

Géophysique interne

Apport de la gravimétrie à l'étude des structures profondes du Sahel de Tunisie (cas de la région de Kairouan–Sousse–Monastir)

Hakim Gabtni

Laboratoire de géoressources, Institut national de recherche scientifique et technique, Borj-Cedria, BP 95, 2050 Hammam-Lif, Tunisie

Reçu le 15 novembre 2004 ; accepté après révision le 16 septembre 2005

Disponible sur Internet le 27 octobre 2005

Présenté par Jean-Paul Poirier

Résumé

Faisant suite, vers l'est, à l'important trait orographique de direction nord–sud connu sous l'appellation d'axe nord–sud, le Sahel de Tunisie est caractérisé par une certaine monotonie topographique et structurale. Cette étude vient poser quelques problématiques concernant la structure profonde de cette région. Elle essaie, en plus, de cerner le contexte crustal et gravimétrique de la partie nord du Sahel de Tunisie. Un ensemble d'anomalies gravimétriques, de formes et de directions variables, montre une complexité structurale certaine de la région d'étude (par exemple le nœud sismotectonique de Monastir). La structure profonde d'une zone particulière d'amincissement crustal de direction est–ouest (région de Kairouan–Sousse–Monastir), prenant une forme en « doigt de gant » et confirmée par les données gravimétriques, est parfaitement imagée par la technique du signal analytique haute résolution d'ordre 2, calée par la distribution des foyers sismiques durant le XX^e siècle. Cette technique met en évidence l'interférence d'importantes discontinuités tectoniques sismiquement actives, où s'arrangent plusieurs structures plicatives en « fleurs positives » enfouies : c'est le couloir tectonique est–ouest de Kairouan–Sousse–Monastir (CKSM). *Pour citer cet article : H. Gabtni, C. R. Geoscience 337 (2005).*

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

Abstract

Gravity contribution for the study of the deep structures of the Tunisian Sahel domain (Kairouan–Sousse–Monastir area case). The monotony of the surface and of the deep structure of the Sahel domain in eastern Tunisia (low topographic area covered by a Quaternary series) induces the possible existence of an important subsiding collapsed block and associated faulted zones. Gravity data analyses have permitted the reconnaissance of the crustal and gravimetric setting of the northern part of the Sahel domain and the discussion of main outlines of subsurface structures. The deep structure of a particular zone (Kairouan–Sousse–Monastir area) demonstrates the existence of an east–west *en-doigt-de-gant* crustal thinning confirmed by the gravity data. This deep structuring is perfectly showed by the high-resolution second-order enhanced analytic signal technique developed to image geologic boundaries such as contacts and faults. This technique, correlated with the distribution of all seismic events in the last century, has permitted to define an important east–west Kairouan–Sousse–Monastir tectonic corridor (CKSM). This corridor corresponds to major faults oriented east–west, where some folded structures can be developed. *To cite this article: H. Gabtni, C. R. Geoscience 337 (2005).*

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

Adresse e-mail : gabtni_hakim@yahoo.ca (H. Gabtni).

1631-0713/\$ – see front matter © 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

doi:10.1016/j.crte.2005.09.007

Mots-clés : Tunisie ; Sahel ; Structures profondes ; Gravimétrie

Keywords: Tunisia; Sahel; Deep structures; Gravity

Abridged English version

1. Introduction

The Sahel domain in eastern Tunisia (Fig. 1A) is separated from the Atlasic domain by the ‘Axe nord–sud’ [4]. The gravity image of this axis confirms the importance of this major geological feature in Tunisia [8,12] (Fig. 1B). At the surface, this domain appears less affected and few tectonised because their architecture characters are sealed by the Plio-Quaternary sediments [1,5,6,10,14]. However, in subsurface, one observes a geological complexity, associated with Triassic halokinesis along a major faults system and an intense volcanic activity essentially from Aptian to Late Cretaceous [11]. We note also an important crustal thinning associated with the Moho discontinuity depth decrease from west to east along the north–south axis [2,3] and confirmed by the gravity data analysis (Fig. 1C and D).

