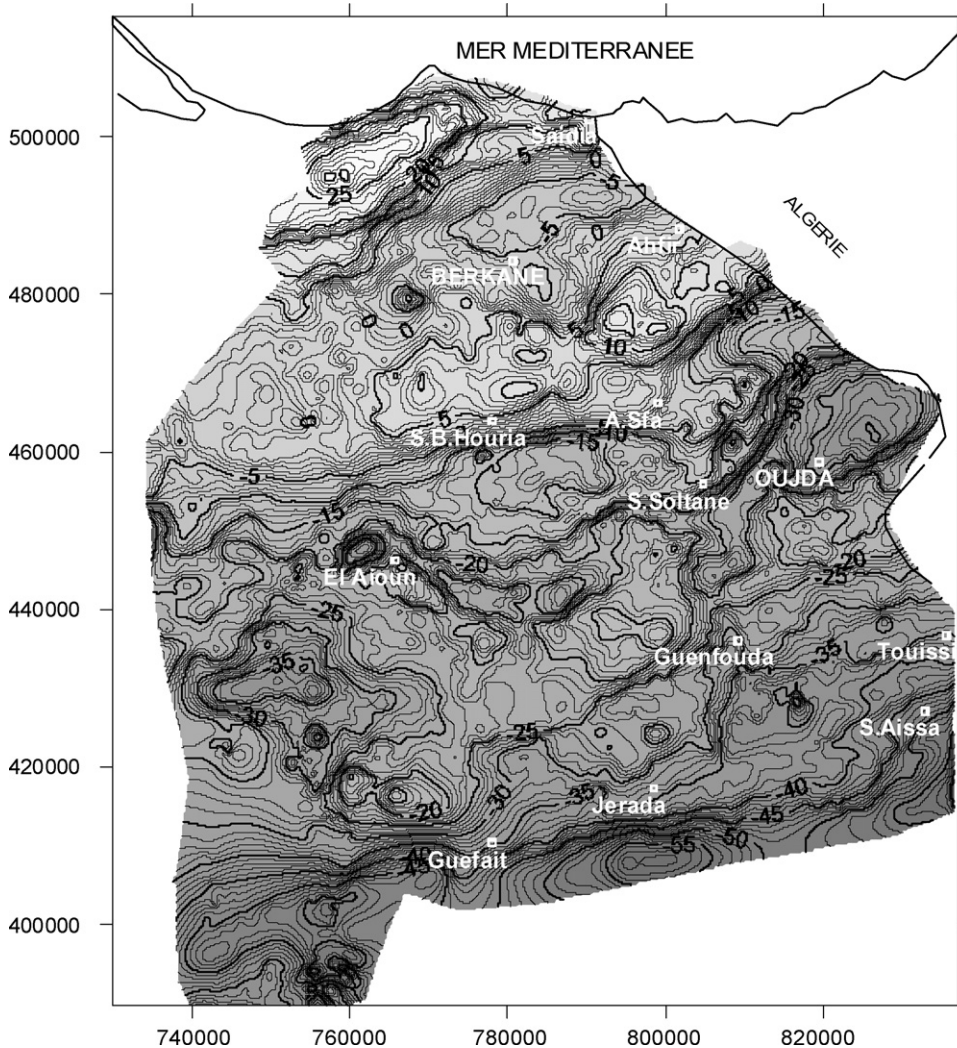


Fig. 2. Carte d'anomalie de Bouguer (densité de correction : $2,2 \text{ g/cm}^3$; intervalle = 1 mgal).

Fig. 2. Bouguer anomaly map (reduction density: 2.2 g/cm^3 ; interval = 1 mgal).

qui sont dues aux terrains primaires qui affleurent dans la partie la plus élevée du massif et qui sont entourés par des terrains triasiques et jurassiques. Sa limite sud présente un fort gradient ;

- au sud du secteur étudié, une zone linéaire à fort gradient nord-sud traverse la totalité de la région suivant une direction ENE–WSW, en passant par Guefait. Cette zone sépare, au nord, un ensemble d'anomalies positives éparses et de direction très variable (NE–SW, est-ouest, nord-sud et NW–SE) d'un ensemble d'importantes anomalies négatives qui s'orientent parallèlement à la direction de la zone linéaire à fort gradient ENE–WSW. Ce gradient est négatif en allant du nord vers le sud ; il fait penser, par son amplitude et son extension latérale, à un

phénomène tectonique majeur. En effet, il marque le passage des monts Taourirt-Oujda, au nord, vers les Hauts Plateaux, au sud ;

- le couloir Taourirt–Oujda est caractérisé par des anomalies négatives importantes bien circonscrites, limitées souvent sur un flanc par une zone à fort gradient ; les axes anomaliques sont généralement de direction NE–SW à ENE–WSW, et s'incurvent localement suivant une direction NW–SE à proximité d'El Aïoun.

