

Géophysique interne

Contribution de la gravimétrie et de la sismique réflexion pour une nouvelle interprétation géodynamique des fossés d'effondrement en Tunisie : exemple du fossé de Grombalia

Mohamed Hadj Sassi ^a, Hédi Zouari ^{a,*}, Chokri Jallouli ^b

^a *Laboratoire de géoressources, Centre de recherches et technologies des eaux, BP 273, 8020 Soliman, Tunisie*

^b *Département de géologie, faculté des sciences de Tunis, campus universitaire, 1060 Tunis, Tunisie*

Reçu le 22 février 2006 ; accepté après révision le 10 juillet 2006

Disponible sur Internet le 22 août 2006

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Les fossés d'effondrement en Tunisie ont été interprétés comme des structures d'âge Plio-Quaternaire, liées, soit à des flexures, soit à des failles normales (grabens). L'utilisation de la gravimétrie et de la sismique réflexion dans cette étude a permis de mieux préciser le calendrier géodynamique et la structuration d'un exemple de fossé : le fossé de Grombalia (Tunisie nord-orientale), depuis le Miocène supérieur et jusqu'au Quaternaire. Des anomalies gravimétriques résiduelles négatives, qui peuvent atteindre -15 mGal, sont reconnues, et la magnitude de leur gradient horizontal a permis de reconnaître des linéaments dans les bordures du fossé. L'interprétation des profils de sismique réflexion traversant le fossé de Grombalia permet de déduire que ces anomalies gravimétriques correspondent en fait à un épaississement de la série mio-plio-quaternaire (voir plus anciennes). Les failles en fleur reconnues par la sismique et leur superposition aux linéaments gravimétriques montrent qu'il s'agit de décrochements qui s'enracinent à plus de 4 km de profondeur. L'exemple du bassin de Grombalia, qui illustre l'association entre l'effondrement et les décrochements, se retrouve dans les autres cas en Tunisie, en mer Ionienne et en mer Pélagienne. **Pour citer cet article : M. Hadj Sassi et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Gravity and seismic contribution for a new geodynamic interpretation of troughs in Tunisia: the example of the Grombalia trough. Troughs in Tunisia are interpreted as Plio-Quaternary structures associated to normal faults (grabens) or to flexure faults. Gravity data and seismic sections are used in this study to clarify the structure and the geodynamic evolution of an example of trough: the Grombalia trough (northeastern Tunisia), since the Upper Miocene to the Quaternary. A high residual negative gravity anomaly, which reaches -15 mGal, is interpreted as being related to the thickening of Mio-Plio-Quaternary deposits (and probably older), as illustrated by seismic data. This subsidence has been the result of a negative flower structure related to strike-slip faults that have been reactivated with normal component during the Upper Miocene and with reverse component during the Pliocene. Seismic and gravity data demonstrate that the fault system is rooted, and more than four kilometres deep. The Grombalia example outlines the association between troughs and strike-slip faults; such a system is recognized in Tunisia, in the Ionian Sea and in the Pelagian Sea. **To cite this article: M. Hadj Sassi et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : hedi.zouari@inrst.mrt.tn (H. Zouari).

Mots-clés : Fossé ; Gravimétrie ; Grombalia ; Mer Ionienne ; Mer Pélagienne ; Sismique réflexion ; Décrochement ; Tunisie

Keywords: Trough; Gravity; Grombalia; Ionian Sea; Pelagian Sea; Seismic data; Strike-slip fault; Tunisia

Abridged English version

Introduction

Troughs in Tunisia were described as small basins oriented NW–SE and filled by Quaternary sediments, whose edges appeared to be related to important flexures and normal faults that have played after the Pliocene [6]. These depressions were also described like grabens associated with normal faults having played in the Middle Miocene [3,7]. This study, based on gravity and seismic data, allows us to specify the geodynamic evolution and the structuring of an example of trough related to the polyphase slip of a flower structure associated with a wrench: the Grombalia trough.

The study area is located at the North-East of Tunisia (Fig. 1). It shows a NW–SE-directed structure that corresponds to the Grombalia trough (Fig. 1B). This direction is recognised to the west in the Algero-Tunisian continental domain (FR, FS and FF, Fig. 1A) and to the east in the central Mediterranean ('zone de décrochement' de Medina, Fig. 1A) [5,12].