2. Data used

The new gravity data used for this study were obtained from the ‘Entreprise tunisienne d’activités pétrolières’ (ETAP). The seismic and well data are consulted for locally control. The seismicity data are obtained from the ‘Institut national de météorologie’ (INM) of Tunisia.

3. General structural and gravity setting

The Bouguer gravity map of the northern part of the Sahel domain in Tunisia (Fig. 1A) shows a complex gravity field essentially in the Kairouan–Sousse–Monastir area and neighbouring regions (Fig. 1B). This area shows some playas and playa lakes (Sebkha El Kelbia, Sebkha Sidi El Héni, Sebkha El Moknine) and large Quaternary plains (Fig. 3), bordered at the west by the ‘Axe nord–sud’ [4] (Fig. 1B).

The A1–B1 cross-section (Fig. 1B) shows a good correlation between the Bouguer gravity variations (Fig. 1C) and the Moho depth variations (Fig. 1D). However, we can distinguish a particular crustal anomaly (Fig. 1D) in the Kairouan–Sousse–Monastir area. Fig. 2 confirms this observation. This figure shows the Moho isobaths variation in the study area after the seismic refraction data of Geotraverse EGT85 [2,3]. The

change of the crustal thinning axis direction from NE–SW to east–west (*en-doigt-de-gant* form) is spectacular. This east–west locally crustal thinning is associated with the Kairouan–Sousse–Monastir area.

4. Residual gravity map and gravity profiles

The upward transformation of the Bouguer gravity anomaly was used to determine the regional gravity field. A calculated regional anomaly corresponds to a 25-km Bouguer gravity upward. This surface mirrored the known configuration of the crust–mantle boundary surface. The depth of this boundary is relatively well known in eastern Tunisia from the European Geotraverse seismic refraction profiles [2,3]. We subtracted a regional gradient from the Bouguer anomaly and obtained a residual-gravity anomaly map (Fig. 3). The remaining residual-gravity anomaly field represents mainly upper crustal density variations, including variations in the thickness and densities of sedimentary rocks on top of the Precambrian and younger basement rocks. The construction of three NNW–SSE residual-gravity profiles (Fig. 4) shows the gravity signatures of some folded structures recognized in seismic reflection profiles (5 mGal) (for example, the E–F profile in Fig. 4).

5. High-resolution detection of subsurface discontinuities: second-order enhanced analytic signal of gravity field

Since the early 1970s, a variety of automatic and semiautomatic methods, based on the use of the horizontal and/or vertical gradients (derivatives) of potential-field anomalies, have been developed to image geological discontinuities such as contacts and faults. Nabighian [13] has defined the simple analytic signal. For a high-resolution detection of subsurface discontinuities, we use the second-order enhanced analytic signal [7]. Fig. 5 shows the maximum amplitude of the second-order enhanced analytic signal of gravity field correlated with the distribution of all seismic events in the last century. Kairouan–Sousse–Monastir is one of the most active seismic zones in Tunisia [9]. This map has permitted to define a variety of gravity lineaments directions (east–west, north–south and NE–SW). The most important direction is the east–west Kairouan–Sousse–Monastir tectonic corridor (CKMS). This cor-

ridor corresponds to considerable parallel active east–west major faults, where some folded structures can be developed.

1. Introduction

Le Sahel de Tunisie (Fig. 1A), avant-pays de la chaîne atlasique, est limité vers l'ouest par l'axe nord–sud [4], qui correspondrait, étant donné sa signature gravimétrique régionale (Fig. 1B), à une structure profonde et enracinée [8,12]. Le Sahel paraît en surface peu tectonisé, mais sa véritable structure est enfouie sous les sédiments plio-quaternaires [1,5,6,10,14]. On constate, en subsurface, une complexité géologique manifeste. En effet, l'activité triasique halocinétiq ue masque souvent les structures et les discordances préexistantes, alors que l'activité volcanique (tufs–basaltes) a été intense de l'Aptien au Crétacé terminal [11]. On signale également un important amincissement crustal en allant du domaine du bassin atlasique vers le domaine du Sahel [2,3], en accord avec la variation des anomalies de Bouguer (Fig. 1C et D). La tendance régionale, en faveur