Par ailleurs, la superposition des maxima du gradient horizontal, déterminés sur les cartes prolongées vers le haut (250 m, 500 m, 750 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m et 3000 m) et sur la carte de Bouguer, se

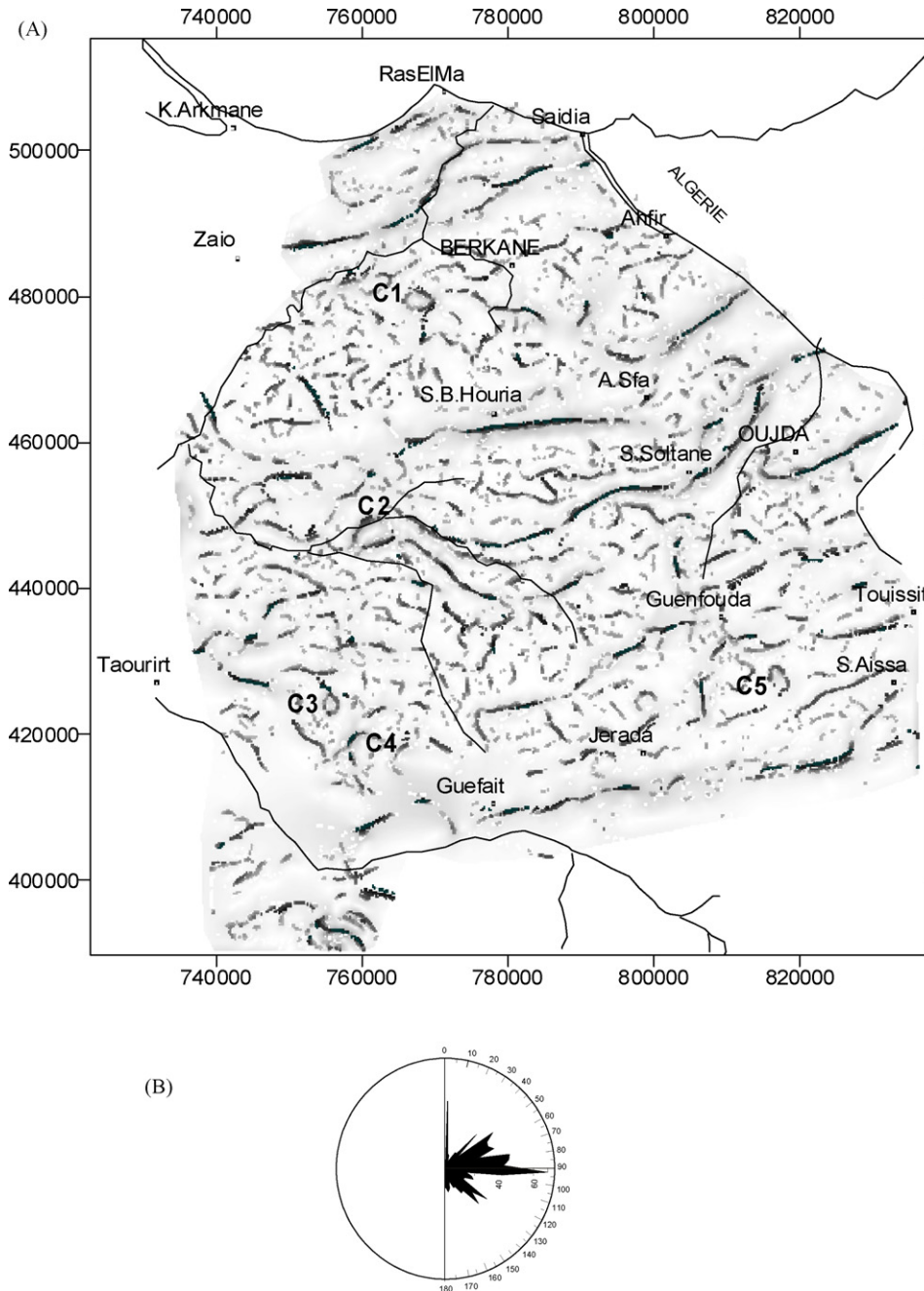


Fig. 3. Superposition des maxima du gradient horizontal obtenus sur la carte de Bouguer et sur les cartes prolongées vers le haut à différentes altitudes (A) et rosace des fréquences des alignements interprétés comme étant des failles (B). ○ Maxima sur la Bouguer ; ● 3000 m.

Fig. 3. Horizontal gradient maxima of the Bouguer anomaly and its upward continuations to different heights (A) and rose diagram of the alignments interpreted as faults (B).

présente comme une carte structurale du Maroc nord-oriental (Fig. 3A). Ainsi, les alignements des maxima soulignent les différents contacts présents dans la région, les contacts linéaires correspondent à des failles, alors que les contacts en forme circulaire traduisent les

limites de diapirs ou de corps intrusifs. L'analyse statistique des différents contacts interprétés comme étant des failles (Fig. 3B) révèle l'existence de quatre familles, de directions majeures : N00°, N050°–070°, N130°–145° et N080°–095°, avec une nette dominance

de la dernière famille. Le réseau est–ouest à ENE–WSW correspond à des failles décakilométriques qui recoupent transversalement la région sur des longueurs dépassant 50 km. Les directions NE–SW et NW–SE ont une répartition assez homogène sur l'ensemble du secteur et s'observent à différentes échelles ; leur longueur reste inférieure à 30 km. Des alignements circulaires (Fig. 3A) s'observent au sud-ouest de Berkane (C1), à l'ouest d'El Aioun (C2), au nord-ouest de Guefait (C3 et C4) et à une dizaine de kilomètres au sud-est de Guenfouda (C5). Van Den Bosch [26] appuie la présence de sels diapiriques triasiques, en comparant les anomalies résiduelles correspondant aux structures C1 et C2 à celles reconnues dans la région de Guercif ; en effet, un profil sismique confirme cette origine pour la structure

C2 [5]. Les structures C3, C4 et C5 se superposent respectivement aux affleurements des granites hercyniens de Tancherfi et Tarhilest et aux dacites du bassin houlier de Jerada.

