

Contribution à l'étude d'une partie du bassin d'Essaouira (Maroc) par sismique réflexion

Mohammed Jaffal^a, Azzouz Kchikach^a, Jean-Pierre Lefort^{b,*}, Lahoucine Hanich^a

^a Faculté des sciences et techniques, université Cadi-Ayyad, BP 618, Marrakech, Maroc

^b Géosciences Rennes, université Rennes-1, campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

Reçu le 10 décembre 2001 ; accepté le 29 janvier 2002

Présenté par Jean Dercourt

Abstract – Contribution to part of the Essaouira Basin (Morocco) by seismic reflection. A large number of seismic reflection lines and boreholes have been carried out in the Essaouira Basin by the oil industry. The present study concentrates on the reinterpretation of these data in the restricted area of Khemis Meskala, in order to better characterise the structure of the Cretaceous aquiferous system. The reflector corresponding to the bottom of the Vraconian formation has been identified on the different seismic sections. This horizon, which marks the base of the aquiferous system, was first digitised on time migration sections and then converted to depth sections using a suitable linear velocity law. The isobath map of the bottom of the Vraconian resulting from this study images the 3D geometrical structure of this horizon and shows that it is slightly folded in domes and basins. This document will be useful for rationalising the future hydrogeological researches that will be undertaken in the Khemis Meskala area. *To cite this article: M. Jaffal et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 229–234.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Essaouira / Meskala / seismic / borehole / Vraconian / isobaths / aquifer

Résumé – De nombreux travaux de recherche pétrolière par sismique réflexion et sondages carottés ont été réalisés dans le bassin d'Essaouira. Cette étude concerne la réinterprétation de ces travaux dans le secteur de Khemis Meskala en vue de caractériser la structure du système aquifère crétacé. Pour ce faire, nous avons d'abord identifié, sur les différentes sections sismiques, le réflecteur correspondant au mur du calcaire vraconien. Cet horizon, qui marque la base du système aquifère, a ensuite été numérisé sur des sections migrées–temps, puis converti en sections–profondeur, moyennant l'application d'une loi de vitesse appropriée. La carte des isobathes de la base du Vraconien ainsi élaborée montre que cet horizon est affecté par un faible plissement en dômes et cuvettes. Ce document permet de mieux appréhender la structure géométrique du système aquifère crétacé et de rationaliser les travaux de recherche hydrogéologique qui seront ultérieurement menés dans le secteur de Khemis Meskala. *Pour citer cet article : M. Jaffal et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 229–234.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Essaouira / Meskala / sismique / sondage / Vraconien / isobathes / aquifère

Abridged version

The Essaouira basin has been the place of large number of seismic reflection surveys and boreholes drilling

from the oil industry (Fig. 1). These studies increased our basic knowledge on the deep geological structure of the full basin. The present study concentrates on the reinterpretation of the seismic reflection sections carried out

* Correspondance et tirés à part.
Adresses e-mail : jaffal@fstg-marrakech.ac.ma (M. Jaffal),
kchikach@fstg-marrakech.ac.ma (A. Kchikach),
Jean-Pierre.Lefort@univ-rennes1.fr (J.-P. Lefort),
hanich@fstg-marrakech.ac.ma (L. Hanich).

in the Khemis Meskala area. This village constitutes one of the most important urban centre of the region. It has strong needs in water supply for domestic needs and irrigation. The succession of several years of drought and the semi-arid climate of the region render necessary the exploitation of the underground water reserves to fulfil this need. This study aims to better understand the underground out-flow mechanism at the light of the 3D geometrical structure of the Cretaceous aquiferous system. It is actually fundamental to document the future hydrogeological prospecting surveys that will be carried out in the region.

The sedimentary basin of Essaouira is located between the High-Atlas of Marrakech and the Jebilet Massives; it formed during a complex sedimentary history [11]. Resting on a Palaeozoic basement, the sedimentary succession is successively composed of (1) a Mesozoic (Trias, Jurassic and Lower Cretaceous) sequence, mainly characterised by limestones and marls, (2) an Upper Cretaceous–Eocene phosphatic and marly-limestone formation and (3) a Plio-Quaternary series formed by shelly limestone and sandstone. The structural organisation of the basin has been controlled by the main basement disruptions, all reactivated during the Atlasic orogeny [2, 6, 10, 12, 13]. Some of the seismic sections show the presence of faults, affecting both the sedimentary sequence and the Hercynian basement (Fig. 2). All the studies [9, 12, 14] describe two directions of faults: N20 to N30 and east–west. On the 1:50 000 geological map of Meskala, those directions are evidenced by faults and diapiric injections. The same map also shows several fold axes, oriented respectively N20 to N30 and east–west. The interference between these two directions of folds results in a structural organisation of basins and domes.