The deep structure of the western edge of the Grombalia trough is poorly known, because it is covered by the Quaternary series. Under this series, several authors have proposed a graben structure limited by two major faults to explain the thickening of the Mio-Plio-Quaternary series in this trough [3,7,15]. The tectonic nature of the eastern edge is also unclear and is known with the outcrop only in the southern part of the trough, where we observe the Hammamet Fault over a 5-km length (Fig. 1B), recognized by several authors [3,4,7,8,10]. In this study, we try to clarify the deep structure of the Grombalia trough, on the basis of gravity and seismic data.

Gravity data analysis

The gravity data used in this study were obtained from the Tunisian Company of the Petroleum Activities (ETAP). Free-air and Bouguer corrections are carried out using the sea level as a reference. Terrain corrections were added by Jallouli and Mickus [11] using the 5-min topographic grid of the US National Geophysical Data Centre. The residual gravity map (Fig. 2) is obtained by removing the regional anomaly (simple plan of first degree, which corresponds to the thinning of the crust).

Residual map shows a NW–SE negative residual gravity anomaly whose maximum amplitude is -15 mGal (Fig. 2). This anomaly is localised between the Gulf of Hammamet in the South and the Gulf of Tunis in the North.

Between Grombalia and Beni Khalled (Fig. 2), a high-amplitude negative anomaly with a sub-circular form indicates a deficit of mass associated with a Cenozoic subsidence. Two gravity profiles I–J and K–L (Fig. 2) crossing this area indicate the existence of a mass deficit on the length of the trough. The magnitude of the horizontal gradient of the Bouguer anomaly (Fig. 3) helps us to locate features that correspond to the faults recognized by the seismic interpretation in the Grombalia trough.

Seismic data analysis

Three NE–SW seismic profiles (L1, L2 and L3) calibrated by SOL-1 and MZN-1 wells (Fig. 1B) cross the Grombalia trough (Figs. 3 and 4). These profiles show the collapse of the lumachellic carbonated bar of the Aïn Grab Formation (AG, Burdigalian, Fig. 4). The seismic profile L1 shows a flower structure that coincides with a negative gravity anomaly where amplitude varies between 0 to -5 mGal. This structure (characteristic of wrench), probably rooted in the ante-Triassic basement presents ramifications that are related to the Hammamet Fault.

The seismic profile L2 (Fig. 4), calibrated by the MZN-1 well (Fig. 1B), which reaches the Abiod Formation (Upper Campanian–Lower Maastrichtian) at a 1390-m depth, shows half-graben structures in both sides of the principal depocentre (trough of Grombalia). The vertical displacement cumulated of the Aïn Grab top is 0.6 s, which corresponds to 850 m. This displacement is compensated by a manifest subsidence of the Mio-Plio-Quaternary series (Figs. 2 and 3).

The seismic profile L3 (Fig. 4) is located to the north of the profiles L1 and L2 (Fig. 3), crossing the principal depocentre of the Grombalia trough where we note the maximum of the negative gravity anomaly (map and profile I–J, Fig. 2). The flower structure presents syndimentary reverse movements associated to a 'rim-syncline' structure. The cumulated vertical displacement affecting the Aïn Grab bar is about 2.4 s (corresponding to 3500 m).

Discussion and conclusion

The gravity and seismic data analyzed in this study as well as the geological data made it possible to clarify the following points.

The Hammamet Fault is a major deep poly-phased strike-slip fault represented by a flower structure. It has played at least in the first time as a strike-slip with a normal component during the Upper Miocene and as a strike-slip with reverse component during the Pliocene–Lower Quaternary.

This major fault is responsible for the building of the flower structure and represents an example of the association of strike-slip faulting and troughs observed in Tunisia onshore and in the Mediterranean Sea, with NW–SE to east–west strike-slips. Such flower structures are described by Bédir and Bobier [2] in the Pelagian block and by Thomas and Genesseeux [14] in Sardinia and in the Tyrrhenian Sea.

Similar extensive structures, recognized in the Morocco Atlas, have taken place by a NW–SE transtensive tectonic regime during the Upper Miocene associated with the NW–SE convergence movement between Africa and Eurasia [1,5].

In Tunisia, the syn-sedimentary normal faults were recognized in the Kasserine area that have played during Miocene times, inducing a thickening of the Miocene series in the Foussana–Kasserine trough, which is associated with the Kasserine strike-slip fault (DK, Fig. 1A) [7].

