



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 587–595



Géodynamique

Rôle de l'halocinèse dans l'évolution du bassin d'Essaouira (Sud-Ouest marocain)

Khalid Mehdi^a, Roger Griboulard^{b,*}, Claude Bobier^b

^a Laboratoire de géosciences marines, faculté des sciences, département de géologie, 24000 El Jadida, Maroc

^b Département de géologie et d'océanographie (DGO), UMR CNRS n° 5805, université Bordeaux-I,
avenue des Facultés, 33405 Talence, France

Reçu le 23 septembre 2003 ; accepté le 9 décembre 2003

Disponible sur Internet le 17 avril 2004

Présenté par Jean Dercourt

Résumé

Les études de sismique réflexion réalisées dans le bassin d'Essaouira, zone intermédiaire entre le Haut Atlas et la marge Atlantique, démontrent la présence de nombreuses structures halocinétiques ayant joué un rôle important dans l'évolution du bassin. L'activité du sel a été contrôlée, d'une part, par le *rifting* atlantique et, d'autre part, par l'orogénèse atlasique. Ce double contrôle, ainsi que la segmentation de la marge, sont à l'origine de l'activité diachronique du sel. L'halocinèse a varié dans le temps et dans l'espace ; elle est plus active en domaine marin, où on distingue du sel autochtone et allochtone. **Pour citer cet article : K. Mehdi et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Role of halokinesis in the Essaouira Basin evolution (SW Morocco). The seismic reflection studies carried in the Essaouira Basin, intermediate zone between the High Atlas and the Atlantic Margin, show the presence of halokinetic structures that played a significant role in the evolution of the basin. Salt dynamics was controlled by the Atlantic rifting and the Atlasic orogen. These tectonic controls and the margin segmentation are responsible for the diachronism of salt movement. Halokinesis varied in time and space in the basin and was more active offshore, where autochthonous and allochthonous salt layers are present. **To cite this article: K. Mehdi et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : halocinèse ; *rifting* ; marge passive ; segmentation ; inversion tectonique ; bassin d'Essaouira ; Maroc

Keywords : Halokinesis ; rift ; passive margin ; segmentation ; tectonic inversion ; Essaouira Basin ; Morocco

Abridged English version

1. Introduction

The Essaouira Basin (Fig. 1) is located on the northwestern Margin of the African Plate between la-

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : mehdikhalid@hotmail.com (K. Mehdi),
r.griboulard@epoc.u-bordeaux1.fr (R. Griboulard).

itudes 30°30' and 32° N. It includes the continental shelf and the coastal plain bounded to the north by the Paleozoic Jebilet Massif and to the south by the Cenozoic South-Atlasic Front. Due to this location, the structural evolution of the basin is strongly controlled by rejuvenation of the basement discontinuities [2] during several tectonic phases [7,12,13] (Fig. 2) from Lower Triassic to the Present Time. Triassic age rifting characterised by rhomb-grabens filled up by erosional products from neighbouring horsts. During Liassic time extension continues associated with the Atlantic opening. Compression (N20° E) starts during the Upper Cretaceous giving N70° E trending folds [8,13]. A post-Eocene compression (N110° E) reworked previous structures giving anticlines trending either NE–SW (Northern Tidsi, Meskala) or east–west (Amsittène, Tidsi, Sidi Rhalem and Guettata) associated with salt diapirs (Tidsi), *en echelon* folds (Bouzerroune, J. Kharouba, J. Jbail) and a north–south Anticlinorium running from J. Kechoula to Aït Zelten.

2. Salt tectonics

Fig. 2 points out the importance of post-rift structures induced by salt movement either onshore (J. Tidsi, J. Hadid, Palmera) or offshore, to the west of Jebel Amsittène and near the western boundary of the Tafelney Terrace. Three main steps of salt tectonics can be identified: Lower Jurassic, Upper Jurassic–Lower Cretaceous and Upper Cretaceous to Cenozoic. Two types of halokinetic structures are observed. The first one corresponds to salt diapirs oriented N20° E and N70° E connected with normal faults cutting through the basement and related to crustal scale rifting. The second, of thin-skin type, corresponds to raft structures due to gravity collapse during Upper Cretaceous Atlasic Compression.

A north–south seismic profile crossing the Tafelney Plain (Fig. 3) shows a N20° E trending fault. This later bounds a graben that takes it in turn in a system of faults. These faults are slightly dip connected with a bedding plane in salt, inducing disharmonic folding. To the north of this structure, faults play as reversed faults. A seismic profile, normal to the previous one (Fig. 4), shows listric normal faults rooted in a salt decollement. These faults have been reactivated during Upper Cretaceous, giving flower-

type structures responsible for the inversion of some structures deaden in Cenozoic levels.

An east–west profile cutting the northern part of the Jebel Tidsi (Fig. 5) shows an anticline bounded by rim synclines along NNE–SSW wrench faults. To the west, thrust components of displacement along these faults are related to post-Eocene compression.

During Jurassic–Cretaceous times, tectonic activity is mostly represented by basement fault reactivation and associated NNE–SSW trending flower-type structures. From Upper Cretaceous to Cenozoic, ductile deformation and reverse faulting prevailed.