On the studied seismic sections and the boreholes data, the top of the Palaeozoic basement varies from 3000 to 6000 m. The Trias, mainly saliferous, may reach 4000 m in thickness. The Jurassic is represented by an alternation of limestones, dolomies and marls. Its mean thickness is about 1600 m. The Cretaceous is usually marly, but the

Vraconian is represented by thick layers of limestones. The abrupt lithological change at the bottom of the Vraconian is responsible for a strong acoustic impedance contrast and represents a good seismic marker. The Tertiary, essentially formed by phosphatic marl, is topped by Plio-Quaternary limestones and sandstones.

The identification of the Vraconian geological horizon that marks the base of the Cretaceous aquiferous system on the different seismic sections has been controlled by the analysis of the available boreholes logs. From an hydrogeological point of view, the Vraconian represents the base of the Cretaceous aquiferous system. This system is described as a multilayers where the most important reservoirs are the marls and the lumachelles of Cenomanian age, the fissured and karstic dolomites of the Turonian and the limestones of the Senonian [3, 5].

The sampled reflectors were first digitised and after the application of a suitable velocity law converted from migrated time-sections (x, t) to depth-sections (x, z). This processing has been possible with the help of a software based on Unger's methodology [15]. For every processed seismic profile, we verified the efficiency of the conversion technique by comparing our results with the depth of the processed formations in the boreholes.

The complete isobath map of the base of the Cretaceous aquiferous system has been achieved using both the data resulting from the interpretation of the seismic sections and the results coming from the boreholes. The resulting structural map synthesises the main results that we obtained (Fig. 3). It shows the existence of Vraconian structural highs and lows that mimic in some places the surface geology. As observed elsewhere, the highs are probably associated with Triassic rising diapirs. This would explain why the directions of the structures at depth do not follow the large-scale basement pattern. This document should be useful for choosing the best sites for the boring or well surveys that will precede the exploitation of the Cretaceous aquiferous system. The accurate location of the Vraconian depressions is of particular interest for future water researches.

1. Introduction

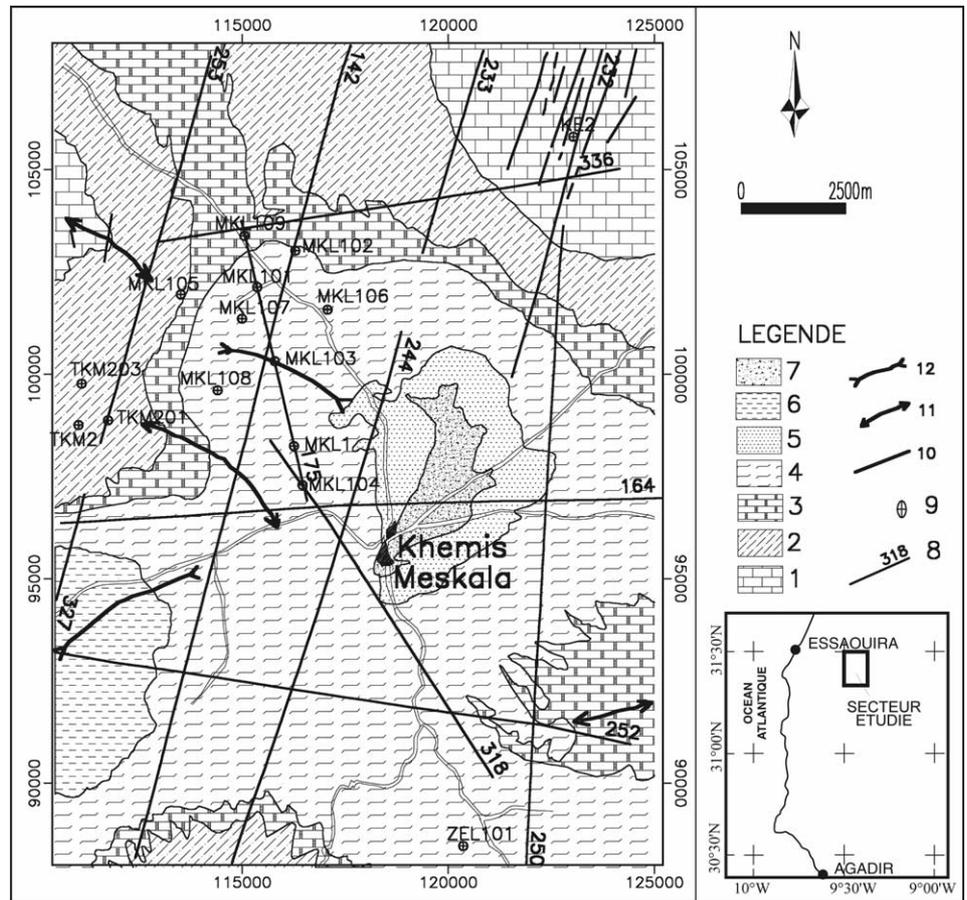
Dans le cadre de la recherche pétrolière, le bassin d'Essaouira a été le siège de nombreuses campagnes de prospection par sismique réflexion et forages. Le présent travail concerne le secteur de Khemis Meskala, l'une des plus importantes agglomérations du bassin, où l'exploitation des nappes d'eau souterraines devient une nécessité afin de combler le manque d'eau de surface. Son objectif est de reconnaître en profondeur la structuration du principal système aquifère connu dans la région, grâce à la compilation et à l'interprétation des données de sismique réflexion que l'on calera sur les forages disponibles.