During the same period, in Bouficha area (eastern Tunisia), the east–west to N120 faults are reactivated, with a normal component, and are associated with the edification of NE–SW folds. These structures are controlled by a compression phase whose constraint is oriented N120 to N140 [13]. These movements were also announced in the Metlaoui area [17]. During the Plio–Lower Quaternary, the east–west, N120 and N140 faults present a dextral movement with a reverse component related to a NNW–SSE to north–south compressive phase, recognized by several authors [3,7,9,17]. In the Middle Quaternary, these faults are reactivated with a normal component and are observed in the Kasserine [7,9,16] and Gafsa areas [17].

1. Introduction

Les fossés d'effondrement de Tunisie ont été décrits comme des cuvettes NW–SE comblées de sédiments quaternaires, dont les bordures paraissaient liées à d'importantes flexures passant à des fractures qui ont joué après le Pliocène [6]. Ces dépressions ont été dé-

crites également comme des grabens, associés à des failles normales ayant joué au Miocène moyen [3,7]. Cette étude, basée sur une analyse des données gravimétriques et sismiques, permet de préciser l'évolution géodynamique et la structuration d'un exemple de fossé lié au jeu polyphasé d'une structure en fleur, associé à un décrochement : le fossé de Grombalia.

La région d'étude est située au Nord-Est de la Tunisie (Fig. 1). Elle montre une structure orientée NW–SE qui correspond au fossé de Grombalia (Fig. 1B). Cette direction se retrouve dans les structures semblables, à l'ouest, dans le domaine continental algéro-tunisien (FR, FS et FF, Fig. 1A) et, à l'est, dans la Méditerranée centrale (zone de décrochement de Medina) [5,12].

La structure profonde de la bordure occidentale du fossé de Grombalia est mal connue, du fait qu'elle est cachée par les séries du Quaternaire récent, qui reposent en discordance angulaire sur les séries tertiaires. Sous la couverture du Quaternaire récent, plusieurs auteurs ont supposé l'existence de deux failles majeures submériidiennes limitant une structure en graben, pour expliquer l'épaississement des séries mio-plio-quaternaires dans ce fossé [3,7,15].

La nature tectonique de la bordure orientale est également imprécise et n'est connue à l'affleurement que dans la partie sud du fossé, où on observe la faille de Hammamet sur une longueur de 5 km (Fig. 1B), reconnue par plusieurs auteurs [3,4,7,8,10].

En se basant sur les données gravimétriques et de la sismique réflexion, ce travail essaie de préciser la structuration profonde du fossé de Grombalia.

2. Analyse des données gravimétriques

Les données gravimétriques utilisées dans cette étude ont été obtenues auprès de l'Entreprise tunisienne des activités pétrolières (Etap). Les corrections à l'air libre et de plateau sont effectuées en utilisant le niveau zéro de la mer comme référence et une densité de $2,67 \text{ g cm}^{-3}$. Une correction de terrain a été ajoutée par Jallouli et Mickus [11] à partir d'une grille de 5 min de l'US National Geophysical Data Center.

La carte de l'anomalie gravimétrique résiduelle (Fig. 2) est obtenue en supprimant l'anomalie régionale (plan simple de premier degré qui correspond à l'amin-cissement de la croûte en allant vers le nord-est). Sur cette carte, on distingue une anomalie gravimétrique résiduelle négative, dont l'amplitude maximale est de -15 mGal . Cette anomalie est localisée entre le golfe de Hammamet, au sud, et le golfe de Tunis, au nord, selon une direction NW–SE. Entre Grombalia et Beni Khalled (Fig. 2) se distingue une anomalie négative de grande