Seismic profiles recorded on the continental shelf shows several salt levels thrust to the west (Fig. 2) around the Tafelney Terrace. These structures indicate a complex structural evolution that includes, first, upward salt displacement along normal faults cross cutting the basement and, second, during Upper Cretaceous and Tertiary times, compressional reactivation of these faults associated to the development of salt walls and salt sheets. In the deeper part of the margin (below the 1000-m isobath) salt sheets are involved in the progradation prism, as observed in other regions, such as Gulf of Mexico, Gulf of Guinea and North Sea. This gives two types of allochthonous structures corresponding to two structural stages. The first one, which results from upward salt movement along normal faults in flower-type structures, is similar to salt complexes observed in the Gulf of Mexico abyssal plain [10,14]. The second one, related to the Cretaceous compression, resulted from salt movement along reversed structures, drives thrusting to the west of the sedimentary cover toward the sea.

3. Discussion and conclusion

In the Essaouira Basin, the style of salt tectonics changes from east to west. Rather limited to the east, the intensity of salt tectonics increases westward to give salt walls and diapirs in the western part of the coastal plain and more complex structures on the continental shelf. These variations seem to be related to facies variations of the Triassic formations that are more continental with some dolerites, to the east, passing to thick salt layers and dolerites flows to the west.

The north–south variation of salt tectonics style of the Essaouira Atlantic margin is here subdivided into two blocks:

- (i) to the north, in the Essaouira block, between the Tafelney and Essaouira faults, salt diapirs are associated with flower structures and do not pierce the sedimentary cover;
- (ii) to the south, in the Tafelney block, between the Essaouira and Amsittène faults, salt often pierces the sedimentary cover giving locally allochthonous salt masses. This north–south variation seems to be related to the timing of the Atlantic rifting along the Moroccan Margin.

Salt tectonics, in the Essaouira Basin, was controlled by the episodic reactivation of basement faults in transtension and transpression, and played an important role in the structural evolution.

1. Introduction

Le bassin d'Essaouira, situé sur la bordure nord-ouest du continent africain (Fig. 1), recouvre la plaine côtière et la plate-forme immergée entre les latitudes

30°30' et 32°00' N. En domaine continental, il est limité, au nord–est, par le massif hercynien des Jebilet, au sud, par le front Sud-Atlasique et, à l'ouest, par la lithosphère océanique atlantique. Le segment d'Essaouira se trouve dans une zone d'interférence entre deux types de structures, les premières liées à l'évolution de la marge atlantique, les secondes liées à l'orogénèse atlasique.

L'architecture du bassin mésozoïque d'Essaouira a été influencée par la réactivation des accidents du socle hercynien [2], au cours de plusieurs phases tectoniques, à partir du Trias [7,12,13] (Fig. 2). Le Trias se caractérise par une période de subsidence importante. Les affaissements sont compensés par des soulèvements accompagnés d'une érosion intense. L'intervalle Trias–Lias caractérise le début du rifting atlantique, et les dépôts jurassiques sont surtout affectés par des failles synsédimentaires, qui rejouent [11] au cours du Jurassique supérieur.

Deux phases principales de compression affectent ensuite les dépôts antérieurs. La première a lieu dès la fin du Crétacé, avec une direction de raccourcissement orientée N20° E, responsable en particulier de plis d'orientation axiale N70° E à est–ouest [8,13]. La seconde, post-éocène, correspond à une compression

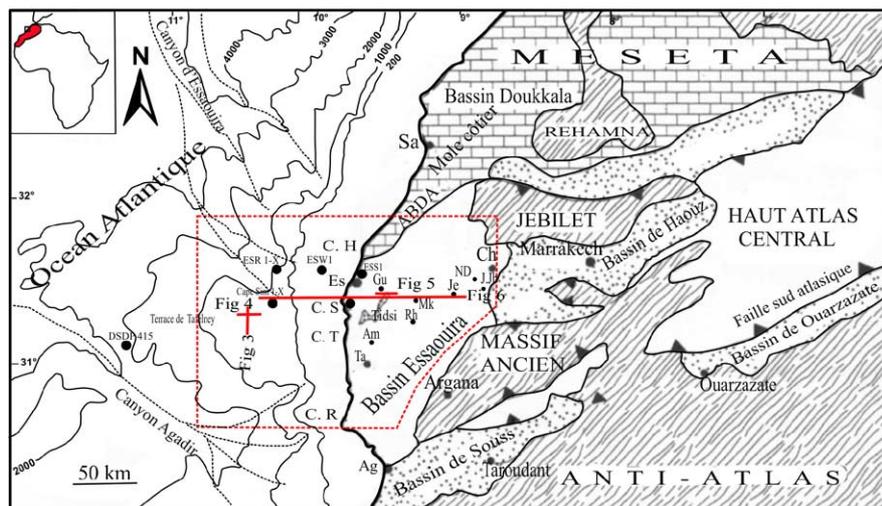


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude et cadre régional (carte géologique du Maroc au 1 : 1 000 000, bathymétrie d'après [8]). **Ag** : Agadir, **Am** : Amsittène, **Ch** : Chichaoua, **CH** : cap Hadid, **CR** : cap Rhir, **CS** : cap Sim, **CT** : cap Tafelney, **Es** : Essaouira, **Gu** : Guettata, **JB** : Jebel Jbail, **Je** : Jeer, **Me** : Meskala, **ND** : N'Dark, **Rh** : Sidi Rhalem, **Ta** : Tamanar, **Ti** : Tidsi.