C'est la première étude de ce genre à être menée dans ce secteur. Le schéma structural que nous allons proposer devrait permettre de maîtriser le mécanisme d'écoulement souterrain du système aquifère crétacé.

Le réflecteur sismique correspondant à la base du calcaire vraconien (qui marque le mur du système aquifère crétacé) a été pointé sur les différentes sections migrées–temps disponibles, puis numérisé et converti en sections–profondeurs grâce à un logiciel de migrations géométriques et à l'utilisation d'une loi de vitesse linéaire. La corrélation entre les différents profils sismiques a permis d'établir une carte des isobathes de la base du Vraconien que nous proposons de discuter.

Figure 1. Carte géologique et localisation géographique du secteur de Khemis Meskala. **1. Vraconien** : calcaires dolomitiques et dolomies. **2. Cénomaniens** : marnes grises et calcaires. **3. Turonien** : calcaires dolomitiques. **4. Sénonien** : marnes jaunes et calcaires dolomitiques. **5. Maastrichtien** : calcaires, marnes et sables phosphatés. **6. Tertiaire** : marnes phosphatées. **7. Quaternaire** : limons. **8. Profil sismique**. **9. Sondage**. **10. Faille**. **11. Axe anticlinal**. **12. Axe synclinal**. (10, 11 et 12 : structures de surface tirées de la carte géologique.)

Figure 1. Geological map and geographical location of the Khemis Meskala area. **1. Vraconian**: dolomitic limestones and dolomites. **2. Cenomanian**: grey marls and limestones. **3. Turonian**: dolomitic limestones. **4. Senonian**: yellow marls and dolomitic limestones. **5. Maastrichtian**: limestones, marls and phosphatic sands. **6. Tertiary**: phosphatic marls. **7. Quaternary**: loam. **8. Sismic lines**. **9. Boreholes**. **10. Faults**. **11. Anticlinal axis**. **12. Synclinal axis** (10, 11 and 12: shallow structures get out of the geological map).



2. Contexte géologique

La carte géologique au 1:50 000 de Khemis Meskala (Fig. 1) montre que les formations du Crétacé qui s'étagent du Vraconien au Sénonien sont les plus fréquentes à l'affleurement. La compilation des données de sondages carottés réalisés dans l'ensemble du bassin d'Essaouira et leur corrélation a permis d'établir plusieurs coupes géologiques à travers ce bassin [12]. Celle qui passe par le secteur de Meskala montre que le Paléozoïque est constitué entre -3000 et -6000 m de profondeur de schistes et de quartzites. Au-dessus, le Trias, essentiellement salifère, peut atteindre par endroits une épaisseur de 4000 m. Le Jurassique, représenté par une alternance de calcaire, de dolomie et de marnes a une épaisseur moyenne de 1600 m. Le Crétacé, particulièrement marneux à sa base, passe à de puissantes couches de calcaires à partir du Vraconien. Le Tertiaire, décrit comme étant essentiellement marno-phosphaté, est surmonté par des calcaires et des limons du Plio-Quaternaire.