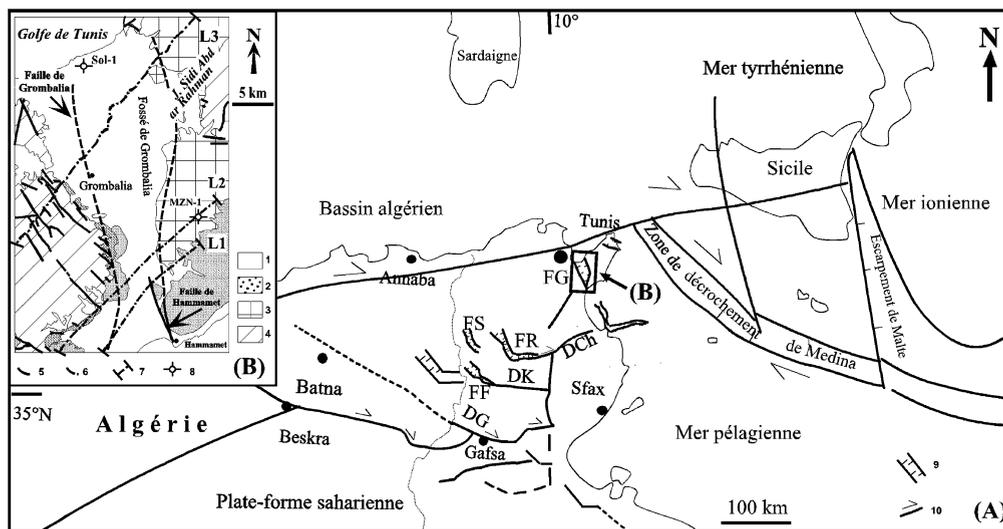


Fig. 1. (A) Les principaux fossés d'effondrement en Tunisie et en Méditerranée centrale. (B) Carte géologique simplifiée de la région d'étude. 1 : Trias-Oligocène ; 2 : Miocène ; 3 : Pliocène-Quaternaire inférieur ; 4 : Quaternaire moyen à Actuel ; 5 : faille ; 6 : faille majeure ; 7 : profil sismique ; 8 : forage pétrolier ; 9 : fossés d'effondrement (FG, FR, FS et FF) : FG de Grombalia, FR de Rohia, FS de Sarrach et FF de Fous-sana-Kasserine ; 10 : décrochement.

Fig. 1. (A) The main troughs in Tunisia and Central Mediterranean Sea. (B) Simplified geological map of Grombalia trough. 1: Triassic-Oligocene; 2: Miocene; 3: Pliocene; 4: Middle Quaternary to Present; 5: Fault; 6: major fault; 7: seismic profile; 8: well; 9: trough faults (FG, FR, FS and FF): FG of Grombalia, FR of Rohia, FS of Sarrach and FF of Foussana-Kasserine; 10: strike-slip fault.

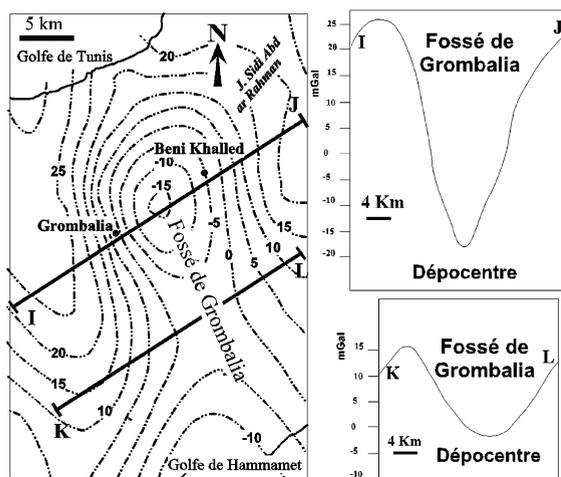


Fig. 2. Carte et profils gravimétriques résiduels du fossé de Grombalia. L'intervalle entre les courbes est de 5 mGal.

Fig. 2. Residual gravity anomaly map and profiles in the Grombalia Basin. The contour interval is 5 mGal.

amplitude et de forme subcirculaire, qui traduit un déficit de masse, associé à une subsidence cénozoïque. Cette anomalie gravimétrique négative est bordée par deux zones anomales, qui présentent toutes les deux des réponses gravimétriques résiduelles positives, indiquant un excès de masse. Ces deux zones coïncident avec les reliefs des bordures occidentale et orientale du fossé de Grombalia. Les deux profils gravimétriques I–J

(Fig. 2) illustrent l'ampleur des anomalies négatives traduisant l'existence d'un déficit de masse sur l'allongement du fossé. Ce dernier est plus important au niveau de la partie nord du fossé de Grombalia, où on observe une anomalie négative plus forte (Fig. 2, profil I–J).

La magnitude du gradient horizontal de l'anomalie de Bouguer (Fig. 3) permet de reconnaître les linéaments suivants dans le fossé de Grombalia :

- un linéament NW–SE, bien exprimé par une grande amplitude du côté ouest ;
- deux linéaments subméridiens, s'individualisant dans le centre et dans la bordure orientale.

