

Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

# Évaluation de la qualité de l'eau par application de la méthode géoélectrique : exemple de la plaine d'El Mida–Gabes nord (Sud tunisien)

Abdelkader Mhamdi \*, Mouez Gouasmia, Mohamed Gasmi, Salem Bouri, Hamed Ben Dhia

*Laboratoire L 3 E « Eau, énergie et environnement », ENIS-BP « W », 3038 Sfax, Tunisie*

Reçu le 3 mars 2005 ; accepté après révision le 1<sup>er</sup> septembre 2006

Disponible sur Internet le 30 novembre 2006

Présenté par Ghislain de Marsily

## Résumé

La plaine d'El Mida, qui fait partie de la région de Gabès-Nord (Tunisie méridionale), est caractérisée par des unités profondes, à fort potentiel aquifère, dans les séries gréseuses du Continental intercalaire (CI) ou carbonatées du Sénonien inférieur. Une étude géophysique par sondages électriques (SE) a été menée pour mieux reconnaître le sous-sol de cette plaine et, par conséquent, ses potentialités hydriques. L'analyse de l'ensemble des résultats montre que la zone prospectée est caractérisée par la succession de plusieurs terrains à résistivités contrastées et souvent affectés par des failles la subdivisant en deux structures essentielles, à savoir le graben d'El Mida et le horst de Draa Oudhref. Du point de vue hydrogéologique, deux niveaux géoélectriques peuvent constituer deux aquifères. Le niveau très conducteur dans le graben d'El Mida pourrait contenir une nappe salée et le substratum résistant du horst de Draa Oudhref pourrait contenir une eau de meilleure qualité. La forte salinité de la nappe d'El Mida pourrait provenir du nord à partir des terrains salifères de Zemlet El Beida par drainance verticale et latérale à travers la faille bordière du graben, et du sud-ouest à partir de Sebkheth El Hamma. **Pour citer cet article :** A. Mhamdi et al., *C. R. Geoscience 338 (2006)*.

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

## Abstract

**Evaluation of the water quality by the geoelectrical method: example of the El Mida plain–North Gabes (southern Tunisia).** The Mida plain, which is part of the North Gabès region (southern Tunisia), is characterized by the deep sandy units of the 'Continental intercalaire' (CI) or the limestone of the Lower Senonian. A geophysical survey, by electrical sounding (ES), was undertaken in the studied region to better characterize the deep geological structure of this plain and therefore its aquifer resources potential. The analysis of the results shows that the prospected zone is characterized by the succession of several levels with contrasted resistivities, which are often affected by faults. Among these observed geoelectrical levels, the highly conductor one could host a saline aquifer. Another geoelectrical level corresponding to the resistant bedrock detected at Oudhref horst can contain better-quality water than that of the aquifer detected in the El Mida Graben. In this work, we tried to explain the origin of the salinity of this aquifer. Thus, we hypothesise about a contamination from Jebel Zemlet El Beida through a border fault and another one from the Sebkheth El Hamma. **To cite this article:** A. Mhamdi et al., *C. R. Geoscience 338 (2006)*.

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [mha\\_kada@yahoo.fr](mailto:mha_kada@yahoo.fr) (A. Mhamdi).

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

*Mots-clés* : Plaine d'El Mida ; Potentialités hydriques ; Méthode géoélectrique ; Qualité de l'eau ; Origine de la salinisation ; Tunisie

*Keywords* : Plain of El Mida; Hydrous potentialities; Geoelectrical method; Water quality; Salinity origin; Tunisia

### Abridged English version

The aim of this work is to better study the water resources of the El Mida plain, located in the south-eastern part of Tunisia by using a geophysical survey.

The geology of this area is mainly characterized by relatively thick Mio-Plio-Quaternary deposits as plain replenishment and greatly affected by several faults [1]; thus either by its tectonic fractures or by its lithology, the local aquifer formation requires a more accurate approach for evaluating its resource potential.

This aquifer furthermore shows relatively rapid changes of salinity from one area to another or from one level to another. What could be the role of the faults? And what are its boundaries for recharge and discharge?

The geophysical survey was made by electric prospecting and 49 Schlumberger ES (Fig. 2) were made with current lines of 1600 m [3,15,21].

The first goal of our approach was to determine the geoelectrical characteristics, the electrical resistivity in relation with the salinity and their lateral and vertical variations within El Mida plain.

The interpretation of the results was conducted in two ways:

- (1) a qualitative way: all maps of iso-resistivity established for AB/2 of 50 to 800 m show similar observations. The map for AB/2 = 800 m has been chosen to illustrate our topic (Fig. 3). It delineates a NE–SW fault, parallel to the axis of the El Mida plain, which corresponds to a high gradient between a resistant area in the Southeast and a conductive zone in the North and the Southwest;
- (2) a quantitative interpretation: the ES interpretation must be based on local databases that include information on the lithological and hydrogeological nature of the investigated area; these are available from boreholes. Therefore, two ES (16 and 35) were located near boreholes (7215/5 and 16741/5) (Fig. 5). The results of such a calibration helped in the construction of geoelectrical cross sections for the investigated subsurface sequences. Six geoelectrical cross sections were established for two main directions, NW–SE and SW–NE (Fig. 2).

In the following, we will present only the most representative cross sections (Fig. 6), showing that:

- the El Mida graben is characterized by the presence of a highly conductive level, attributable to a permeable sequence saturated with high-salinity water. This level can be formed by sandy mudstone;
- below this highly conductive level, we find a relatively resistant bedrock that could present a hydrogeological interest and whose lithological nature could correspond to a clayey-sandy sequence. But its position below a highly conductive level containing a saline aquifer would certainly represent a problem for its exploitation;
- the Oudhreh horst is characterized in its southwestern part by the presence of a good sandy substratum that can constitute a good hydrogeological objective. In the northeastern part, we note the presence of a very resistant bedrock that could make of a good sandy aquifer or by carbonates that are also able to contain a good aquifer. The highly conductive level detected on the El Mida graben was characterized by isobaths (Fig. 7) and isopachs (Fig. 8) maps, while the resistant bedrock detected on the Draa Oudhreh horst was only characterized by an isobaths map (Fig. 9).