Du point de vue tectonique, la carte géologique du secteur ne montre que quelques failles qui s'organisent selon deux directions préférentielles (N30 et N150) dans la zone où affleure le calcaire vrac-

nien [9, 12, 14]. Des failles majeures de même direction ont été décrites ailleurs dans le bassin sédimentaire d'Essaouira par plusieurs auteurs ; elles sont attribuées à des accidents du socle, qui auraient joué lors de l'orogénèse atlasique et alpine [2, 6, 10, 12, 13]. Certaines des sections sismiques examinées dans le secteur de Meskala confirment cette hypothèse, puisqu'elles montrent des failles qui affectent aussi bien la couverture que le socle paléozoïque (Fig. 2).

3. Données et méthode

Les données actuellement disponibles sont constituées, d'une part, de douze profils de sismique réflexion, réalisés par la compagnie générale de géophysique (CGG) en 1982 et, d'autre part, d'une quinzaine de logs stratigraphiques de sondages, ainsi que des logs de diagraphie acoustique correspondants. L'analyse de l'ensemble de ces données montre que la base du Vraconien (qui correspond approximativement ici à l'Aptien supérieur) constitue un niveau repère, qui peut facilement être suivi sur les sections sismiques à l'échelle locale. Cet étage est, en effet, constitué de calcaires et de dolomies, qui surmontent une puissante formation albienne, essentiellement marneuse,

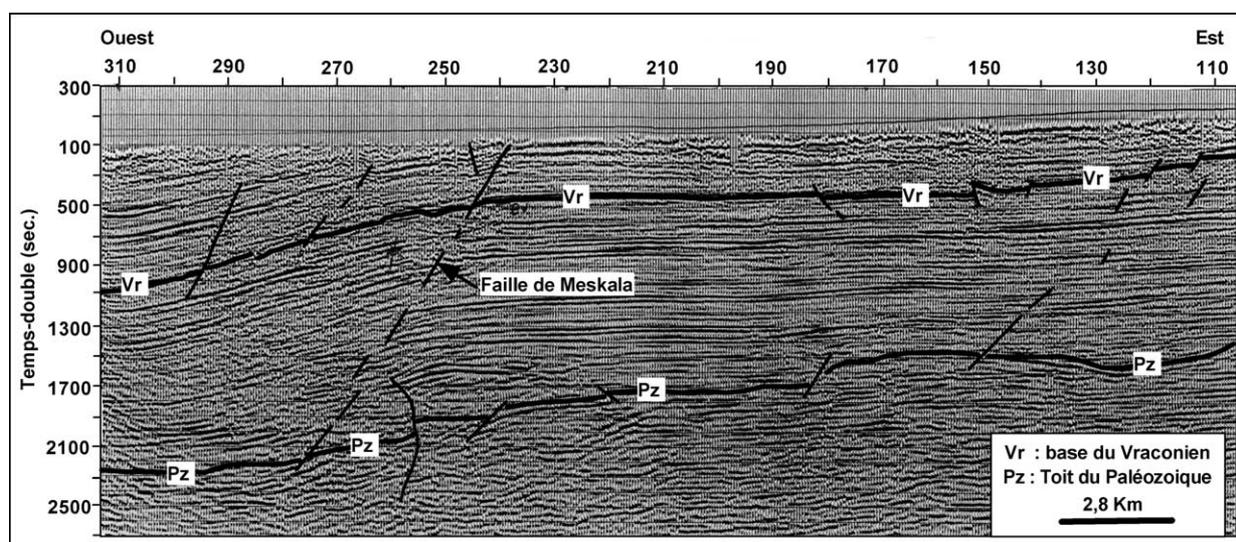


Figure 2. Interprétation de la section sismique ES252 montrant l'existence d'importantes failles normales affectant la série sédimentaire au sud-ouest de Khemis Meskala (les points de tir sont indiqués sur l'axe horizontal).