Ces linéaments correspondent aux failles reconnues par la sismique.

3. Analyse des lignes sismiques

Les données de forage et de sismique réflexion utilisées dans ce travail sont fournies par l'Etatap. On a utilisé trois profils (L1, L2 et L3) de direction NE–SW, qui traversent le fossé de Grombalia et qui sont calés par les forages SOL-1 et MZN-1 (Figs. 1B et 3).

Ces trois profils sismiques montrent clairement l'effondrement de la barre carbonatée lumachellique de la formation d'Aïn Grab (AG, Burdigalien, Fig. 4).

Le profil sismique L1 montre une structure en fleur bien développée, qui occupe le dépocentre du fossé.

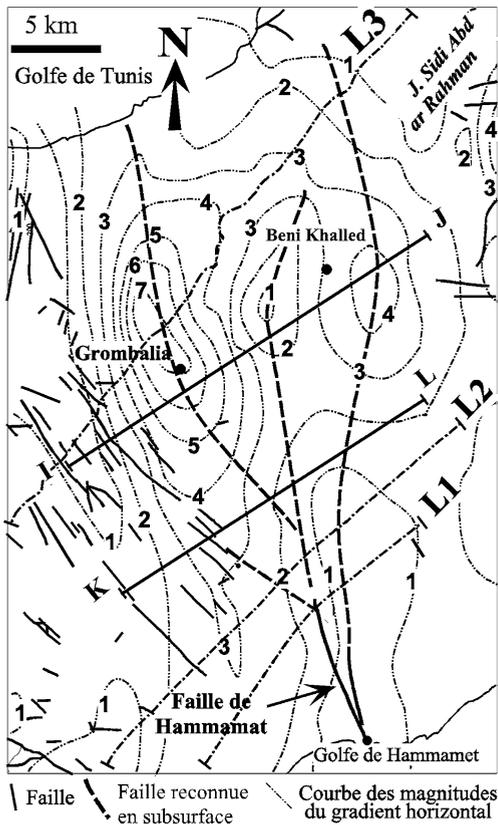


Fig. 3. Carte de la magnitude du gradient gravimétrique horizontal. L'intervalle entre les courbes est de 1 mGal km^{-1} .

Fig. 3. Horizontal gravity gradient magnitude map. The contour interval is 1 mGal km^{-1} .

Celle-ci correspond à une anomalie gravimétrique négative, variant entre 0 et -5 mGal . S'enracinant probablement dans le socle antétriasique, la structure en fleur (caractéristique des décrochements) présente des ramifications qui se greffent sur la faille de Hammamet.

Le profil sismique L2, calé par le puits MZN-1 (Fig. 1B), recoupant la formation Abiod (Campanien supérieur–Maastrichtien inférieur) à une profondeur de 1390 m, montre une structuration en demi-gabens de part et d'autre du dépointe principal (fossé de Grombalia). Le rejet vertical cumulé de la barre repère d'Aïn Grab est de 0,6 s, ce qui correspond approximativement à un rejet de 850 m. Ce rejet est compensé par une subsidence manifeste de la série mio-plio-quaternaire, bien évidente au niveau des cartes et du profil gravimétrique K–L (Figs. 2 et 3).

Le profil sismique L3 (Fig. 4), situé au nord des profils L1 et L2, passe par le dépointe principal du fossé de Grombalia, où on note le maximum de l'anomalie gravimétrique négative sur le profil gravimétrique I–J (-15 mGal , Fig. 2). L'enracinement de la structure en