Fig. 1. Location of the study area and regional framework (1:1 000 000 geological map of Morocco, bathymetry after [8]). **Ag**: Agadir, **Am**: Amsittène, **Ch**: Chichaoua, **CH**: cap Hadid, **CR**: cap Rhir, **CS**: cap Sim, **CT**: cap Tafelney, **Es**: Essaouira, **Gu**: Guettata, **JB**: Jebel Jbail, **Je**: Jeer, **Me**: Meskala, **ND**: N'Dark, **Rh**: Sidi Rhalem, **Ta**: Tamanar, **Ti**: Tidsi.

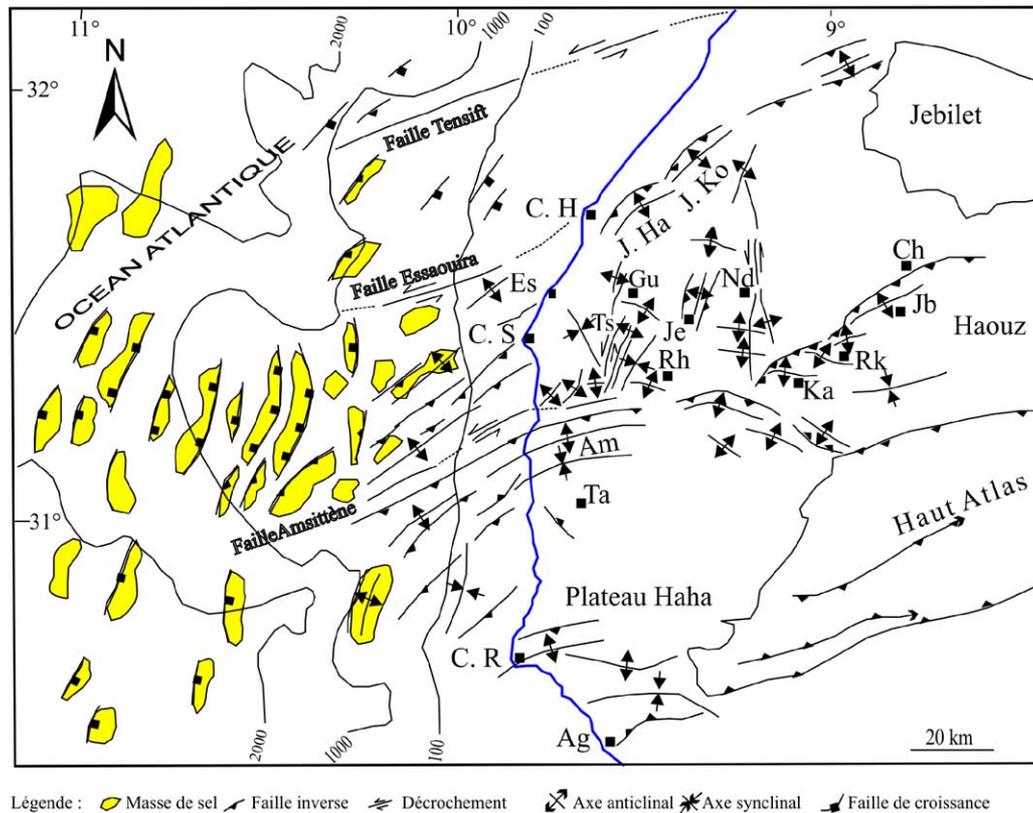


Fig. 2. Cadre structural du bassin d'après la compilation des données géophysiques disponibles et des travaux antérieurs (abréviations, Fig. 1) [7].

Fig. 2. Structural map of the basin. Data are the compilation of available geophysical data and of previous works (abbreviations, Fig. 1) [7].

orientée N110° E, responsable de nombreuses structures d'échelle cartographique : anticlinaux orientés NE–SW (Tidsi nord, Meskala), ou est–ouest (Amsittène, Tidsi sud, Sidi Rhalem et Guetata), injections salifères (diapir de Tidsi par exemple), et plis en échelon (Bouzeroune, Kharouba, Jbel Jbail). Il en est de même pour l'anticlinorium nord–sud, qui s'étend depuis Kechoula au nord jusqu'à Ait Zelten au sud, et qui, connecté à l'anticlinal de Sidi Rhalem, sépare le bassin d'Essaouira en deux zones : l'une affaissée à l'ouest, et l'autre surélevée à l'est. Ces structures régionales sont accompagnées à petite échelle par des failles inverses, flexures transverses, stylolithes, fentes de tension [13].