Quand on ne fait superposer que les maxima déterminés sur les cartes prolongées vers le haut aux différentes altitudes (2000 m ; 2500 m et 3000 m) (Fig. 4), un grand nombre d'accidents, à comparer avec la Fig. 3, n'est plus représenté. Les failles qui subsistent correspondent, en principe, aux failles les plus profondes et elles sont orientées essentiellement suivant deux directions (Fig. 4) : N055° à N065° et N080° à N085°. Les directions N080° à N085° correspondent aux failles de Kebdana (n° 8), de Sidi Bouhouria (n° 15), de Naima (n° 27) et de Guefait (n° 34). Et les directions N055° et N065° correspondent à la faille

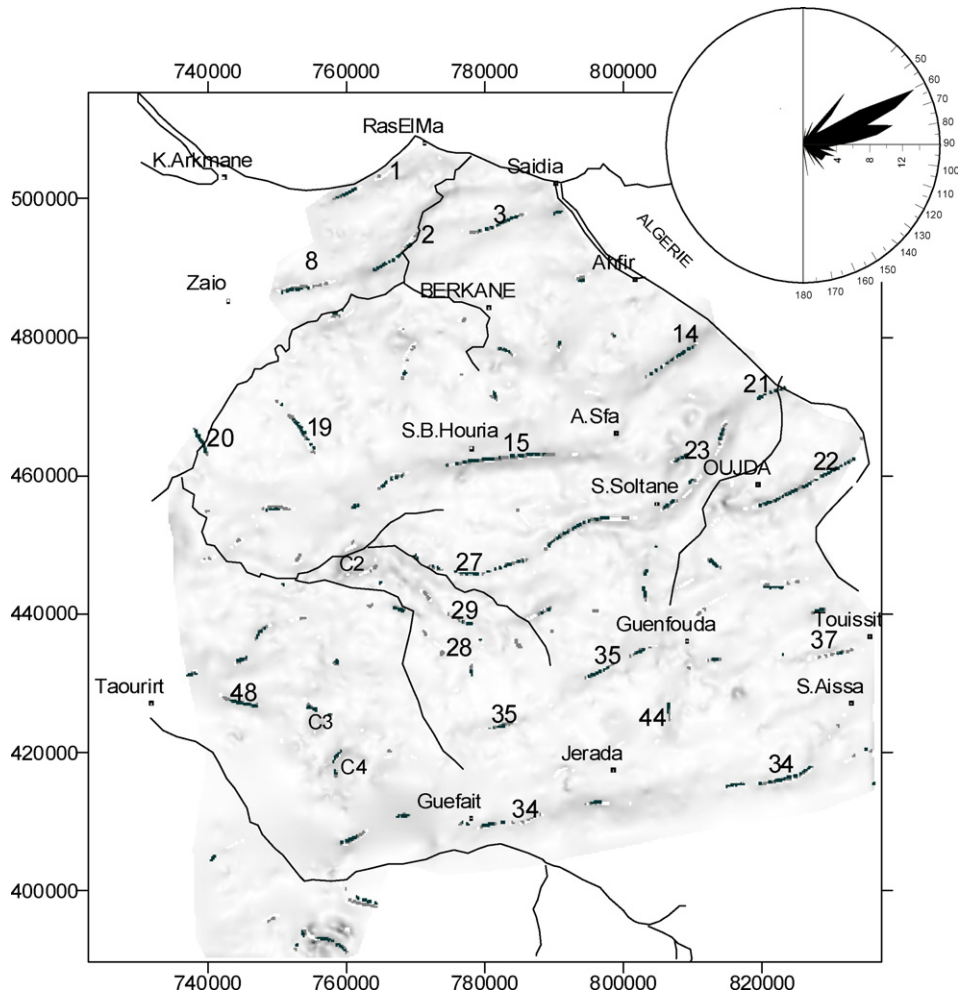


Fig. 4. Principales failles soulignées par le regroupement des maxima du gradient horizontal des cartes prolongées vers le haut à partir de 2000 m d'altitude et rosace des fréquences. ○ Maxima localisés sur la carte prolongée à 2000 m, ● 2500 m, ● 3000 m.

Fig. 4. Major faults outlined by grouping the horizontal gradient maximums of the Bouguer anomaly maps extended upward as far as 2000 m, 2500 m, and 3000 m; rose diagram.