In regard to the origin of the salinity detected on the El Mida graben, we think that exchanges can occur between this aquifer and its environment (presence of evaporites) [18]. Therefore, the origin of the saline water can be vertical and lateral leakage from Jebel Zemlet El Beida (presence of evaporates) through the border fault F1. This salinisation becomes more pronounced by a contribution from Sebkheth El Hamma in the southwest that flows toward the northeast with Oued El Akarit (outside of the studied area) as discharge area [19].

In the present paper, we show that the geoelectrical method gives a good electric image of the underground structure. The ES constitutes an interesting and cheap guide for the evaluation of the quality of groundwater resources of the El Mida plain.

This study should be useful for choosing the best sites for reconnaissance borings or test wells that will precede the future exploitation of the aquifer system.

## 1. Introduction

Le présent travail fait état des résultats d'une prospection électrique par 49 sondages électriques réalisés dans la plaine d'El Mida. Le but de cette campagne est de caractériser électriquement le sous-sol d'une zone compartimentée par des failles dont certaines sont connues [1]. Ceci aide à estimer les profondeurs et/ou les puissances des séries susceptibles de contenir des aquifères, à savoir les grès du Continental intercalaire (CI), les carbonates du Crétacé et mêmes les sables gréseux du Miocène. Cette caractérisation est nécessaire à l'évaluation de leurs potentialités aquifères, dans une région où l'activité agricole est limitée à des plantations arboricoles cultivées à sec.

## 2. Situation géographique et cadre géologique

À l'échelle régionale, le Sud tunisien s'oppose, par son relief comme par sa structure, au Nord et au centre de la Tunisie. Il s'agit d'un domaine plat et monotone, composé de vastes plaines et des plateaux qui ne dépassent guère en moyenne 400 m d'altitude. Les seuls reliefs vigoureux sont les rebords abrupts de ces plateaux, les buttes qui s'en détachent, ou bien de rares chaînons montagneux développés surtout au contact de la Tunisie centrale, formant les chaînes des Chotts.

Parmi ces chaînes, nous citons celle commençant à l'est par Zemlet El Beida et se terminant à plus de 20 km à l'ouest par Draa Jerid. Elle est située sur la bordure septentrionale de la plate-forme saharienne, et correspond à des groupements de longs plis en échelons, longs, étroits et disposés le long de voies potentielles de cisaillement est–ouest [4].

Les chaînes des Chotts sont le résultat de la réactivation de décrochements dextres est–ouest profonds, passant au nord des Chotts par serrage NW–SE [5,7].

Du point de vue stratigraphique, les affleurements dans le Sud tunisien s'étendent du Permien (Tebaga de Medenine) jusqu'au Quaternaire, à dominante Crétacé.

À l'échelle locale, la zone d'étude (Fig. 1), qui correspond à la plaine d'El Mida, est l'étendue située au sud-est de Jebel Zemlet El Beida englobant, du nord-ouest vers le sud-est : El Mida, Dhahret El Hamar et Draa Oudhref. Elle est limitée, à l'est, par les environs d'Oudhref, au nord par Dhahret El Halfa, au sud-sud-ouest par Sebket El Hamma, à l'ouest par Jebel Zemlet El Beida.

Le secteur d'étude se présente sous forme d'une plaine de remplissage Mio-Plio-Quaternaire, limitée au nord-ouest par la chaîne montagneuse constituée par une continuité d'anticlinaux adossés les uns aux autres, commençant à l'est par Jebel Rommana, Zemlet El Beida, Jebel Haidoudi (en dehors de notre secteur d'étude), etc. Cette chaîne est affectée par un important réseau de failles, dont certaines sont visibles sur le terrain et d'autres sont mises en évidence par des travaux géophysiques antérieurs [2].

Du point de vue lithostratigraphique, l'anticlinal de Zemlet El Beida est formé par des dépôts correspondant au Barrémien (Continental intercalaire), à savoir les argiles et les grès de Kebeur El Hadj, les gypses de Kliker, les argiles, gypse et carbonates de Berda, les sables de Fatnassa. On y note également les dolomies de Berrani attribuées au Bédoulien–Barrémien supérieur. Au niveau de l'extrémité sud-ouest de cet anticlinal ainsi qu'au niveau de Jebel Roumana, on rencontre essentiellement les calcaires et marnes de Maider et les calcaires dolomitiques de Haidoudi qui correspondent au Campanien–Coniacien.

Fig. 1. (a) Carte géologique de la zone d'étude (déduite de la carte géologique d'El Hamma à 1:100 000). (b) Vue en 3D [3]. 1. Pléistocène moyen–Actuel (a : sol de Sebka, b : limons, argiles silteuses et conglomérats). 2. Miocène supérieur–Pléistocène inférieur : argiles sableuses, sables et conglomérats de Segui. 3. Miocène : sables grossiers à dragées d'Oudhref. 4. Éocène p.p. (c : conglomérats grossiers et argiles rouges, vertes ou blanchâtres de Jebel El Hamri ; argiles silteuses rougeâtres, conglomérats et carbonates de Bouloufa). 5. Campanien : calcaires marneux blancs crayeux et marnes de l'Abiod. 6. Campanien–Coniacien : calcaires et marnes à lumachelles de Maider et calcaires dolomitiques de Haidoudi. 7. Albien supérieur : alternances d'argiles et de calcaires de Fom El Hassene. 8. Bédoulien–Barrémien supérieur : barre dolomitique de Berrani. 9. Barrémien (e : sables et grès de Fatnassa ; f : argiles, gypse et carbonates de Berda ; g : alternances de grès ; h : gypse de Kliker ; i : argiles et grès de Kebeur El Hadj). 10. Faille (j : visible ; k : masquée ou supposée). 11. Pendage. 12. Sondage électrique. 13. Forage d'eau.