d'une remontée du manteau supérieur, est particulière au niveau de la région de Kairouan–Sousse–Monastir (Fig. 2). En effet, on observe une nette tendance au changement de l'axe de l'amincissement crustal, de la direction NE–SW à la direction est–ouest. De plus, cette région (Kairouan–Sousse–Monastir) est l'une des plus actives du point de vue sismique en Tunisie (régions de Sousse–Monastir, Menzel Nour, etc.) [9]. L'établissement de la carte d'anomalie gravimétrique résiduelle, celle du maximum d'amplitude du signal analytique, ainsi que l'analyse de trois profils gravimétriques passant par la région de Kairouan–Sousse–Monastir (intéressante du point de vue pétrolier) ont permis de mieux cerner le caractère architectural des structures profondes de la région.

2. Données utilisées

La distribution des stations gravimétriques la plus récente est présentée sur la Fig. 3. Les données ont été obtenues auprès de l'Entreprise tunisienne d'activités pétrolières (Etap). La maille gravimétrique est la

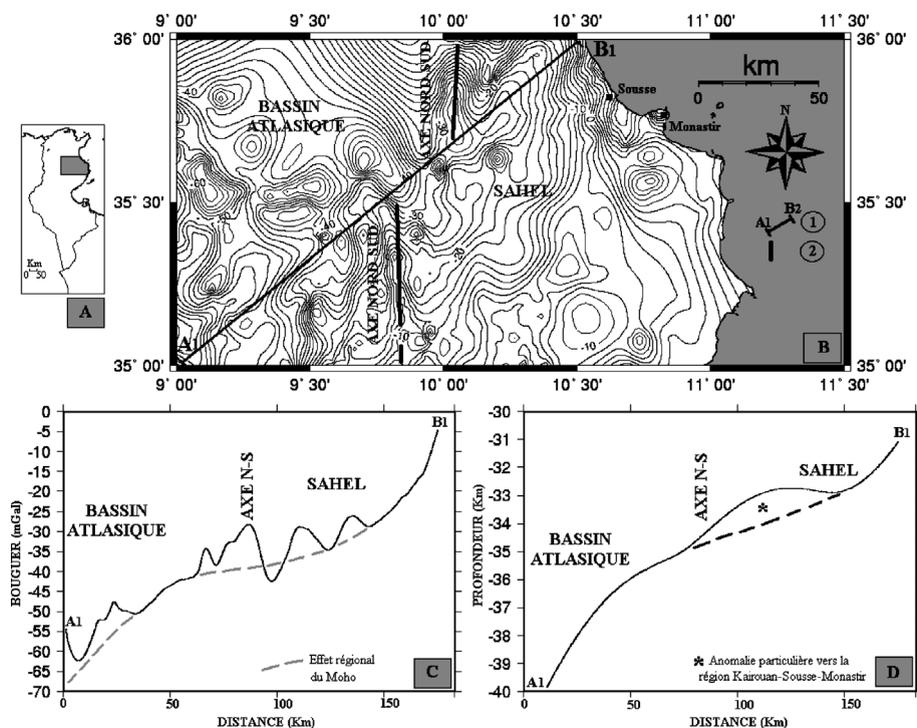


Fig. 1. (a) Localisation du domaine nord du Sahel de Tunisie. (b) Carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer de la région de Kairouan–Sousse–Monastir et de ses alentours, et localisation du profil A1–B1. (c) Variations de l'anomalie gravimétrique de Bouguer selon le profil A1–B1. (d) Variations de la profondeur du Moho selon le profil A1–B1, à partir des données de sismique réfraction de Géotraverse EGT85 [2,3].