Figure 2. Interpretation of the ES252 seismic line showing the major normal faults affecting the sedimentary series southwest of Khemis Meskala (shot points are indicated on the horizontal axis).

ce qui se traduit par un important contraste d'impédance acoustique. Sur le plan hydrogéologique, la base du Vraconien marque le mur du système aquifère crétacé. Ce système est le plus important de la région. Il est décrit comme un « multicouche », dont les réservoirs les plus importants sont les calcaires lumachelliques du Cénomaniens, les calcaires dolomitiques fissurés du Turonien et les calcaires karstiques du Sénonien [3, 5].

Après avoir repéré l'horizon vraconien sur les différentes sections-temps, celui-ci a été numérisé, puis converti en sections-profondeurs. Les lois de vitesse nécessaires à cette conversion ont été établies à partir des données issues de l'analyse de vitesses figurant sur les sections sismiques utilisées. La conversion a été effectuée au moyen d'un logiciel de migration basé sur la méthode de Unger [15]. Ce logiciel, qui n'utilise que des lois de vitesse linéaires, a néanmoins donné des résultats très satisfaisants, comme nous l'avons déjà constaté dans d'autres conditions d'utilisation [4, 7, 8]. En effet, pour chaque section sismique convertie en profondeur, nous avons vérifié la concordance de la profondeur des réflecteurs avec les données réelles obtenues au niveau des forages. L'interpolation entre les différentes lignes sismiques a permis d'établir la carte des isobathes de la base du Vraconien du secteur de Meskala.

La corrélation entre les logs de sondage et les sections sismiques, d'une part, et entre les réflecteurs sismiques au niveau des points de recoupements des profils, d'autre part, nous a permis de suivre facilement ce réflecteur sur les sections sismiques couvrant le sec-

teur d'étude. Ces corrélations ont été complétées par la superposition de la carte des isobathes et de la carte géologique de Meskala, puisque les réflecteurs arrivent parfois à l'affleurement. Enfin, nous avons mené une analyse fine des grandes failles affectant la série sédimentaire sur toutes les sections sismiques, afin de tester nos corrélations. Les principales structures observées sont reportées sur la Fig. 3.

4. Discussion et conclusions

La carte des isobathes de la base du Vraconien établie à l'issue de notre étude est présentée sur la Fig. 3. Cette figure montre que la structure de la base du Vraconien reflète parfaitement les grands traits tectoniques de la région, ainsi qu'ils ressortent de l'analyse de la carte géologique de Khemis Meskala. L'examen de ce document montre également que la base du Vraconien est affectée par un faible plissement, souligné par l'existence d'une cuvette centrale autour du village de Khemis Meskala (structure A, Fig. 3), entourée d'intumescences anticlinales. Ces ondulations, dont l'amplitude est d'à peu près 200 m, ne présentent pas de directions structurales préférentielles ; elles pourraient correspondre à des remontées diapiriques issues des formations salifères triasiques que Mehdi [12] décrit dans plusieurs zones du bassin d'Essaouira. Leur largeur est souvent proche de 3 km. Ce phénomène a d'ailleurs été mis en évidence sur plusieurs sections sismiques effectuées à travers le bassin et est attesté dans plusieurs sondages qui ont