Fig. 1. (a) Geological map of the studied area (from the geological map of El Hamma at 1:100 000) [3]. (b) 3D viewer. 1. Middle Pleistocene–Present (a: Sebka soil; b: loam, silty mudstones and conglomerate). 2. Upper Miocene–Lower Pleistocene: sandy mudstones, sand and conglomerate of Segui. 3. Miocene: coarse sand of Oudhref. 4. Eocene p.p. (c: coarse conglomerate and red, green or white clay of J. El Hamri; d: red silty mudstones, conglomerate and carbonate of Bouloufa). 5. Campanian: white marly chalky limestone and marls of Abiod. 6. Campanian–Coniacian: limestone and marls with lumachelles of Maider and dolomitic limestone of Haidoudi. 7. Upper Albian: alternation of mudstone and limestone of Fom El Hassene. 8. Bedoulian–Upper Barremian: dolomitic bar of Berrani. 9. Barremian (e: sandstone of Fatnassa; f: mudstone, gypsum and carbonate of Berda; g: sandy alternation; h: gypsum of Kliker; i: mudstone and sand of Kebeur El Hadj). 10. Fault (j: visible; k: masked or supposed). 11. Dip. 12. Electrical Sounding. 13. Borehole.

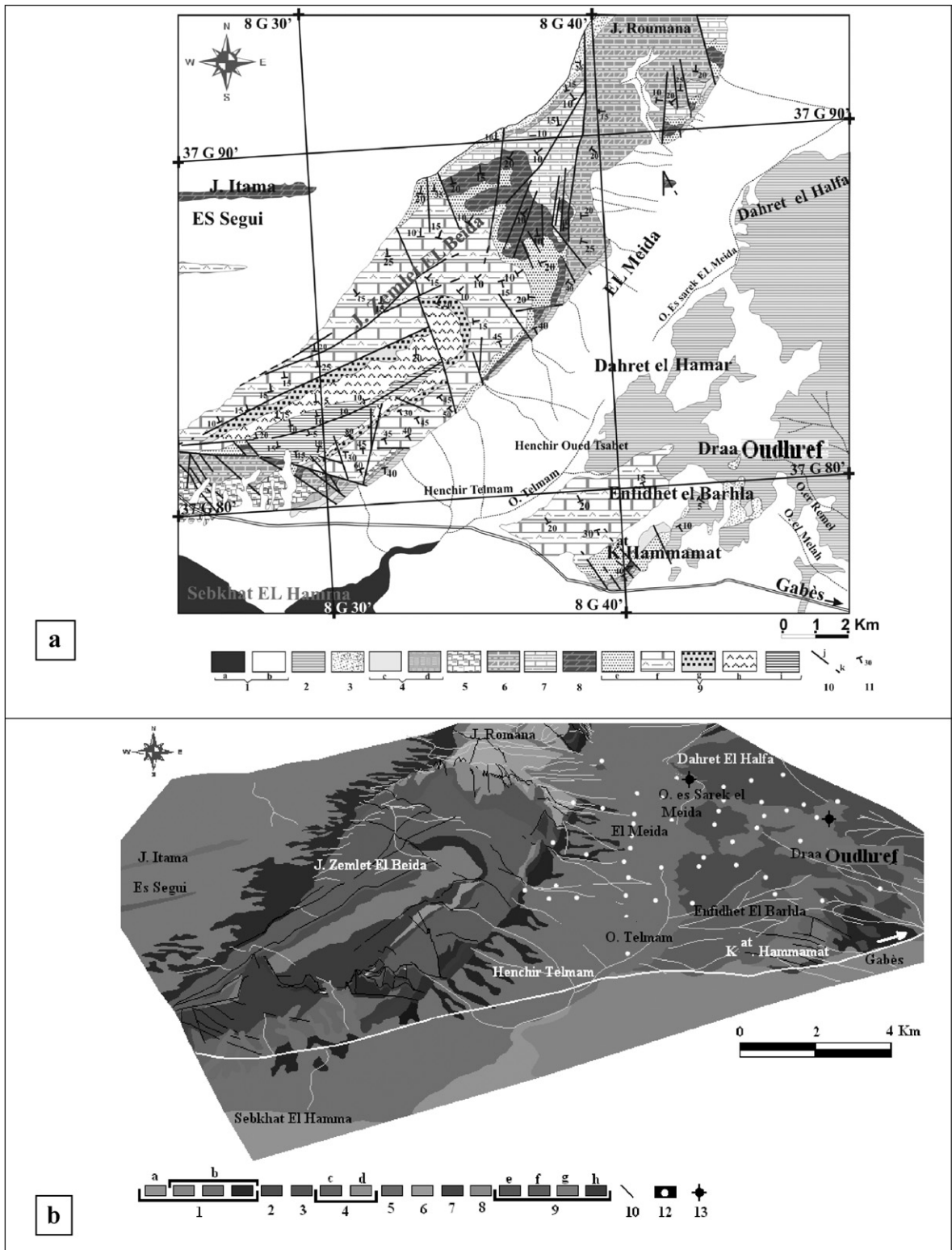


Fig. 1.

### 3. Potentialités aquifères

Les potentialités aquifères de la région sont mal connues. Quelques ouvrages d'exploitation montrent une eau de qualité variable dans l'espace, ce qui témoigne de la présence de nappes différentes. En effet, les formations sableuses superficielles du Mio-Plio-Quaternaire contiennent une nappe phréatique à faibles ressources renouvelables et de qualité chimique acceptable, exploitée par quelques puits de surface dans la région de Draa Oudhref. Mais lorsqu'on approfondit ces puits, l'eau devient très salée. Les forages 7215/5 (actuellement sec) et 16741/5 ont présenté des qualités chimiques médiocres.

Vu les problèmes précités et en l'absence d'une bonne connaissance des potentialités aquifères du secteur étudié, une campagne géophysique par prospection électrique s'avère efficace pour mieux élucider les caractéristiques des différentes couches du sous-sol.

### 4. La campagne de mesures électriques

#### 4.1. La méthode électrique et l'équipement de mesure

Le choix de la méthode électrique est dicté d'abord par sa réussite dans le Sud tunisien [11], puis par la difficulté d'exploiter les données superficielles de la sismique réflexion réalisée dans la région, enfin, par le manque de moyens plus adaptés à la reconnaissance des terrains conducteurs, tels que le TDEM [12–14,24].