Fig. 1. (a) Location of the northern part of the Sahel domain in Tunisia. (b) Bouguer gravity map of Kairouan–Sousse–Monastir region and neighbouring regions, and location of A1–B1 profile. (c) Bouguer gravity variations along the A1–B1 profile. (d) Moho depth variations along A1–B1 profile after the seismic refraction data of Geotraverse EGT85 [2,3].

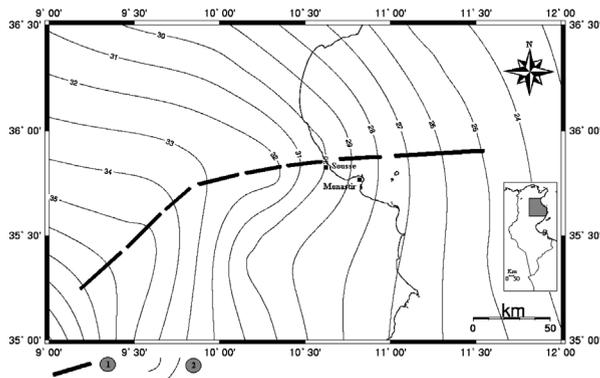


Fig. 2. Carte en isobathes de la discontinuité du Moho dans la région d'étude à partir des données de sismique réfraction de Géotraverse EGT85 [2,3]. (1) Axe de l'amincissement crustal ; (2) courbes en isobathes du Moho.

Fig. 2. Moho isobaths variation in the study area after the seismic refraction data of Geotraverse EGT85 [2,3]. (1) Crustal thinning axis; (2) Moho isobaths lines.

meilleure qui soit disponible actuellement pour le Sahel. Trois profils gravimétriques parallèles, de direction NNW–SSE, ont été sélectionnés entre Kairouan et Sousse–Monastir. Les données de puits pétroliers et de profils sismiques ont fait l'objet d'une consultation pour une vérification précise concernant les structures profondes. Les données de sismicité utilisées ont été fournies par l'Institut national de météorologie (INM) de Tunisie.

3. Cadre structural et gravimétrique général de la région d'étude

La carte des anomalies de Bouguer (Fig. 1B) de la région du Sahel de Tunisie (Fig. 1A) montre que le champ gravimétrique mesuré est perturbé au niveau de la région de Kairouan–Sousse–Monastir et de ses alentours et que le passage du bassin atlasique déformé et tectonisé vers l'est, au-delà de l'Axe nord–sud, n'est pas accompagné par une monotonie gravimétrique caractéristique d'un « shelf gravimétrique ». En effet, en surface, la région d'étude, située en avant-pays de la chaîne atlasique à l'ouest, est caractérisée par la prépondérance des Sebkhias (Fig. 3) (Sebkhia El Kelbia, Sebkhia Sidi El Hani, Sebkhia El Moknine) et de larges plaines quaternaires. Elle est bordée, vers l'ouest, par un important élément orographique de direction globale nord–sud : l'Axe nord–sud [4].

La coupe A1–B1 (Fig. 1B) montre, que même si la tendance globale de la variation des anomalies de Bouguer (Fig. 1C) est liée à l'amincissement crustal en allant du bassin atlasique vers le domaine du Sa-

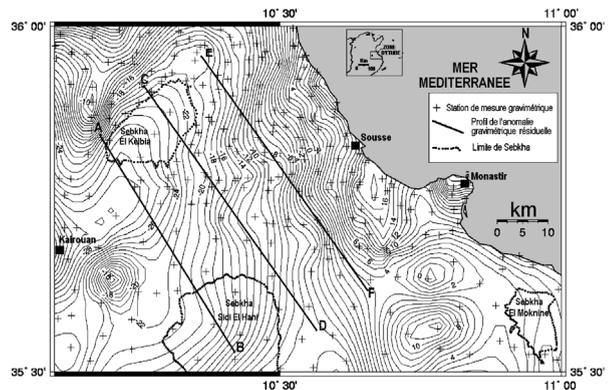


Fig. 3. Carte de l'anomalie gravimétrique résiduelle de la région d'étude, emplacement des stations de mesures gravimétriques et localisation des trois profils gravimétriques de direction NNW–SSE.