L'objet de cette note concerne l'analyse des structures salifères dans le bassin, à l'aide de profils de sismique réflexion. Son objectif est de comprendre et préciser le cadre de l'halocinèse et de juger, en particulier,

du rôle de l'inversion tectonique sur les remobilisations des dépôts salifères.

2. La tectonique salifère

La carte de répartition des structures salifères (Fig. 2) montre plusieurs structures post-rift de type diapirs à terre (Jebel Tidsi, Jebel Hadid, Palmera...) et en mer, dans le prolongement de la ride d'Amsittène, ainsi qu'en bordure occidentale de la plaine de Tafelney.

Trois périodes de mouvement du sel sont reconnues :

- (1) au début du Jurassique,
- (2) à la limite Jurassique supérieur–Crétacé inférieur, et
- (3) du Crétacé supérieur au Tertiaire.

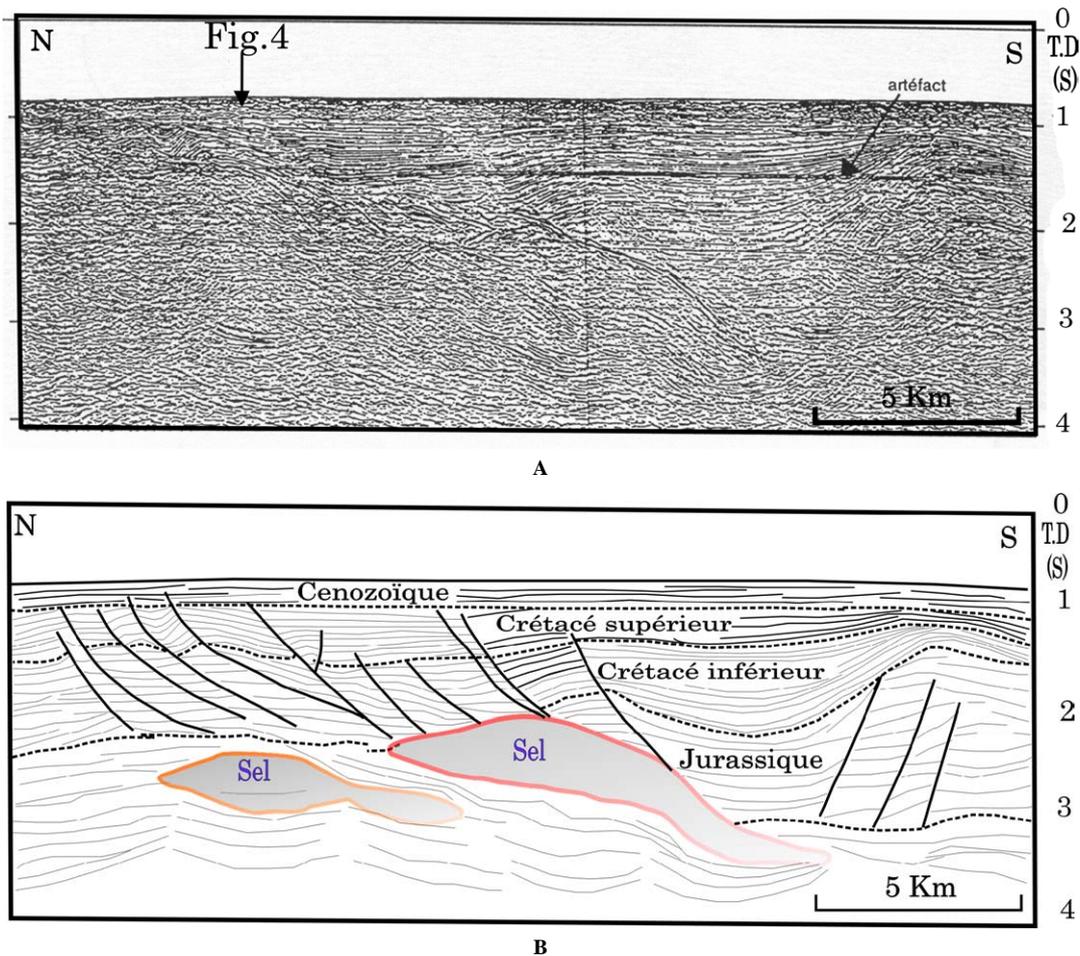


Fig. 3. Extrait du profil sismique SP 83-64. **A** : profil non interprété, **B** : profil interprété montrant l'importance des failles bordières et du sel en domaine marin.

Fig. 3. Part of seismic line SP 83-64. **A**: non-interpreted profile, **B**: interpreted profile showing the offshore importance of the border faults and salt.

Les diapirs de sel sont de deux types, ceux situés au-dessus de failles normales du socle et ceux qui n'impliquent pas de tels accidents. Les premiers résultent d'une extension crustale ; ainsi, les directions variables $N20^{\circ}$ E et $N70^{\circ}$ E des diapirs salifères relevées à travers le bassin d'Essaouira sont-elles identiques à celles des axes des structures du bassin et peuvent-elles s'aligner sur des directions de failles identifiées en sismique. Les seconds sont associés à une tectonique en « radeaux », par glissement gravitaire au-dessus du sel [6,7]. L'ascension des diapirs localisés au-dessus de failles du socle est contrôlée par une subsidence différentielle entre zone affaissée et zone sur-

élevée. Cette différence de comportement est engendrée par la réactivation de failles du socle, après le dépôt de la série salifère et le développement de nouvelles failles.