Le principe général de la prospection électrique par SE repose sur l'injection d'un courant électrique  $I$  entre deux électrodes de courant A et B et la mesure d'une différence de potentiel  $\Delta V$  entre deux autres électrodes de potentiel M et N. On en déduit la résistivité apparente du sous-sol :  $\rho_a = K(\Delta V/I)$  en  $\Omega m$ , avec  $K$  le coefficient géométrique du dispositif, fonction uniquement des distances entre électrodes. Le SE type Schlumberger, utilisé dans ce travail, nécessite que les électrodes soient alignées et symétriques par rapport au centre O (lieu du SE) avec  $MN/2 \ll AB/2$ .

Le matériel utilisé est un résistivimètre (Syscal R2 – construction IRIS Instruments – France) dont l'émetteur et le récepteur sont intégrés dans un même boîtier.

#### 4.2. Représentation des résultats

Les données brutes sont représentées sous la forme de courbes  $\rho_a = f(AB/2)$  dans un système de coordonnées bilogarithmiques; la Fig. 4 en montre quatre exemples. Elles peuvent être également représentées sous la forme des cartes des résistivités apparentes pour

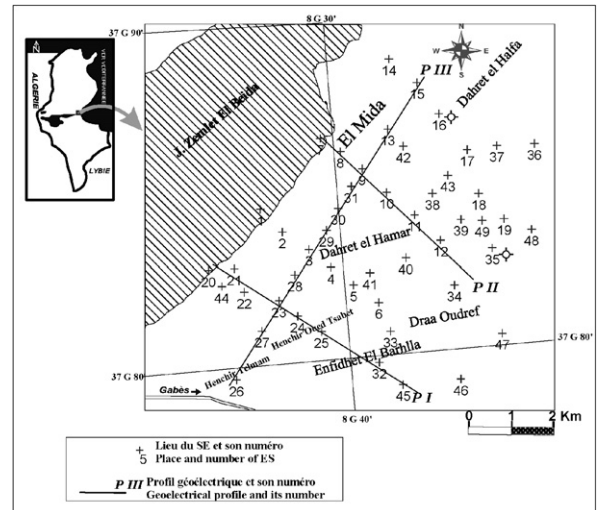


Fig. 2. Plan de position des sondages électrique.

Fig. 2. Location of the electrical sounding.

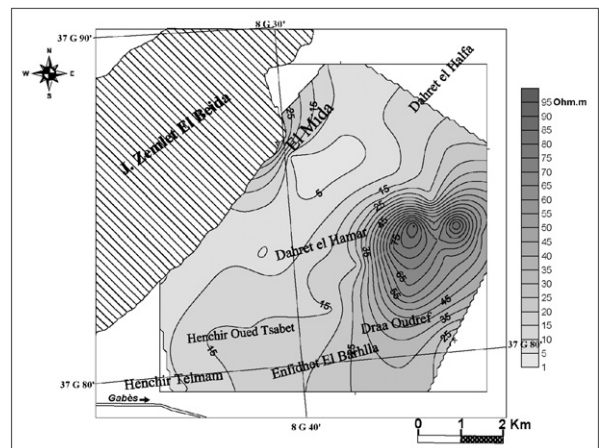


Fig. 3. Carte d'isoresistivité en  $AB/2 = 800$  m.

Fig. 3. Isoresistivity map for  $AB/2 = 800$  m.

des longueurs de ligne  $AB/2$  choisies; la Fig. 3, qui sera commentée ultérieurement, en est un exemple. Ces documents « bruts » constituent des éléments d'interprétation qualitative qui peuvent permettre de guider la synthèse des interprétations quantitatives de chaque sondage.

L'interprétation quantitative de chaque sondage, c'est-à-dire de chaque courbe  $\rho_a = f(AB/2)$ , dans l'hypothèse d'une structure tabulaire, permet de déterminer le nombre de couches, leur épaisseur et leur « résistivité vraie ». La solution obtenue n'est pas unique en raison des principes bien connus « d'équivalence » et de « suppression » [9,10]. Un étalonnage ou un calage de cette interprétation pour des sondages réalisés à

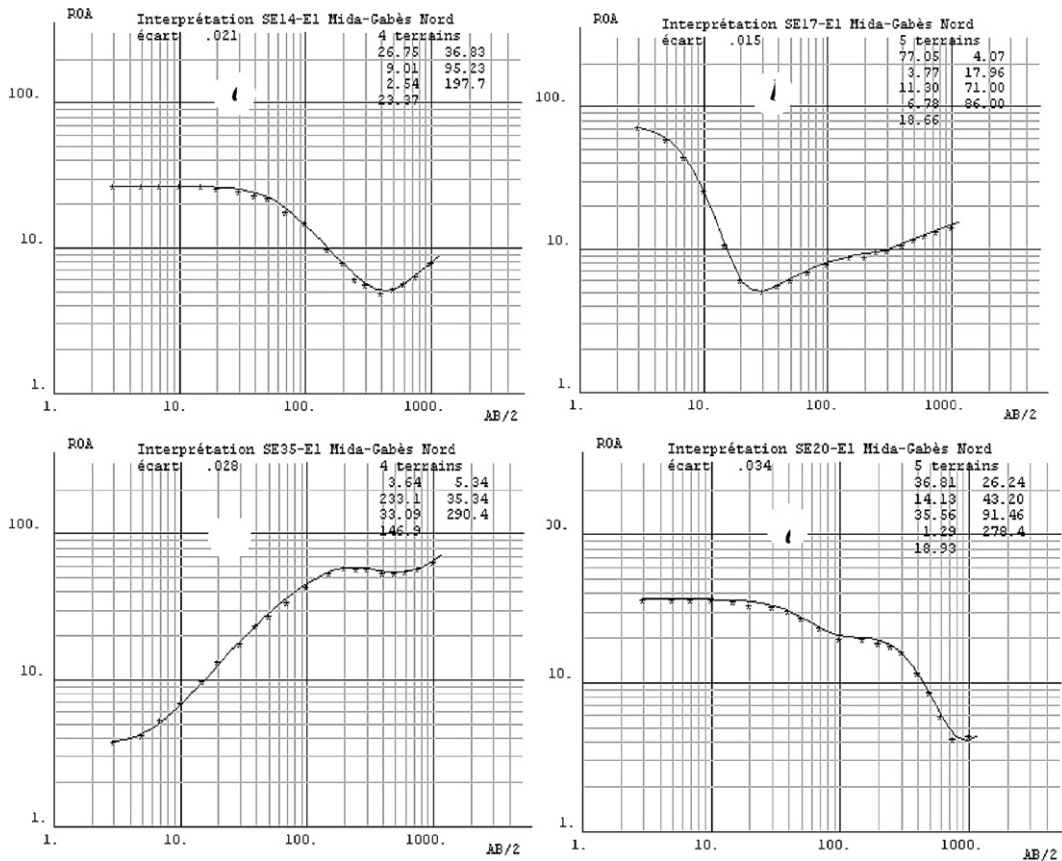


Fig. 4. Exemples de courbes des SE et leurs interprétations.