Fig. 3. Residual gravity anomaly map of the study region, emplacement of the gravity data and location of the three NNW–SSE gravity profiles.

hel (Fig. 1D), on peut signaler un important ensemble d'anomalies gravimétriques se détachant de l'effet du Moho. Cette configuration reflète le cadre architectural profond du Sahel de Tunisie, soupçonné par la sismique réflexion : larges dépressions plio-quaternaires entrecoupées par d'importants couloirs tectoniques, dans lesquels s'implantent des structures plicatives atlasiques ennoyées [1,10]. Pouvant former d'éventuels pièges pétroliers, cette structuration de subsurface pourrait être une source de promesses pour l'exploration pétrolière dans la région.

La Fig. 2 représente la carte en isobathes du Moho en se référant aux résultats de la campagne de sismique réfraction Géotraverse EGT85 en Tunisie [2,3]. Ce qui est remarquable, c'est la virgation en forme de « doigt de gant » de l'axe de l'amincissement crustal vers la région de Kairouan–Sousse–Monastir, de la direction NE–SW à la direction est–ouest. Il n'est pas évident de trouver une explication à cette variation directionnelle, mais les deux profils (variations des anomalies de Bouguer et de la profondeur du Moho) (Fig. 1C et D) selon la coupe A1–B1 (Fig. 1B) passant par ce « doigt de gant » montrent une certaine similarité concernant cette tendance. Cette direction est–ouest profonde a-t-elle influencé la structuration de la région ? Pour répondre à cette question, il est indispensable d'éliminer l'effet du Moho et de construire la carte gravimétrique résiduelle.

4. Carte de l'anomalie gravimétrique résiduelle détaillée et profils gravimétriques

La construction de la carte d'anomalie, gravimétrique résiduelle (Fig. 3) est effectuée en soustrayant une

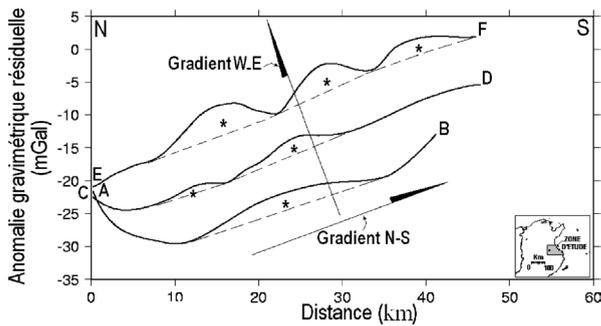


Fig. 4. Trois profils gravimétriques de l'anomalie résiduelle de direction NNW–SSE (localisation sur la Fig. 3). Les anomalies en forme de crête (signalées par une étoile) représentent la signature des structures transpressives ennoyées (d'environ 5 mGal).

Fig. 4. Three NNW–SSE residual-gravity profiles (location in Fig. 3). The stars represent some transpressive structures signatures (5 mGal).

anomalie régionale, qui correspond à l'effet de l'amin-cissement crustal en allant de l'ouest vers l'est, défini par la campagne de sismique réflexion Géotransverse EGT85 [2,3]. Cette anomalie régionale correspond à l'anomalie de Bouguer, prolongée vers le haut de 25 km. La carte d'anomalie gravimétrique résiduelle exprime un gradient positif des anomalies gravimétriques, du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est. Ceci explique un enfoncement prononcé, associé à un épaissement de la série sédimentaire en allant vers l'ouest et vers le nord. Plusieurs formes d'anomalies (fermées, courbes, allongées, etc.) peuvent être reconnues. La construction de trois profils gravimétriques parallèles de l'anomalie résiduelle, de direction NNW–SSE, permet de mieux visualiser les anomalies de subsurface affectant la croûte (Fig. 4). Les deux gradients de variations de l'anomalie gravimétrique résiduelle sont des gradients qui montrent clairement l'enfoncement, et donc la subsidence, du bassin du sud vers le nord et de l'est vers l'ouest. Les anomalies en forme de crêtes (signalées par une étoile sur la Fig. 4) représentent simplement la signature des structures plicatives ennoyées. Ces structures (d'environ 5 mGal) sont plus fréquentes et plus évidentes en allant de l'ouest vers l'est. Le profil E–F de la Fig. 4 montre, par exemple, trois structures plicatives, confirmées par la sismique réflexion et non explorées actuellement.