(n° 1) parallèle à la côte méditerranéenne et aux failles de Moulouya (n° 2), de Madagh (n° 3), d'Angad (n° 14, n° 21 et n° 22) et des Zekkara (n° 35). En ce qui concerne la direction NW–SE, elle n'est représentée que par deux accidents dans les Beni Snassen occidentaux – la faille de Chwhihia (n° 19) et la faille de Mechraa Hammadi (n° 20) – et par une troisième faille (n° 48), qui limite la fosse de Taourirt au sud-ouest.

La déconvolution d'Euler va nous permettre d'estimer la profondeur des différentes failles, en plus de leur localisation horizontale. Les solutions d'Euler, pour une

fenêtre 10×10 et un indice structural $IS = 0,25$, sont représentées sur la Fig. 5. On peut suivre, sur cette figure, les différents contacts déduits précédemment à partir des maxima du gradient horizontal. Les accidents les plus profonds ont des directions principalement, ENE–WSW et NE–SW, conformément aux résultats des prolongements vers le haut. Ces failles atteignent des profondeurs importantes allant jusqu'à 4500 m ; nous pouvons alors avancer qu'elles affecteraient le socle et seraient héritées au moins de l'orogénèse hercynienne. En effet, ces directions rappellent celles des phases tectoniques éovarisque et tardi-hercynienne décrites

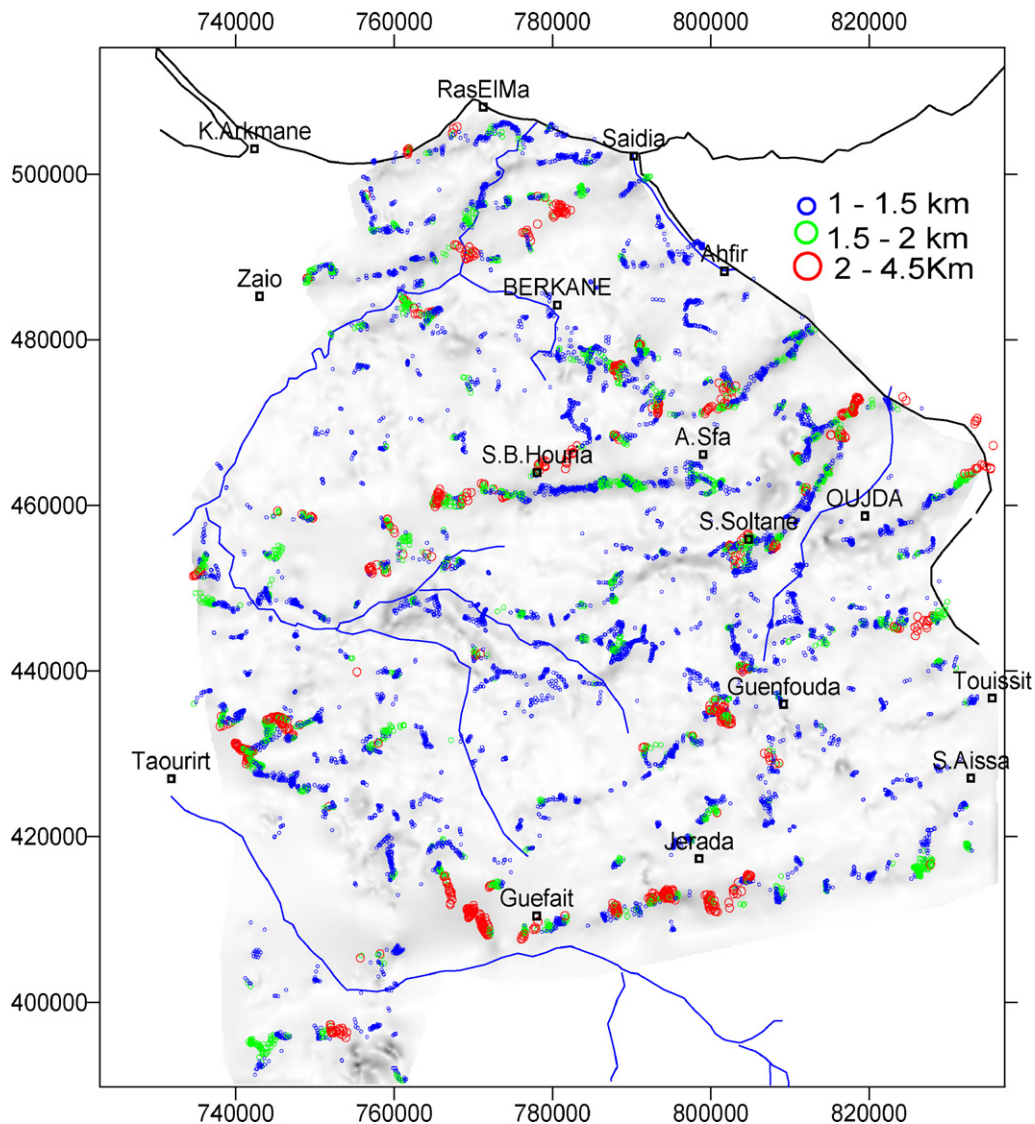


Fig. 5. Carte des solutions d'Euler ayant une profondeur supérieure à 1 km pour l'indice structural $IS = 0,25$, une fenêtre de 10×10 (2250×2250 m) et une erreur relative maximale de 15 %.