L'inversion tectonique (*rifting* atlantique et surrection atlasique) pendant la phase de compression d'âge fini-Crétacé donne naissance, en domaine marin, à des diapirs [3,5]. Ce diapirisme se caractérise par le développement de structures halocinétiques allochtones détachées de leur racine.

L'analyse du profil *offshore* nord-sud SP 83-64 (Fig. 3) montre une faille bordière orientée $N20^{\circ}$ E [7], qui s'enracine dans un niveau de décollement basal

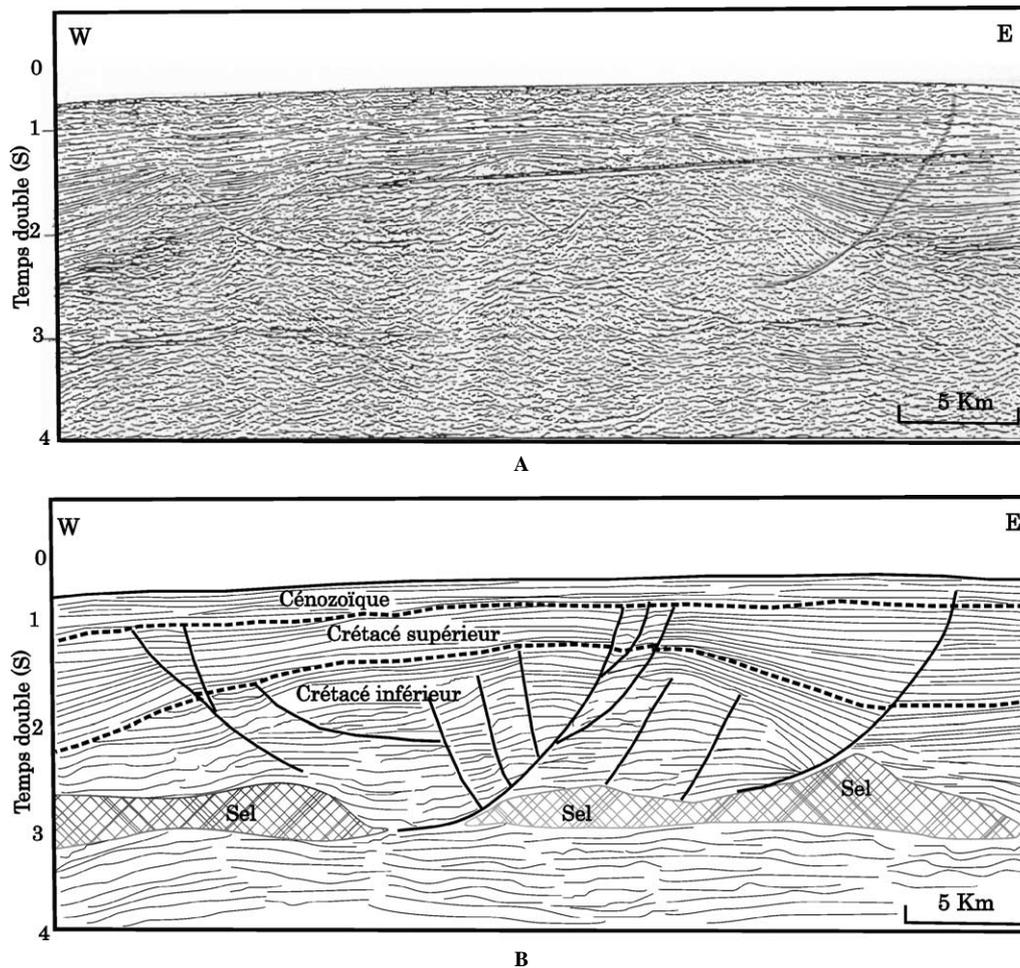


Fig. 4. Extrait du profil sismique SP 83-43. **A** : profil non interprété, **B** : profil interprété montrant le style des failles listriques synsédimentaires.

Fig. 4. Part of seismic line SP 83-43. **A**: non-interpreted profile, **B**: interpreted profile showing the style of the listric growth faults.

prenant naissance à la surface du sel et sur laquelle se connecte une série de failles de directions variées. Ce décollement entraîne l'apparition de phénomènes de dysharmonie.

Le profil SP 83-43 (Fig. 4), perpendiculaire au précédent, montre des failles listriques initiées durant le Crétacé inférieur et s'enracinant dans un niveau salifère. Elles ont rejoué au cours du Crétacé supérieur, avec développement de failles secondaires branchées sur les failles initiales. Ces failles accommodent l'inversion de la structure pendant le Crétacé supérieur et s'amortissent rapidement dans les séries tertiaires.