Fig. 4. Examples of the ES and their interpretation.

proximité de forages permet de lever une partie de ces incertitudes, propres aux méthodes électriques et électromagnétiques. On établit ensuite, des coupes géoélectriques le long de profils sélectionnés, en rassemblant les résultats de l'interprétation quantitative de chacun des sondages. Par corrélation avec les forages, on tente de déterminer la nature lithologique des couches, ce qui permet de tracer des cartes en isobathes et en isopaques des formations géologiques, qui constituent le but ultime de la prospection. Ces cartes sont finalement interprétées en termes de géologie et d'hydrogéologie [11].

### 4.3. Localisation de la prospection

Le secteur étudié (Fig. 2) a été prospecté au cours d'une campagne géophysique totalisant 49 SE. Tous les SE, de type Schlumberger [3,15,21], ont été réalisés avec une demi-longueur de ligne d'émission de courant AB/2 égale à 800 m et ce, dans l'espoir d'atteindre une profondeur minimale de 400 m, profondeur moyenne des forages dans les régions avoisinantes.

## 4.4. Résultats

### 4.4.1. Données brutes : courbes de SE

Les 49 SE conduisent à des courbes  $\rho_a = f(AB/2)$  de bonne qualité ; ils peuvent être classés en plusieurs groupes (a = graben d'El Mida, b = zone intermédiaire, c = horst de Oudhref et d = flanc nord de Zemlet El Beida), selon l'allure de cette courbe (Fig. 4). Les différences entre les classes sont liées à la variabilité des terrains superficiels et aux variations d'épaisseur et de résistivité des terrains profonds. C'est la connaissance de ces épaisseurs à la suite de l'interprétation quantitative qui permettra de tirer les conclusions structurales et hydrogéologiques qui constituent l'objectif de cette étude.

### 4.4.2. Interprétation qualitative – Carte des résistivités apparentes

Toutes les cartes tracées pour des demi-longueurs de lignes comprises entre AB/2 = 50 m et AB/2 = 800 m conduisent à des images voisines. C'est la carte tracée

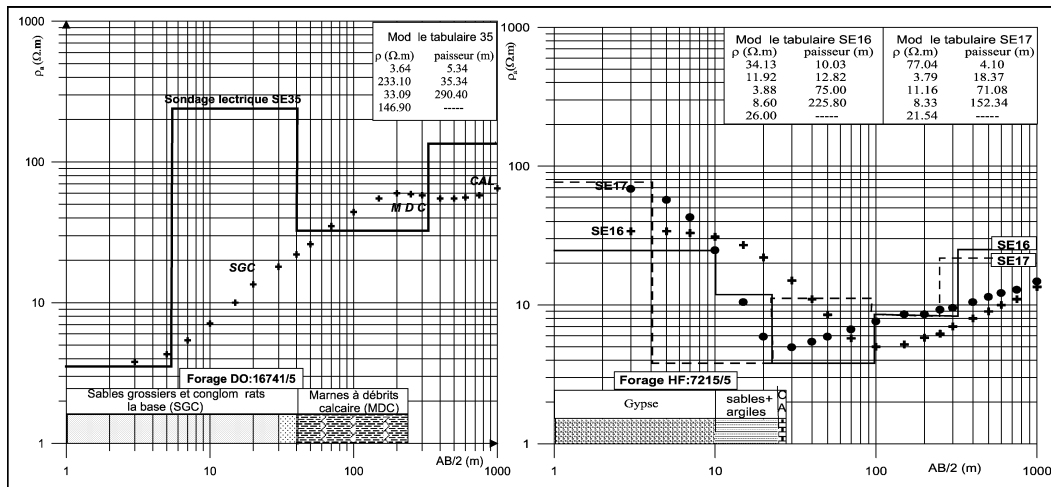


Fig. 5. Étalonnage des SE sur des forages dans la plaine d’El Mida.  
 Fig. 5. Calibration of the ES with the borehole data in the El Mida plain.

Tableau 1  
 Solutions extrêmes de l’interprétation automatique

Table 1  
 Extreme solutions of the automatic interpretation

Profondeur minimale = 39 m			Profondeur maximale = 334 m		
Résistivité (Ω m)	Épaisseur (m)	Profondeur du toit (m)	Résistivité (Ω m)	Épaisseur (m)	Profondeur du toit (m)
3,66	5,54	TN	3,66	5,54	TN
30,5	25,51	5,54	105,5	111,89	5,54
1,4	8	31,05	34,2	216,43	117,43
121,3	—	39,05	121,3	—	333,86

pour la longueur de ligne  $AB/2 = 800$  m qui a été choisie en vue d’illustrer notre propos (Fig. 3). Elle confirme la classification précédente et permet de mettre en évidence ce qui apparaît comme un trait structural majeur de la zone étudiée : plusieurs accidents de direction NE–SW, parallèles à l’axe de la plaine, correspondant à de forts gradients entre une zone résistante au sud-est et d’autres zones conductrices au nord et au sud-ouest.