Fig. 5. Euler solutions, deeper than 1 km, for a structural index $IS = 0.25$, a 10×10 window (2250×2250 m) and a maximum relative error of 15%.

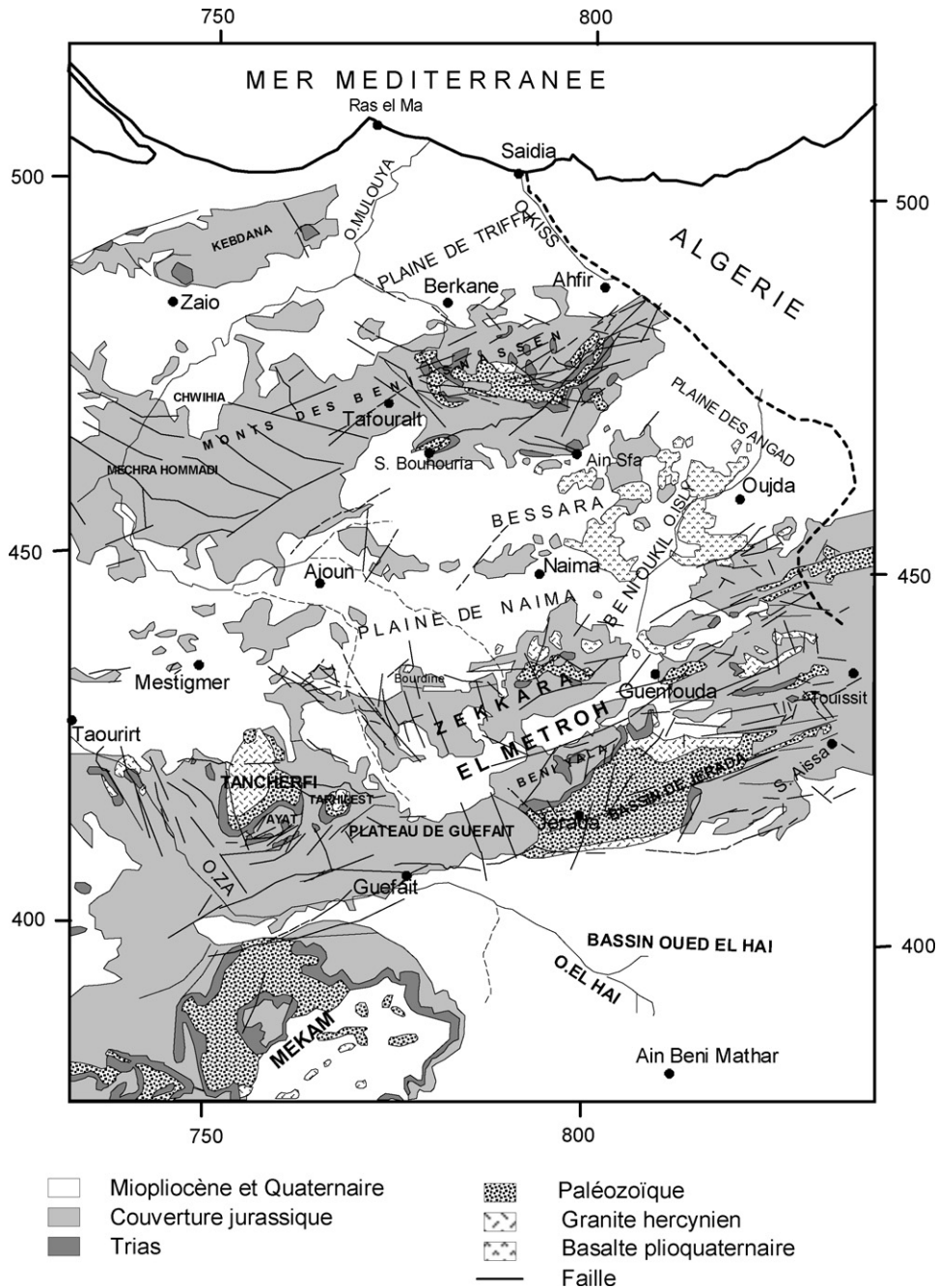


Fig. 6. Carte structurale simplifiée du Maroc nord-oriental. Documents consultés : cartes géologiques du Maroc (1 : 1 000 000), d'Oujda (1:500 000), de Taurirt et Ain Beni Mathar (1 : 100 000), de Berkane, Ahfir et Zaio (1 : 50 000) [3,9,23,24].

Fig. 6. Simplified structural map of northeastern Morocco, after the geological maps of Morocco (1:1 000 000), Oujda (1:500 000), Taourirt and Ain Beni Mathar (1:100 000), Berkane, Ahfir and Zaio (1:50 000) [3,9,23,24].

dans la Meseta orientale et dans les monts au sud-est d'Oujda [10,11,23,24]. Les études de synthèse sur la tectonique hercynienne dans l'ensemble de la Meseta orientale [10], ainsi que l'analyse structurale sur le Paléozoïque des monts au sud-est d'Oujda [24],

montrent que les phases tectoniques anté-viséenne et tardi-hercynienne sont responsables d'une tectonique cassante, caractérisée par des décrochements conjugués est-ouest dextres et NE-SW à nord-sud senestres, prédominants sur un système transverse d'orientation

WNW–ESE à NW–SE. À l’issue de ce travail, nous proposons une carte structurale du Maroc nord-oriental représentant les principaux accidents déduits de l’analyse des données gravimétriques (Fig. 7).