En domaine émergé, un profil est-ouest (Fig. 5) traversant la partie nord du diapir du Jebel Tidsi montre

que les flancs de cette structure sont limités par des décrochements NNE–SSW, reconnus en surface [1,13], dont le jeu, inverse au tertiaire, est responsable d'un léger déversement vers l'ouest de ce pli, dont les séries orientales sont surélevées, et de la formation de sillons subsidants (*rim-syncline*) sur son pourtour. Il s'agit d'un système de failles inverses à plans subverticaux le long desquelles sont remontés les sédiments et les basaltes triasico-liasiques [1,13].

Pendant le Jurassique et le Crétacé, la déformation induit une compartimentation du bassin le long d'accidents décrochants NNE–SSW, dont le jeu est souligné par des structures en fleur. Pendant le Crétacé supérieur et le Cénozoïque, elle est caractérisée par un plis-

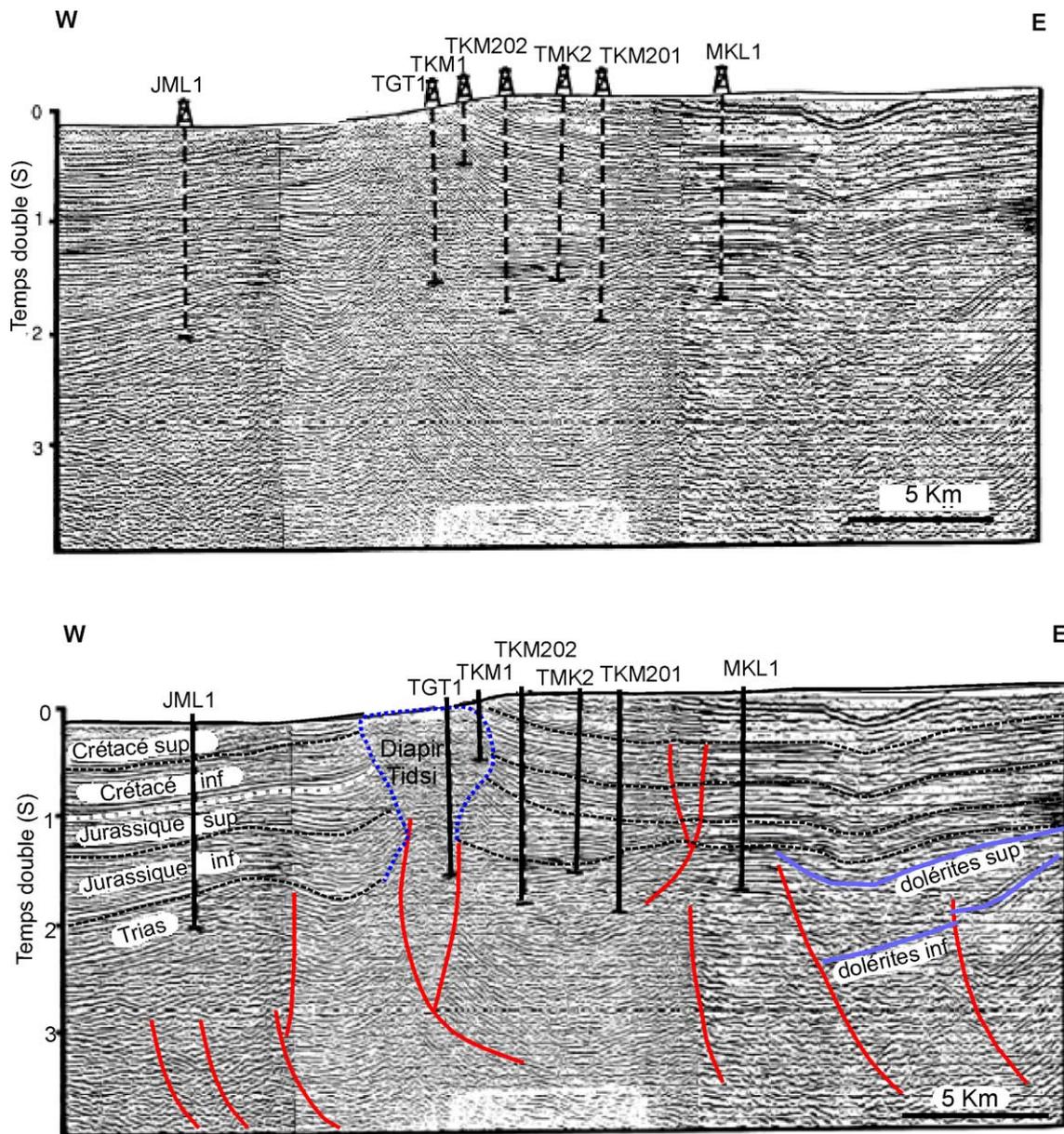


Fig. 5. Profil sismique recoupant le horst de Meskala, le diapir de Tidsi et la structure de Jemailat.