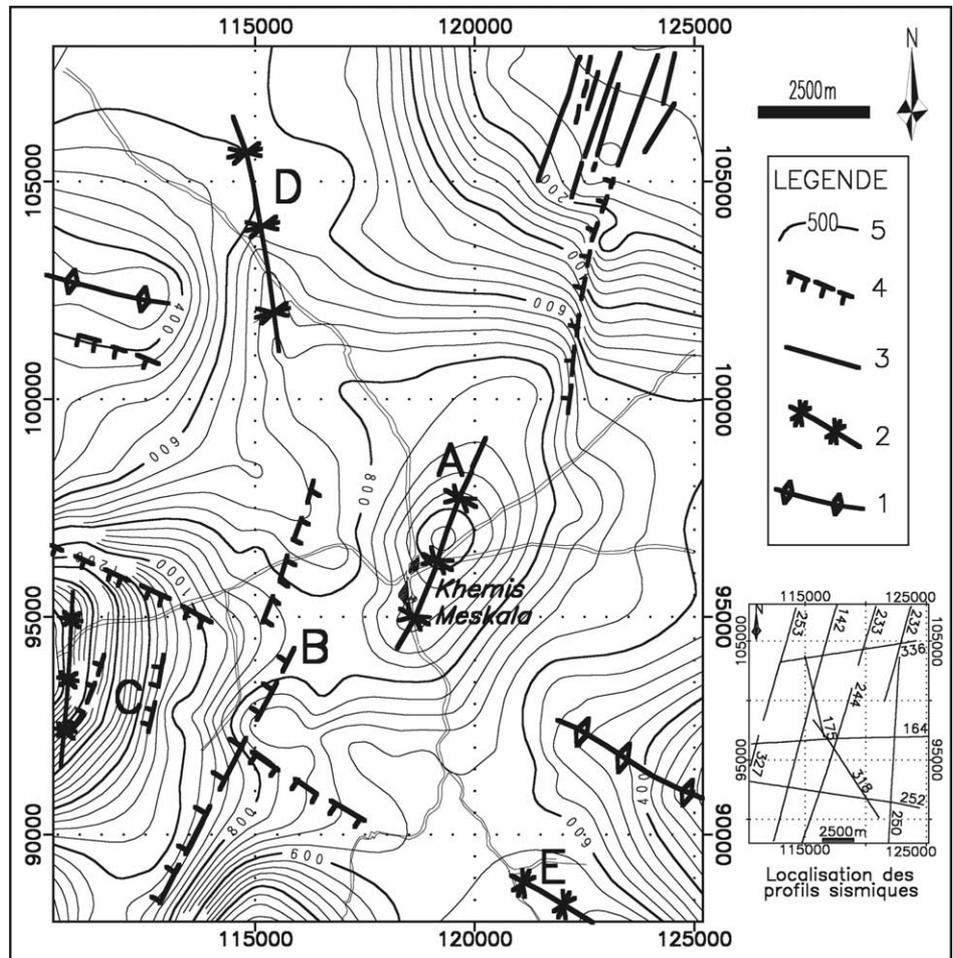


Figure 3. Carte structurale du secteur de Khemis Meskala. 1. Haut structural. 2. Bas structural. 3. Faille représentée sur la carte géologique de Khemis Meskala. 4. Faille interprétée. 5. Contours des profondeurs de la base du Vraconien.

Figure 3. Structural map of the Khemis Meskala area. 1. Structural high. 2. Structural low. 3. Fault represented on the geological map of Khemis Meskala. 4. Interpreted fault. 5. Depth contours of the base of the Vraconian.

recoupé de puissantes couches salifères au niveau des zones de dômes. Après un léger bombement (structure **B**, Fig. 3), la cuvette de Khemis Meskala se prolonge vers le sud-ouest par une dépression plus importante, où la base du Vraconien atteint ses profondeurs maximales (structure **C**, Fig. 3). Cet affaissement de la série sédimentaire est le résultat du développement d'importantes failles normales qu'on observe clairement sur les sections sismiques (Fig. 2). Vers le nord et le sud-est, cette cuvette se prolonge par des couloirs d'étranglement (structures **D** et **E** respectivement, Fig. 3) entre les hauts structuraux où affleure le Vraconien. La zone de Meskala a donc la morphologie d'une cuvette fermée, avec toutes les conséquences que cela engendre au niveau du fonctionnement du système aquifère Crétacé qu'elle abrite.

Les études structurales menées dans l'ensemble du bassin d'Essaouira révèlent l'existence de deux familles de failles majeures, de directions respectives N20 à N30 et est-ouest [9, 11, 14]. Dans notre zone d'étude, l'analyse des coupes sismiques montre que ce sont les sections orientées en direction est-ouest qui montrent clairement le plus d'accidents. Ceci peut

s'expliquer par le fait que le réseau nord-sud est plus développé ou que celui-ci comprend des failles à rejet vertical apparent plus important. Le schéma structural du secteur de Khemis Meskala ainsi établi (Fig. 3) montre les grands axes structuraux positifs et négatifs de la base du Vraconien et les principales failles observées sur les sections sismiques. La corrélation de ces failles d'un profil à l'autre a été réalisée en tenant compte des directions structurales déjà décrites dans le secteur [1, 2, 6, 11, 12]. Ces informations impliquent qu'en plus des traits structuraux déjà décrits sur la carte géologique de Meskala, il existe en profondeur d'autres structures de même importance, qui devront être prises en considération pour mieux comprendre le schéma hydrodynamique du système aquifère Crétacé.