5. Discussion et conclusion

La comparaison de la carte obtenue avec les différentes cartes structurales préexistantes dans la

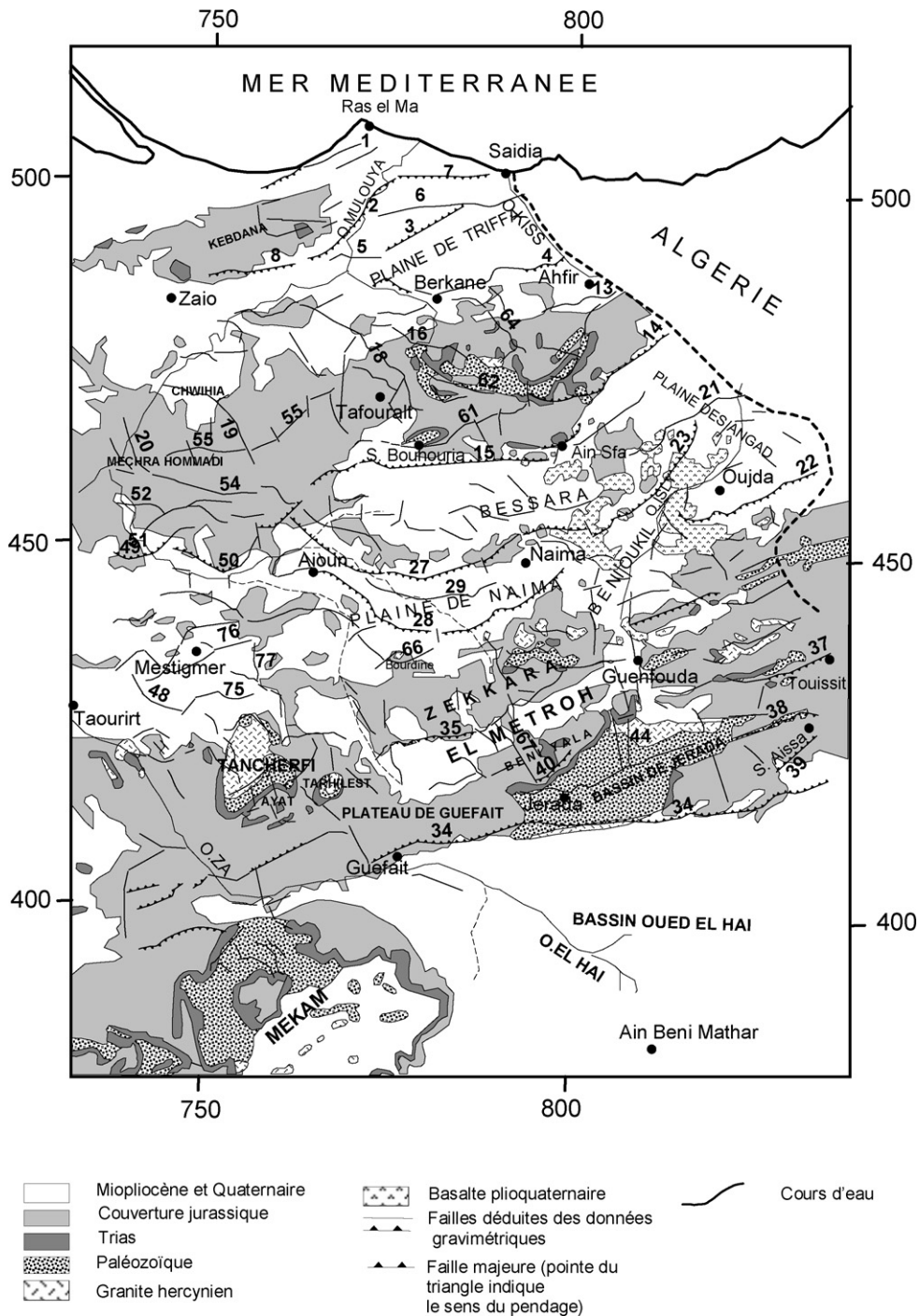


Fig. 7. Carte structurale du Maroc nord-oriental ne représentant que les principaux accidents, déduits de l’analyse des données gravimétriques. Fig. 7. Major geological contacts in northeastern Morocco, inferred from gravity data interpretation.

région (Fig. 6) nous permet de confirmer l'existence de nombreuses failles déjà observées par les études antérieures et de compléter l'information sur certaines d'entre elles, de confirmer l'existence de certaines failles supposées par les études structurales classiques en précisant leurs tracés et pendages, et également de mettre en évidence des accidents profonds ou superficiels qui sont restés inconnus jusqu'à présent.