Fig. 5. Seismic profile cutting the Meskala horst, the Tidsi diapir and the Jemailat structure.

sement de la couverture sédimentaire et par le développement d'accidents inverses. À terre, les anticlinaux localisés à l'aplomb de discontinuités profondes soulignent le rôle essentiel de l'héritage tectonique dans l'évolution structurale du bassin. En mer, la compression atlasique s'exprime, dans la couverture, par des

plis associés aux diapirs. La structuration du bassin qui débute au Crétacé inférieur par un soulèvement s'accroît au cours du Tertiaire.

En domaine *offshore*, le bassin d'Essaouira présente une zone caractérisée par des coussins salifères plus ou moins superposés, à vergence ouest (Fig. 2),

plus importants au large du cap Tafelney. Ces masses salifères, allochtones, sont canalisées par les failles normales limitant les blocs basculés au niveau de la pente continentale. Lors de leur réactivation en failles inverses à vergence ouest durant le Crétacé supérieur–Tertiaire, le sel est extrudé le long des failles donnant naissance à des «glaciers ou murs» de sel, comparables à ceux observés dans le golfe de Guinée, le golfe du Mexique [4,10] et en mer du Nord. Le sel, d'origine allochtone, a subi un effet de progradation le long du talus en se détachant de sa racine ; il a ensuite été injecté dans les séries crétacées et tertiaires.

3. Discussion et conclusion

La tectonique salifère du bassin d'Essaouira varie notablement d'est en ouest. À terre, les diapirs sont souvent associés à des accidents multiples à jeu inverse et connectés en profondeur à des failles décrochantes (diapir de Tidsi, Fig. 6). Cette dynamique du sel devient plus active à l'approche du littoral.

En mer, la tectonique salifère est beaucoup plus intense et le jeu des décrochements est plus important. Les failles listriques, d'âge Crétacé inférieur, sont réactivées en accidents cisailants soulignés par des structures en fleurs, au niveau de la plate-forme et du talus. Dans ce contexte structural, le sel devient plus mobile (actif) et plusieurs stades peuvent être distingués. La mobilité du sel débute dès la fin de la phase syn-rift fini-triasique, s'intensifie durant la phase post-rift jurassique et atteint les séries du Tertiaire durant l'inversion tectonique atlasique. Les diapirs ont des bordures faillées dont le jeu principal affecte le Crétacé inférieur et le Tertiaire. Ils sont localisés, en gé-

néral, dans des couloirs de décrochement, qui ont été le siège de l'extension à l'origine du diapirisme.

Dans le bassin d'Essaouira, la plate-forme sous-marine est subdivisée en deux blocs (Fig. 2).

- Le bloc d'Essaouira, au nord, est limité par les accidents du Tensift, au nord, et d'Essaouira, au sud. Les failles décrochantes sont associées à des failles de croissance en relation avec l'halocinèse du Trias supérieur au Crétacé inférieur. Les dômes de sel ne sont pas perçants et forment des coussins de sel à l'origine de bourrelets affectant les cortèges sédimentaires jurassiques et crétacés. Les rides salifères ont une orientation NNE–SSW.
- Le bloc de Tafelney, au sud, est limité par les accidents d'Essaouira et du Jebel Amsittène et se caractérise par la présence de sel autochtone, avec des dômes perçants au Jurassique et au Crétacé, qui atteignent parfois le Tertiaire, et de sel allochtone détaché de sa racine, au-delà de l'isobathe des 500 m lié à l'inversion tectonique.

On attribue les deux types de masses salifères allochtones en *offshore* profond à deux niveaux structuraux différents.

- Le niveau supérieur est en liaison avec le glissement gravitaire le long du talus continental, où le sel est lié à un système de failles de croissance. Le sel allochtone est complètement détaché de sa racine et intégré au sein des sédiments du Crétacé supérieur, sous forme de coussins ou d'amas. Ces configurations géométriques du sel allochtone sont comparables aux structures salifères complexes, présentes en bordure de la plaine abyssale du golfe du Mexique [10,14].

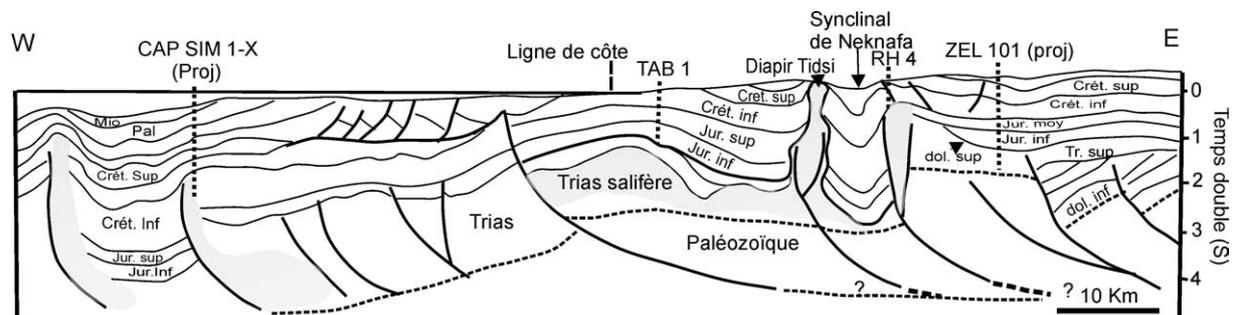


Fig. 6. Coupe synthétique est-ouest.