Il ressort de cette étude que le système aquifère crétacé est un système compartimenté, dont la structure en dôme et cuvette est essentiellement contrôlée par l'effet de l'injection des diapirs de sels dans la couverture et le jeu d'importantes failles normales. Une telle structuration présente des implications hydrogéologiques très importantes, dans la mesure où elle

contrôle l'écoulement des eaux souterraines. Ainsi, au niveau du secteur étudié, ces eaux convergeraient vers les zones de dépressions telles que les structures **A** et **C** (Fig. 3). Dans le secteur de Meskala, les forages hydrogéologiques qui viseront l'exploitation des nappes d'eau appartenant au système crétacé devront donc être préférentiellement implantés à l'aplomb de ces structures.

Remerciements. Les auteurs remercient les membres de la direction d'exploration de l'Office national de recherches et d'exploitations pétrolières (Onarep) et en particulier M. Mourabet, pour sa collaboration ainsi que pour les documents qu'il a mis à notre disposition. Nous remercions aussi J.-L. Vignerresse (université de Nancy) pour ses suggestions constructives.

Références

- [1] P. Broughton, A. Trépanier, Hydrocarbon generation in the Essaouira Basin of Western Morocco, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 77 (6) (1993) 999–1015.
- [2] J.-J. Cornée, J. Ferrandini, B. Simon, Évolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques, *C. R. Acad. Sci. Paris, série II* 305 (1987) 499–503.
- [3] L. Hanich, J.-P. Colbeaux, M. Hibti, N. Crampon, L. Bouchaou, A. El Hebil, Geological and structural aspect of Cretaceous aquifer of Essaouira Basin (Morocco), *European Union of Geosciences, Strasbourg*, 1999, p. 748 (abstract).
- [4] M. Jaffal, Étude géophysique du profil sismique WAM et de son environnement : apport à la connaissance du socle des approches occidentales de la Manche et de la mer Celtique, thèse, université Rennes-1, France, 1995, 235 p.
- [5] N. Laftouhi, Hydrogéologie et hydrogéochimie de l'aquifère turonien du bassin synclinal de Meskala–Korimat–Ida Ou Zemzem, (Essaouira, Maroc), thèse de 3^e cycle, université Cadi-Ayyad, Marrakech, Maroc, 1991, 192 p.
- [6] E. Laville, A. Piqué, La distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque : le jeu des structures hercyniennes, *Bull. Soc. géol. France* 162 (1991) 1161–1171.
- [7] J.-P. Lefort, M. Jaffal, Les témoins de l'extension post-hercynienne dans la croûte inférieure litée de la Manche occidentale et de la mer Celtique, *Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine* 17 (1) (1994) 421–436.
- [8] J.-P. Lefort, M. Jaffal, Anisotropie du fluage post-orogénique de la croûte inférieure litée dans la chaîne hercynienne (Manche), *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* 321 (1995) 65–70.
- [9] F. Medina, Chronologies des phases et styles tectoniques dans le Haut Atlas occidental (Maroc), Garcia de Orta, sér. Géol., Lisboa 8 (1–2) (1985) 43–53.
- [10] F. Medina, Tilted-blocks pattern, paleostress orientation and amount of extension, related to Triassic early rifting of the central Atlantic in the Amezri area (Argana Basin, Morocco), *Tectonophysics* 148 (1988) 229–233.
- [11] F. Medina, Évolution structurale du Haut Atlas occidental et des régions voisines du Trias à l'Actuel, dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique central et de la collision Afrique–Europe, thèse, université Mohamed-V, Rabat, 1994, 260 p.
- [12] K. Mehdi, Analyse et synthèse des études géologiques et géophysiques de la partie orientale du bassin d'Essaouira, thèse, université Bordeaux-1, 1994, 265 p.
- [13] P. Petit, Objets tectoniques sédimentaires liés à la distension dans les bassins Permo-Trias du Haut Atlas occidental (Maroc), 8^e RAST, 1980, p. 279.
- [14] A.K. Souid, Étude tectonique et microtectonique des injections du Trias du bassin d'Essaouira pendant les compressions alpines dans l'avant-pays atlasique (Maroc), thèse de 3^e cycle, université de Montpellier, 1983, 90 p.
- [15] J.D. Unger, A PC program for migration of seismic reflection profiles Geobyte, 1988, pp. 42–54.