5.1. Failles confirmées

Au niveau des Beni Snassen orientaux, les principales failles confirmées sont le contact de Tanezert (n° 61), dont le tracé a été prolongé vers l'ouest jusqu'à Beni Mahiou ; la faille de Tafouralt (n° 18), qui souligne le contact entre les Beni Snassen orientaux et les Beni Mahiou, son tracé étant prolongé sur une dizaine de kilomètres vers le nord-ouest et la faille de Beni Amyr (n° 62), qui n'est confirmée que dans sa moitié sud-est. Au niveau des Beni Snassen occidentaux, les failles de Jbel Ahmar Lakhdar sont bien confirmées par la faille de Machraa Hammadi (n° 20) et la faille (n° 54) ; la faille de Chwihia (n° 19) confirme, dans sa partie sud, la faille de Jbel Wafi de direction NW–SE (carte géologique de Zaïo au 1:50 000), et met en évidence son prolongement vers le nord. Les limites sud et nord-est du massif de Kbdana, supposées dans les études antérieures, sont bien confirmées et respectivement représentées par l'accident est–ouest de Kbdana (n° 8) et par la faille de Moulouya (n° 2) ; cependant, le sens de pendage obtenu est plutôt vers le sud. La faille de Guefait est bien confirmée et même prolongée vers l'est jusqu'aux environs de la frontière algéro-marocaine ; la majorité des failles ENE–WSW des monts au sud d'Oujda sont confirmées.

5.2. Nouvelles failles mises en évidence

Au niveau de la plaine des Triffa et de la plaine côtière, deux familles de failles majeures ont été localisées : NE–SW (les failles de Ras Elma n° 1, oued Moulouya n° 2, Madagh n° 3 et Berkane n° 4) et ENE–WSW à est–ouest (les failles n° 5, 6 et 7). Au niveau de la plaine des Angad, trois failles majeures de direction NE–SW ont été mises en évidence : la faille d'Oujda (n° 22) et la faille (n° 14) qui l'encadrent respectivement au sud et au nord et la faille (n° 21), qui la recoupe au milieu ; la faille de Sidi Soltane (n° 23), de direction NNE–SSW, qui borde la plaine de Beni Oukil au nord-ouest et qui paraît se prolonger jusqu'à Jbel Naima, sur une longueur totale de l'ordre de 30 km. On relève aussi l'accident est–ouest de Sidi Bouhouria (n° 15), les failles bordières de la plaine de Naima – la faille de

Naima (n° 27), au nord, et celle d'El Aioun, au sud (n° 28), ainsi que celle (n° 29) qui recoupe la plaine au milieu, présentent toutes trois une concavité tournée vers le nord. On observe enfin les failles délimitant la partie orientale de la fosse de Taourirt (n° 76,75,77 et 48), celles du massif des Beni Snassen (n° 13,16,49,50,55 et 64), celles des Zekkara (n° 35,66), des Beni Yaala (n° 40,67) et les failles nord–sud du bassin de Jerada (n° 44), qui semblent se prolonger par un couloir de failles décalées par des accidents est–ouest jusqu'aux environs de Beni Oukil. Dans les monts au sud d'Oujda, les nouvelles failles remarquables sont les deux failles de Tiouli (n° 38 et 39) et la faille de Touissit (n° 37).

La forme curviligne des failles mises en évidence au niveau des plaines des Triffa, de Sidi Bouhouria et de Naima, ainsi que la géométrie des bassins qu'elles délimitent, rappellent le modèle de naissance de bassins en forme de « S » sur des décrochements est–ouest senestres [17] ; ce qui reste en parfait accord avec la dynamique tectonique du Tortonien connue dans la région (voir [23] et références citées). Les résultats de la présente étude sont en grande partie compatibles avec ceux des études structurales réalisées dans la région et montrent l'intérêt des filtrages gravimétriques dans les études structurales. L'apport de ces filtrages est très significatif au niveau des plaines, où les études précédentes n'observaient aucun accident à cause de la couverture néogène et quaternaire ; on est arrivé à mettre en évidence des failles importantes qui semblent contrôler la structuration profonde de ces régions.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Michael D. Thomas (Commission géologique du Canada) et les rapporteurs de la revue pour leurs différentes remarques et suggestions, qui ont permis d'améliorer la version initiale de l'article. Ce travail a été réalisé grâce au soutien de la Commission géologique du Canada (contribution n° 2006522).

Annexe A. Matériel supplémentaire

Des versions en couleur des Figs. 2–5 sont disponibles en tant que matériel supplémentaire électronique. Suivre le lien [doi:10.1016/j.crte.2007.03.006](https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.03.006).

Références

- [1] N.J. Archibald, P. Gow, F. Boschetti, Multiscale edge analysis of potential field data, *Explor. Geophys.* 30 (1999) 38–44.