Fig. 6. East–west-trending synthetic cross section.

- Au niveau inférieur, l'essentiel de l'activité du sel est en relation avec la phase de raccourcissement maximal du Crétacé supérieur (orogénèse atlasique). Le sel est extrudé le long des failles réactivées et a subi un glissement vers l'ouest le long de la pente continentale.

Cette diachronie de l'halocinèse est à mettre en relation avec la diachronie du *rifting*, dont l'ouverture a varié du nord au sud et de l'est vers l'ouest [9].

En conclusion, l'activité halocinétique à terre et en mer a joué un rôle important dans l'évolution, la mise en place et la différenciation des corps sédimentaires du bassin. Relativement réduite à l'est du bassin à terre, elle est plus active vers le littoral et en mer. L'activité du sel est très importante en *offshore* au large du cap Tafelney, prolongement atlantique du Haut Atlas. La plupart des structures diapiriques sont alignées sur des failles de socle réactivées : décrochements en échelon associés à l'extension triasico-liasique de la Pangée, puis à l'ouverture Jurassique–Crétacé inférieur de l'Atlantique, et enfin à l'orogénèse Atlasique Crétacé supérieur–Cénozoïque. Ceci souligne une étroite relation entre l'activité tectonique et l'halocinèse. Le sel a été l'objet de mouvements dès le Trias supérieur, sans couverture. Au Jurassique et au Crétacé inférieur, des dômes percent le long de failles réactivées en tension et/ou en transtension. Il est à nouveau actif dès la fin du Crétacé supérieur, et l'ascension du sel est à l'origine de l'individualisation de bassins en *rim syncline* à fort taux de sédimentation au Jurassique et au Crétacé.

Ainsi, la segmentation de la marge, variable le long des bassins côtiers, a été un facteur important dans la variation spatio-temporelle de l'halocinèse le long de la marge atlantique marocaine.

Références

- [1] M. Amrhar, Évolution structurale du Haut Atlas occidental dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique central et de la collision Afrique–Europe. Structure, instabilités tectoniques et néomagmatisme, Thèse d'État, université Cadi Ayad Marrakech, Maroc, 1995, 235 p.
- [2] J.-J. Cornée, J. Ferrandini, B. Simon, Évolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques, un graben Cambrien moyen entre deux décrochements dextres N60E hercyniens (Maroc), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 305 (1987) 499–503.
- [3] D.M. Davids, T. Engelder, The role of salt in fold and thrustbelts, *Tectonophysics* 119 (1–4) (1985) 67–89.
- [4] S. Demerican, P. Szatmari, P.R. Cobbold, Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned gravitational gliding, Campos and Santos basin, offshore Brazil, *Tectonophysics* 228 (3–4) (1993) 383–393.
- [5] J.F. Flinch, A.W. Bally, Wu Shengu, Emplacement of a passive margin evaporitic allochthon in the Betic Cordillera of Spain, *Geology* 24 (1) (1996) 67–70.
- [6] V. Gaullier, J.-P. Brun, J.-P. Guérin, H. Lecanau, Raft tectonics: the effects of residual topography below salt decollement, *Tectonophysics* 288 (3–4) (1993) 349–363.
- [7] M. Hafid, A. Ait Salem, A.W. Bally, The western termination of the Jebilet High Atlas system-offshore Essaouira Basin (Morocco), *Mar. Pet. Geol.* 17 (2000) 431–443.
- [8] K. Hinz, H. Dostmann, J. Fritsch, The Continental Margin of Morocco: seismic sequences, structural elements and geological development, in: U. Von Rad (Ed.), *Geology of the Northwest African Continental Margin*, Springer, Berlin, 1982, pp. 34–60.
- [9] P. Le Roy, Les bassins ouest-marocains. Leur formation et leur évolution dans le cadre de l'ouverture et du développement de l'Atlantique central (marge africaine), Thèse, Université de Bretagne occidentale, Brest, 1997, 326 p.
- [10] B.C. McBride, The Evolution of allochthonous salt along a megaregional profile across the northern Gulf of Mexico, *A.A.P.G. Bull.* 82 (1998) 1037–1054.
- [11] M. Mattauer, P. Tapponnier, F. Proust, Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc, *Bull. Soc. géol. France* 7 (3) (1977) 521–526.
- [12] K. Mehdi, Étude géologique et géophysique de la partie orientale du bassin d'Essaouira. Thèse, Université Bordeaux-1, France, 1994, 56 planches, 350 p.
- [13] A.K. Souid, Étude tectonique et microtectonique des injections du Trias du bassin d'Essaouira pendant la compression alpine de l'avant-pays Atlasique (Maroc), Thèse de 3^e cycle, Université de Montpellier, France, 1983, 125 p.
- [14] S. Wu, A.W. Bally, C. Cramez, Allochthonous salt structure and stratigraphy of the northeastern Gulf of Mexico, Part II, *Structure, Mar. Petr. Geol.* 7 (1990) 334–370.