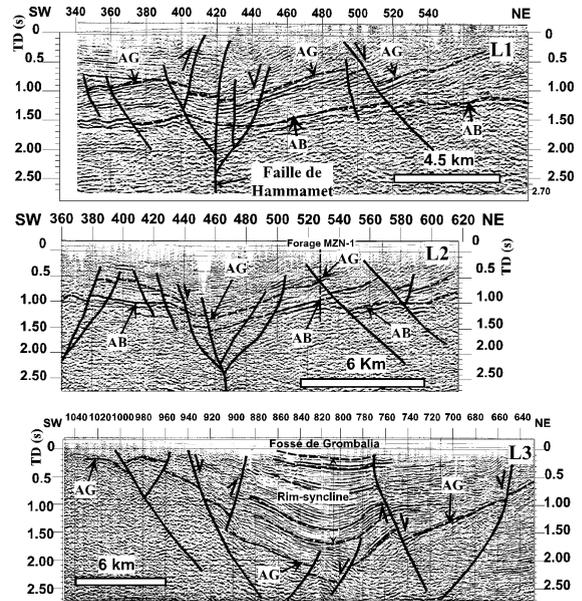


Fig. 4. Interprétations selon une structure en fleur du fossé de Grombalia, d'après les profils sismiques (localisation sur la Fig. 1B). L1, L2 et L3 : Profils sismiques traversant le fossé de Grombalia. Les lignes continues représentent les failles ; les lignes discontinues correspondent au toit des formations Aïn Grab (AG, Burdigalien) et au toit de la formation Abiod (AB, Campanien supérieur–Maastrichtien inférieur). Les flèches indiquent le rejet résultant.

Fig. 4. Flower structure interpretation of the Grombalia Basin, referring to seismic sections (location in Fig. 1B). L1, L2 and L3 : Cross sections toward the Grombalia Basin. Continuous lines correspond to faults, broken lines correspond to tops of Aïn Grab (AG, Burdigalian) and Abiod (AB, Upper Campanian–Lower Maastrichtian); the arrows show the result movement.

fleur s'approfondit et présente des indices de rejeu inverse, témoin des mouvements d'inversions, accompagné d'une structure en éventail synsédimentaire du type *rim-syncline*. Le rejet vertical cumulé affectant la barre repère d'Aïn Grab est à ce niveau de 2,4 s ($>3500 \text{ m}$ d'effondrement). Les données de vitesse au niveau d'un forage fictif, localisé au centre du fossé, permet d'estimer la profondeur de la barre d'Aïn Grab à 4000 m. Ceci traduit l'importance de la subsidence à ce niveau, qui serait associée à de possibles phénomènes d'accumulation de la matière organique reconnue sous forme de lignite dans les séries du Miocène supérieur affleurant au J. Abd ar Rahman.

4. Discussion et conclusion

Les données gravimétriques et de sismique réflexion analysées dans cette étude ainsi que les données géologiques ont permis de préciser les points suivants.

À l'extrémité sud-est du fossé de Grombalia, on a confirmé l'existence de la faille de Hammamet. Cette

dernière se présente comme une faille majeure profonde, sur laquelle se greffent des rameaux de failles, lui donnant l'allure d'une structure en fleur, caractéristique d'un décrochement. Cette structure a joué en premier temps en décrochement, avec une composante normale pendant le Miocène supérieur, puis en décrochement à composante inverse au cours du Plio-Quaternaire inférieur. Le deuxième jeu décrochant a annulé en partie le premier mouvement. Ces mouvements successifs ont pour conséquence l'élaboration d'un relief modéré au niveau de la bordure orientale du fossé [8].

De plus, dans la partie nord de ce couloir, à proximité de la ville de Grombalia, on observe le maximum de subsidence, qui est exprimé par une anomalie négative locale d'amplitude -15 mGal, qui s'explique par une série sédimentaire très épaisse et de faible densité.

L'exemple du fossé de Grombalia illustre la genèse d'un fossé lié au jeu polyphasé d'une structure en fleur de décrochement. Un tel dispositif se retrouve dans les exemples qu'on observe à terre en Tunisie et en mers Pélagienne et Ionienne, avec des décrochements dont la direction moyenne varie de NW–SE à est–ouest.

De telles structures en fleur sont décrites par Bédir et Bobier [2] dans la plate-forme Pélagienne et par Thomas et Gennesseaux [14] dans l'île de Sardaigne et la mer Tyrrhénienne.

Au Maroc, les structures extensives similaires reconstruites dans l'Atlas sont mises en place par un système tectonique transtensif, dont l'axe de contrainte principale maximale est NW–SE pendant le Miocène supérieur, du fait de la convergence NW–SE entre l'Afrique et l'Eurasie [1].

En Tunisie, dans la région de Kasserine, le fossé de Foussana–Kasserine, associé au décrochement de Kasserine (DK, Fig. 1), est affecté par des failles normales syn-sédimentaires d'âge Miocène supérieur [7]. Dans la région de Bouficha, en Tunisie nord-orientale, des failles est–ouest à N120 sont réactivées (au cours de la même période), selon un jeu à composante normale, et sont associées à la genèse de plis NE–SW ; ces structures sont liées à une compression dont la contrainte σ_1 est orientée N120 à N140 [13]. Ces mouvements ont été également signalés dans la région de Metlaoui [17].