4.4.3. Interprétation quantitative

4.4.3.1. Étalonnage des sondages électriques sur des forages de la plaine de Mida. La Fig. 5 montre le calage des résultats du SE 35 sur ceux du forage Draa Oudhreh (FDO n° IRH 16741/5) et des SE16 et 17 sur ceux du forage Hinchir Fortass (FHF n° IRH : 7215/5). Les coupes lithologiques des deux forages sont représentées pour des raisons de commodité sur les diagrammes bilogarithmiques des SE, en faisant coïncider l’axe des profondeurs vraies du forage avec l’axe  $AB/2$  du SE ; il faut bien noter qu’il s’agit là seulement d’une convention de représentation.

En accord avec le principe d’équivalence qui porte sur la résistance transversale des formations résistantes ( $R_T = e\rho$ ) et sur la conductance longitudinale des formations conductrices ( $C_L = e/\rho$ ), l’interprétation automatique sans contraintes du SE35 (groupe c) conduit à deux solutions extrêmes, en terme de profondeur pour le toit du substratum résistant (Tableau 1).

L’accord entre la profondeur maximale (334 m) et le résultat du forage est satisfaisant (bien que ce dernier, avec une profondeur de 225 m, n’ait pas atteint le substratum résistant). Il montre qu’un modèle tabulaire est réaliste et il conduit à choisir pour la résistivité vraie des sables grossiers à conglomérats, d’une part, et pour celle des marnes à débris calcaires, d’autre part, les valeurs de 233 et 33 Ω m, respectivement.

L’interprétation quantitative des 49 sondages (voir ci-dessous) montrera que ces valeurs ne peuvent pas être conservées pour chacun d’eux ; elles constitueront néanmoins un guide et à la suite des tests d’équivalence. Ce sont généralement les valeurs les plus proches de celles-ci qui seront choisies.

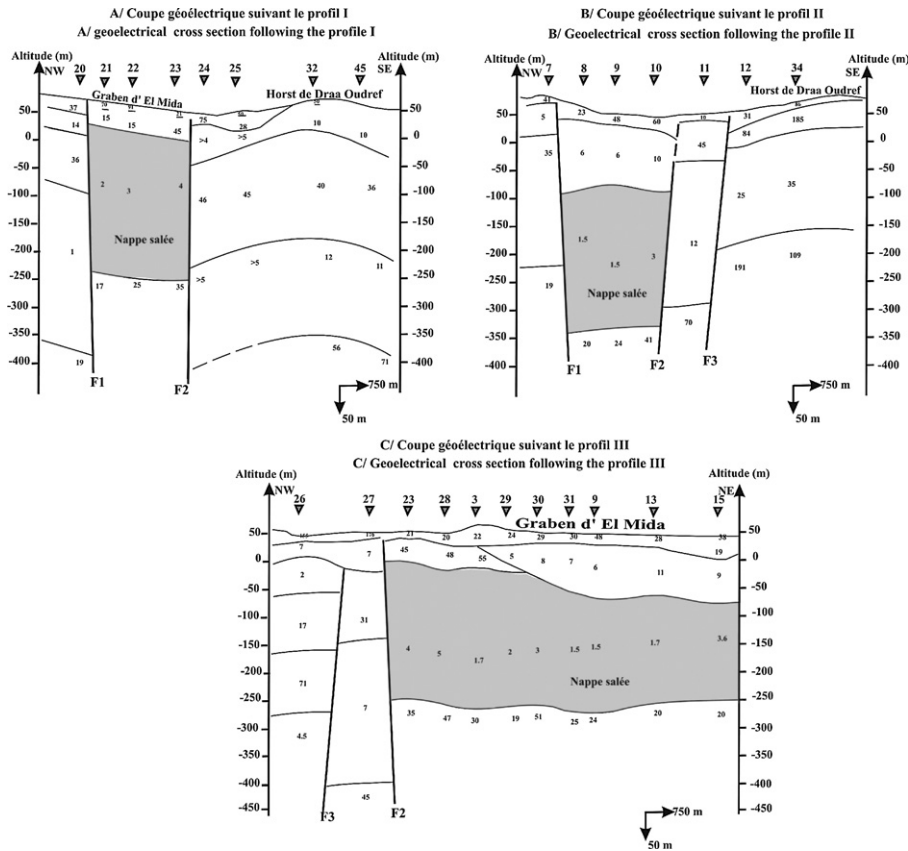


Fig. 6. Coupes géoélectriques suivant les profils PI, PII et PIII.

Fig. 6. Cross sections following the profiles PI, PII et PIII.

4.4.3.2. *Modèles géoélectriques.* Le forage FDO-16741/5, se trouvant dans la zone du horst d'Oudhref, montre le Mio-Plio-Quaternaire en contact avec la série marneuse moyennement conductrice du Sénonien inférieur marneux (SIMG), lequel repose sur le Sénonien inférieur calcaireux (SIC), donc résistant. Toutes les courbes des sondages électriques de cette zone (classe c) montrent la même succession : un mince conducteur (C1), un résistant (R1), un conducteur (C2) au-dessus du substratum résistant (R2).

Nous avons donc fait l'hypothèse que la même succession géologique était présente sur la totalité de l'étude de la zone du horst d'Oudhref. De plus, l'interprétation qualitative a montré qu'elle était affectée au nord par un accident majeur SW-NE, l'effondrement du compartiment nord conduisant à un épaissement notable du Sénonien inférieur ; à ces variations d'épaisseur peuvent être associées des variations de faciès, donc de résistivité vraie, selon l'importance des intercalations de calcaire, de marne et de gypse. Les variations d'épaisseur et de nature du remplissage mio-plio-quaternaire

constituent enfin un élément supplémentaire de différenciation entre les sondages électriques.

Pour l'étude des autres parties du secteur (classes a, b et d), on a fait le même raisonnement, classe par classe, et on a abouti à des conclusions sur les successions possibles des conducteurs et des résistants.

4.4.3.3. *Coupes géoélectriques.* Plusieurs coupes géoélectriques ont été réalisées suivant les directions NE-SW et SW-NE. On présentera uniquement les trois coupes les plus représentatives de ces directions (Fig. 7).

4.4.3.3.1. *Coupe géoélectrique suivant le profil PI.* Étant donné que le secteur d'étude est compartimenté par des failles le subdivisant en sous-zones, il est raisonnable d'interpréter la coupe, compartiment par compartiment.