- [2] R.J. Blakely, R.W. Simpson, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics* 51 (7) (1986) 1494–1498.
- [3] Cattaneo G., Les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur de l'avant-pays rifain oriental (Maroc), thèse d'État, université de Bourgogne (1987) (337p.).
- [4] T. Chennouf, D. Khattach, A. Milhi, P. Andrieux, P. Keating, Détermination de la structure de la plaine des Triffa par interprétation conjointe des données gravimétriques et sismiques : implications hydrogéologiques, in : Colloque de géophysique appliquée CGA2, Marrakech, 2004, 30–32.
- [5] Chennouf T., Étude géophysique du Maroc nord-oriental : implications structurales et hydrogéologiques, thèse d'État, faculté des sciences d'Oujda, université Mohammed-1^{er} (2005) (259p.).
- [6] L. Cordell, V.J.S. Grauch, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data, in : The San Juan Basin, New Mexico, 52nd Ann. Int. Meet. Soc. Explor. Geophys., Dallas, (1982), pp. 246–247, abstracts and biographies.
- [7] P. De Luca, L'unité chaotique des Kbdana (région de Zaio, Maroc), *Bull. Soc. geol. France* 7 XX (1978) 339–343.
- [8] M. Everaerst, J.-L. Mansy, Le filtrage des anomalies gravimétriques ; une clé pour la compréhension des structures tectoniques du Boulonnais et de l'Artois (France), *Bull. Soc. geol. France* 172 (3) (2001) 267–274.
- [9] Hervouet Y., Géodynamique alpine (Trias actuel) de la marge septentrionale de l'Afrique au Nord du bassin de Guercif (Maroc oriental), thèse d'État, Pau (1985) (367 p.).
- [10] Hoepffner C., La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc, thèse d'État, Strasbourg (1987) (280 p.).
- [11] M.R. Houari, C. Hoepffner, Late Carboniferous dextral wrench-dominated transpression along the North African craton margin (eastern High-Atlas, Morocco), *J. Afr. Earth Sci.* 37 (2003) 11–24.
- [12] B.P. Keating, Weighted Euler deconvolution of gravity data, *Geophysics* 63 (1998) 1595–1603.
- [13] D. Khattach, P. Keating, E.M. Mili, T. Chennouf, P. Andrieux, A. Milhi, Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin des Triffa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 1427–1432.
- [14] D. Khattach, H. Mraoui, D. Sbibih, T. Chennouf, Analyse multi-échelle par ondelettes des contacts géologiques : application à la carte gravimétrique du Maroc nord-oriental, *C. R. Geoscience* 338 (2005) 521–526.
- [15] E. Laville, Rôle des décrochements dans le mécanisme de formation des bassins d'effondrement du Haut Atlas marocain au cours des temps triasiques et liasiques, *Bull. Soc. geol. France* (7) 23 (3) (1981) 303–312.
- [16] W. Manspeizer, J.M. Puffer, M.L. Cousminer, Separation of Morocco and eastern North America: a Triassic-Liassic stratigraphic record, *Geol. Soc. Am. Bull.* 89 (1978) 901–920.
- [17] P. Mann, M.R. Hempton, D.C. Bradley, K. Burke, Development of pull-apart basins, *J. Geol.* 91 (1983) 529–584.
- [18] A. Michard, Éléments de géologie marocaine, Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc n° 252 (1976) (408 p.).
- [19] Oujidi M., Le complexe volcano-sédimentaire rouge du Trias, et de la base du Lias des pays des Horsts (Maroc oriental), thèse d'État, université Mohammed-1^{er}, Oujda, Maroc (1994).
- [20] B. Owodenko, Bassin houiller de Jerada (Maroc oriental). Essai de synthèse et de paléogéographie, Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc n° 207 (1976) (148 p.).
- [21] M. Rakus, Évolution et position paléogéographique des monts d'Oujda au cours du Mésozoïque, Mines, Géol. & Énergie, Rabat 46 (1979) 75–78.
- [22] H.M. Salvan, Les formations évaporitiques du Trias marocain. Problèmes stratigraphiques, paléogéographiques et paléoclimatologiques. Quelques réflexions, *Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys.*, Paris 25 (3) (1974) 187–203.
- [23] Tabyaoui H., Apport des données satellitaires (spot-xs, radar sar ers-1, Landsat-mss) à la cartographie des structures géologiques du Maroc nord-oriental. Tectonique cassante, cinématique et contexte géodynamique du Trias à l'Actuel, thèse de doctorat, université Mohammed-V–Agdal, Rabat (2000) (338 p.).
- [24] Torbi A., Analyse structurale et étude de la fracturation du socle hercynien et de sa couverture dans les monts du Sud-Est d'Oujda, Meseta orientale, Maroc, thèse de 3^e cycle, université de Poitiers (186 p.).
- [25] W.H. Van Den Bosch, Cartes gravimétriques du Maroc au 1:500 000, Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc n° 234 (1971).
- [26] W.H. Van Den Bosch, Mémoire explicatif de la carte gravimétrique du Maroc (provinces du Nord) au 1:500 000, Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc n° 234 bis (1981) (219 p.).
- [27] L.T.A. Vanié, D. Khattach, M.R. Houari, Apport des filtrages des anomalies gravimétriques à l'étude des structures profondes du Maroc oriental, *Bull. Inst. Sci. Rabat* 27 (2005) 29–40.
- [28] X. (Les consultants BMJ Inc.), Prospection gravimétrique dans les pays des horsts ; rapport inédit, ministère de l'Énergie et des Mines, direction de la Géologie, division des bassins sédimentaires, service de la géophysique, 1982.