Au Plio-Quaternaire inférieur, les failles est–ouest, N120 et N140 présentent des jeux dextres à composantes inverses, liées à la compression subméridienne, reconnues par la plupart des auteurs [3,7,9,17]. Au Quaternaire moyen, ces failles rejouent, avec une composante normale, et sont observées dans différentes régions de la Tunisie : région de Kasserine [7,9,16], région de Gafsa [17].

Références

- [1] L. Ait Brahim, P. Chotin, S. Hinaj, A. Abdelouafi, A. El Adraoui, C. Nakcha, D. Dhont, M. Charrouf, F. Sossey Alaoui, M. Amrhar, A. Bouaza, H. Tabyaoui, A. Chaoumi, Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present, *Tectonophysics* 357 (2002) 187–205.
- [2] M. Bédir, C. Bobier, Les grabens de Mahdia et Sidi Cherif (Tunisie orientale) : dynamique de fossés oligo-miocènes induits au toit d'anticlinaux crétacés-éocènes par les jeux au Néogène de décrochements est–ouest et nord–sud, *Bull. Soc. geol. France* 3 (1987) 1143–1150.
- [3] N. Ben Ayed, Évolution tectonique de l'avant-pays de la chaîne alpine de la Tunisie du début du Mésozoïque à l'Actuel, thèse d'État, université Paris-11, Orsay, Publ. Office Nat. Mines Tunis, 1993.
- [4] H. Ben Salem, Évolution de la péninsule du cap Bon (Tunisie orientale) au cours du Néogène, *Notes Serv. Geol. Tunisie* 61 (1995) 73–84.
- [5] M. Boccaletti, R. Nicolich, L. Tortorici, The Calabrian Arc and the Ionian Sea in the dynamic evolution of the Central Mediterranean, *Mar. Geol.* 55 (1984) 219–245.
- [6] G. Castany, Les fossés d'effondrement de Tunisie, *Ann. Min. Geol. Tunis* 3 (1948).
- [7] L. Chihi, Les fossés néogènes à quaternaires de la Tunisie et de la mer Pélagienne : une étude structurale et une signification dans le cadre géodynamique de la Méditerranée centrale, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, 1995.
- [8] B. Colleuil, Étude stratigraphique et néotectonique des formations néogènes et quaternaires de la région de Nabeul-Hammamet (Cap Bon, Tunisie), *Mém. DES, faculté des sciences et techniques, Nice*, 1976.
- [9] M. Dlala, S. Rebai, Relation compression–extension Miocène supérieur à Quaternaire en Tunisie : implication sismotectonique, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 319 (1994) 945–950.
- [10] M. Hadj Sassi, Étude tectonique et gravimétrique du fossé de Grombalia et de ses environs (Tunisie nord-orientale), *Mém. DEA, faculté des sciences de Tunis*, 2002.
- [11] C. Jallouli, K. Mickus, Regional gravity analysis of the crustal structure of Tunisia, *J. Afr. Earth Sci.* 30 (2000) 63–78.
- [12] D. Jongsma, J.M. Woodside, G.C.P. King, J.E. van Hinte, The Medina Wrench: a key to the kinematics of the central and eastern Mediterranean over the past 5 Ma, *Earth Planet. Sci. Lett.* 82 (1987) 87–106.
- [13] H. Mzali, H. Zouari, Caractérisation géométrique et cinématique des structures liées aux phases compressives de l'Éocène au Quaternaire inférieur en Tunisie : exemple de la Tunisie nord-orientale, *C. R. Geoscience* 338 (2006) 742–749.
- [14] B. Thomas, M. Gennesseaux, A two stages rifting in the basins of the Corsica–Sardinia States, *Mar. Geol.* 72 (1986) 225–239.
- [15] M.M. Turki, Polycinématique et contrôle sédimentaire associé sur la cicatrice de Zaghuan-Nebhana, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, 1985.
- [16] H. Zouari, Étude structurale du J. Chaambi (Tunisie centrale), relation entre la minéralisation et la structure, thèse de 3^e cycle, université de Besançon, 1984 (93 p.).
- [17] H. Zouari, Évolution géodynamique de l'Atlas centro-méridional de la Tunisie : stratigraphie, analyses géométrique, cinématique et tectono-sédimentaire, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, université Tunis-2, 1995 (277 p.).