*L'extrême Nord-Ouest (type d) :* on trouve d'abord 150 m d'alternances de résistants et de conducteurs représentant des alternances calcaire-marneuses du Crétacé supérieur, puis une série très conductrice (1 Ω m) et épaisse (~300 m), pouvant s'identifier à des grès du CI



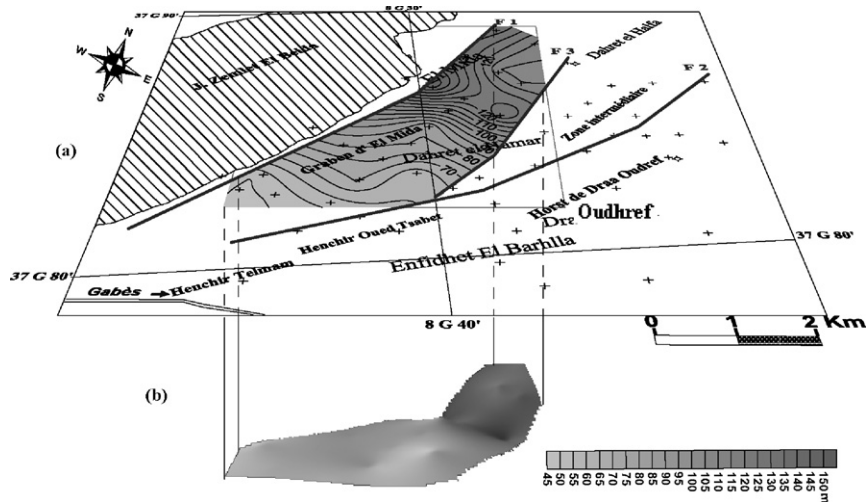


Fig. 7. Carte en isobathes de la nappe salée (a. 2 D, b. 3 D).

Fig. 7. Isobaths map of the saline aquifer (a. 2 D, b. 3 D).

chargés en eau très salée, reposant sur un substratum relativement conducteur de nature gréso-argilo-marneuse du CI.

*Le graben d'El Mida (type a)* : il est large d'à peu près 2 km à ce niveau et encadré par deux failles d'effondrement (F1 et F2). Il présente à peu près la même succession que la coupe précédente, avec amincissement de la partie superficielle (50 m) et augmentation de la résistivité du niveau très conducteur renfermant une nappe salée (4  $\Omega$ m), le tout reposant sur un substratum relativement conducteur et correspondant à des alternances gréso-argilo-marneuses du CI. Nous pensons a priori que la charge en sels de l'eau de la nappe salée dans ce graben pourrait être due à une contamination latérale à partir du niveau très conducteur précédent (donc à partir de Zemlet El Beida) à travers la faille F1.

*Le horst de Draa Oudhref (type c)* : il se présente comme un flanc nord d'une structure anticlinale tronquée au nord-ouest par la faille F2. Du haut vers le bas, on a la succession suivante :

- sous une mince couverture superficielle et hétérogène quaternaire, un niveau conducteur (<10  $\Omega$ m) et d'épaisseur inférieure à 50 m. Il correspondrait aux sables du Miocène (formation Oudhref). La faible résistivité des sables provient de leur saturation en eau légèrement plus chargée. Ceci est confirmé surtout au niveau des puits superficiels ;
- un niveau résistant (40 à 50  $\Omega$ m), épais de plus de 150 m. Il correspondrait à des grès, qui seraient

attribuables au CI et qui seraient un objectif hydrogéologique ;

- un niveau conducteur très comparable au premier quant à sa résistivité et son épaisseur. Tout près de la faille F2, sa résistivité devient très faible, ce qui donne à penser à la présence d'une nappe, contaminée par celle du graben d'El Mida via la faille F2. Sa salinité serait plus élevée que celle confinée dans le niveau précédent ;
- un substratum résistant (plus de 50  $\Omega$ m) et qui serait comparable au deuxième niveau, donc gréso-argilo-marneux, susceptible de contenir un aquifère de qualité meilleure.

#### 4.4.3.3.2. Coupe géoélectrique suivant le profil PII.

Elle est parallèle à la précédente et se trouve à plus de 3 km au nord-ouest. Elle diffère de la précédente par les points suivants :

- au niveau du graben d'El Mida, le niveau très conducteur à nappe salée devient plus profond ;
- une troisième faille F3, entre F1 et F2, effondre la partie nord du horst de Draa Oudhref et contribuant ainsi à l'apparition d'une aire intermédiaire (SE de type b) ;
- au niveau du horst Draa Oudhref, la succession des couches devient différente. En effet, on trouve d'abord un niveau très résistant, qui correspondrait à des sables, puis un niveau relativement résistant (<40  $\Omega$ m) d'épaisseur supérieure à 150 m, qui pourrait s'identifier au substratum de la coupe précédente ;

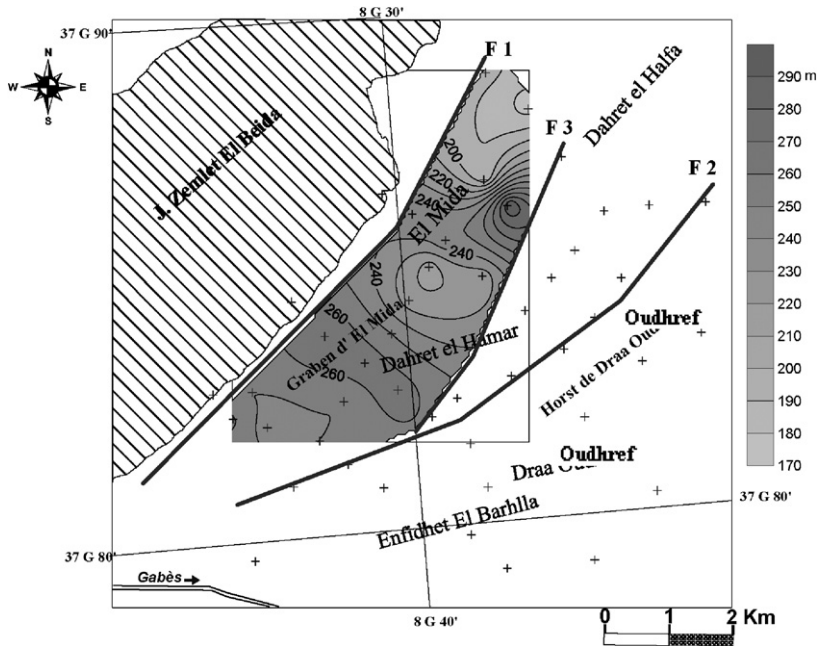


Fig. 8. Carte en isopaques de la nappe salée.