5. Détection haute résolution des discontinuités de subsurface : carte du signal analytique d'ordre 2 de l'anomalie gravimétrique résiduelle

Depuis le début des années 1970, un large éventail de méthodes automatiques et semi-automatiques, fondées sur l'utilisation du gradient horizontal et/ou vertical du champ gravimétrique (dérivées mathématiques),

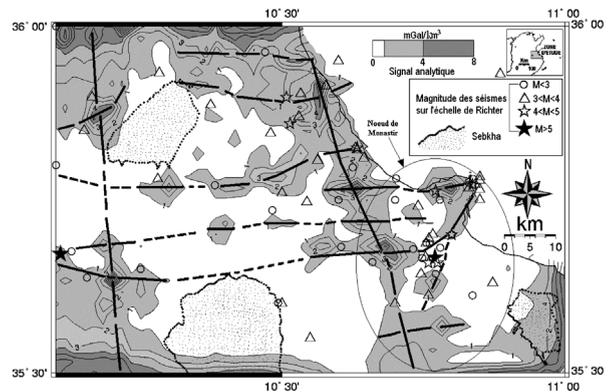


Fig. 5. Carte du signal analytique d'ordre 2 du champ gravimétrique, calée par la distribution des foyers sismiques durant le XX^e siècle. Les maxima d'amplitude du signal analytique correspondent aux grandes discontinuités tectoniques affectant la région.

Fig. 5. Second-order enhanced analytic signal of gravity field map, correlated with the distribution of all seismic events in the last century. The maximum amplitude of the analytic signal defines the major tectonic discontinuities affecting the region.

a été développé afin de déterminer avec précision la localisation des limites géologiques (essentiellement les failles). Le succès de ces méthodes a amené Nabighian [13] à suggérer une technique utilisant tous les gradients possibles dans l'espace (gradients verticaux et gradient horizontal). C'est la technique du signal analytique. La technique du signal analytique d'ordre 2, qui est considérée actuellement comme une technique de haute résolution efficace et précise [7], est utilisée dans cette étude. La mise en oeuvre de cette technique, calée par la distribution des foyers sismiques durant le XX^e siècle, permet de délimiter avec précision les grandes discontinuités tectoniques reconnues dans la région, sur lesquelles s'agencent les structures transpressives. La construction de la carte du signal analytique d'ordre 2 du champ gravimétrique (Fig. 5) met en évidence d'importantes discontinuités de directions est–ouest, nord–sud et NE–SW. Ces dernières correspondent donc au maximum d'amplitude du signal analytique. Elles s'alignent parfaitement avec les foyers des événements sismiques enregistrés dans la région durant le XX^e siècle. Sur cette carte (Fig. 5), la direction est–ouest, qui exprime déjà une anomalie crustale profonde en « doigt de gant » (Fig. 2), est la plus remarquable. Elle correspondrait à un important couloir tectonique, dit de Kairouan–Sousse–Monastir (CKSM), sismiquement actif, sur lequel se greffent ou viennent s'emboîter d'importantes structures plicatives issues de la réactivation des failles, lors des événements atlasiques. Ce couloir serait donc né sur une zone particulière d'amin-cissement crustal. Notons enfin la multitude de possibilités d'agencement

des discontinuités au niveau de la zone de Monastir et vers le sud-ouest (exemple, le nœud sismotectonique de Monastir), qui est associée à une activité sismique intense (régions de Sousse–Monastir, Menzel Nour, etc.).

6. Conclusion

Cette étude a permis de mieux poser et de cerner plus précisément le contexte crustal et gravimétrique de la partie nord du Sahel de Tunisie. L'«effet de butoir» lié aux déformations atlasiques de l'Axe nord-sud [4] est loin d'être le seul cas d'anomalie du point de vue de la signature gravimétrique du Sahel. En effet, la carte des anomalies de Bouguer, ainsi que celle des anomalies résiduelles, montrent clairement un ensemble d'anomalies gravimétriques, de formes et de directions diverses, ne reflétant guère une «monotonie gravimétrique» en passant du domaine atlasique vers le domaine du Sahel. La courbure en «doigt de gant» de l'axe de l'amincissement crustal vers la région de Kairouan–Sousse–Monastir, de la direction NE–SW à la direction est–ouest, est confirmée par les données gravimétriques. Sur cette zone particulière d'amincissement crustal prennent naissance d'importantes discontinuités tectoniques, sur lesquelles s'organisent de nombreuses structures plicatives en «fleurs positives» enfouies. Ces discontinuités sont parfaitement délimitées par la technique du signal analytique haute résolution d'ordre 2. Calée par la distribution des foyers sismiques durant le XX^e siècle, la carte du signal analytique montre clairement cette complexité structurale profonde de la région d'étude. Ainsi, le nœud sismotectonique de Monastir présente, à lui seul, une complexité structurale certaine.

Références

- [1] M. Bédir, Mécanismes géodynamiques des bassins associés aux couloirs de décrochements de la marge atlasique de la Tunisie. Séismo-stratigraphie, séismo-tectonique et implications pétrolières, thèse d'État, université de Tunis, 1995, 407 p.
- [2] H. Bunes, et al., The EGT'85 seismic experiment in Tunisia: a reconnaissance of the deep structures, in: R. Freeman, S. Muller (Eds.), Sixth Workshop on the European Geotraverse project, data compilations and synoptic interpretation, European Science Foundation, Strasbourg, 1989, pp. 197–210.
- [3] H. Bunes, et al., The EGT'85 seismic experiment in Tunisia: a reconnaissance of the deep structures, *Tectonophysics* 207 (1992) 245–267.
- [4] P.F. Burolet, Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale, thèse d'État, Ann. Mines Géol. Tunis 18 (1956) 350 p.
- [5] N. Ellouz, Étude de la subsidence de la Tunisie atlasique orientale et de la mer pélagienne, thèse de 3^e cycle, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 1984, 139 p.
- [6] P. Haller, Structure profonde du Sahel tunisien. Interprétation géodynamique, thèse de 3^e cycle, université de Besançon, 1983, 163 p.
- [7] S.-K. Hsu, J.-C. Sibuet, C.-T. Shyu, High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies: An enhanced analytic signal technique, *Geophysics* 61 (2) (1996) 373–386.
- [8] C. Jallouli, K. Mickus, Regional gravity analysis of the crustal structure of Tunisia, *J. Afr. Earth Sci.* 30 (2000) 345–357.
- [9] Y. Kamoun, Étude néotectonique de la région de Monastir–Mahdia (Tunisie orientale), thèse de 3^e cycle, université Paris-11, 1981, 185 p.
- [10] S. Khomsi, M. Bédir, H. Zouari, M.G. Ben Jemia, Mise en évidence et analyse d'une structure atlasique ennoyée au front de la Chaîne alpine tunisienne, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 1293–1300.
- [11] N. Laridhi Ouazaa, Étude minéralogique et géochimique des épisodes magmatiques mésozoïques et miocènes de la Tunisie, thèse d'État, université de Tunis, 1994, 426 p.
- [12] M.S. Midassi, Regional gravity of Tunisia, M.Sci. thesis, University of South Carolina, Columbia, South Carolina, USA, 1982, 125 p.
- [13] M.N. Nabighian, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relation, *Geophysics* 49 (1984) 957–966.
- [14] M.A. Touati, Étude géologique et géophysique de la concession Sidi El Itayem en Tunisie orientale, Sahel de Sfax, thèse de 3^e cycle, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 1985, 255 p.