Fig. 8. Isopach map of the saline aquifer.

- enfin, un substratum très résistant ( $>100 \Omega \text{ m}$ ) correspondrait, soit à une séquence purement sablo-gréseuse, soit à une séquence carbonatée.

Il apparaît que la zone intermédiaire a joué un rôle de seuil de contamination des eaux, ce qui pourrait expliquer les fortes résistivités du horst de Draa Oudhref, comparées à celles de la coupe précédente.

**4.4.3.3. Coupe géoélectrique suivant le profil PIII.** Elle est perpendiculaire aux coupes précédentes et longe l'axe du graben d'El Mida (type a). Au sud-ouest et en plus de F2, on rencontre une autre faille F4, qui serait de direction NW–SE. Au centre et au nord-est, la structure de la coupe est simple, avec la succession des différents niveaux du graben. Le niveau résistant superficiel se biseaute en allant vers le nord-ouest, où il serait relayé par un niveau conducteur de nature argileuse. Ces deux niveaux relayés surmontent le niveau à nappe salée, qui s'amincit vers le nord-est. Le tout repose sur un substratum relativement résistant ( $>20 \Omega \text{ m}$ ).

**4.4.3.4. Cartes en isobathes et en isopaques.** Du point de vue de l'hydrogéologie, seuls deux niveaux peuvent contenir des aquifères : le niveau très conducteur mis en évidence dans le graben d'El Mida et le substratum résistant dans le horst de Draa Oudhref.

Le premier niveau, vu sa très faible résistivité, serait salé. La Fig. 8 montre que son toit s'approfondit du sud-ouest vers le nord-est, de moins de 50 m à plus de 140 m, à la suite de l'épaississement de la couverture le surmontant. Son épaisseur (Fig. 9) est marquée par une diminution à partir du centre en allant vers le nord-est.

Le second niveau serait de qualité meilleure puisque sa résistivité est importante. La Fig. 9 montre que son toit se présente en anticlinal et s'approfondit, plus vers le sud-ouest que vers le nord-est, à partir du centre du horst de Draa Oudhref.

## 5. Origines de la salinité

De façon générale, l'origine de la salinité des aquifères a fait l'objet de plusieurs travaux, qui ont permis de dégager plusieurs hypothèses, parmi lesquelles on peut citer :

- (i) pour les zones côtières, l'exploitation intensive d'une nappe rend les risques de la contamination par l'eau de mer plus importants [6,8,17,20,22,23] ;
- (ii) la lithologie des couches (présences d'évaporites) [18] peut expliquer dans certains cas l'origine de la salinisation d'un aquifère ;
- (iii) dans d'autres cas, le substratum de l'aquifère peut jouer le rôle de source de salinisation [16].

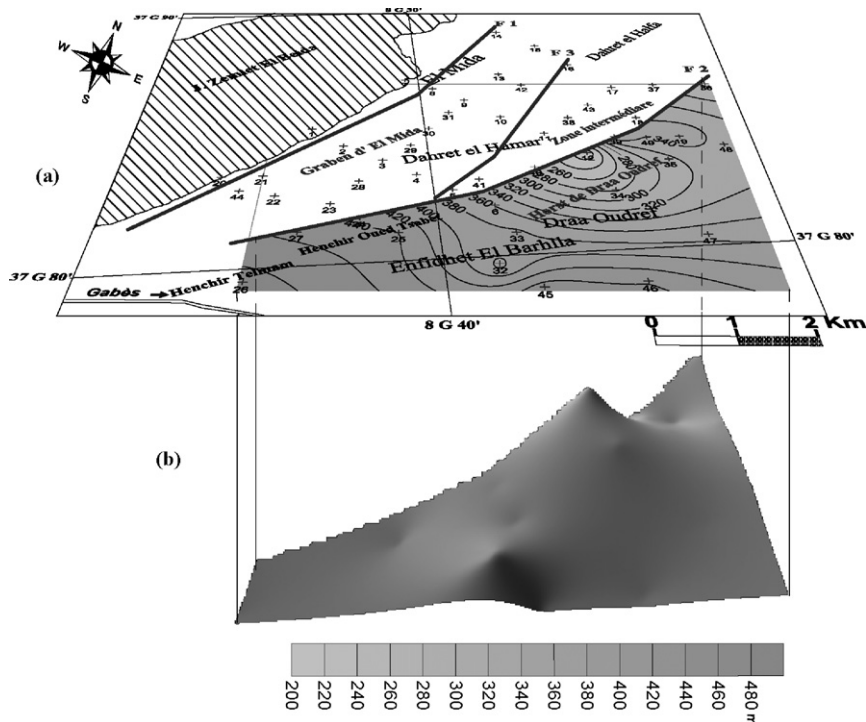


Fig. 9. Carte en isobathes du substratum résistant au niveau du horst de Draa Oudhref (a. 2 D, b. 3 D).

Fig. 9. Isobaths map of the resistant bedrock in the Draa Oudhref horst (a. 2 D, b. 3 D).

Compte tenu des conditions géographiques (loin de la mer), hydrogéologiques (absence d'exploitation dans la zone) et géologiques (absence d'un substratum salé), la forte salinité de la nappe d'El Mida doit son origine à des échanges entre l'aquifère et son environnement, en accord avec la deuxième hypothèse. Par conséquent, l'eau est contaminée, d'abord par drainage verticale et latérale à partir de Zemlet El Beida (présence d'évaporites) à travers la faille bordière (F1). Ensuite, par apport latéral des saumures de Sebkhet El Hamma (sud-ouest) qui s'écoulent vers leur exutoire naturel (Oued El Akarit au nord-est) en traversant la plaine d'El Mida [19].

## 6. Synthèse et conclusion

Les 49 SE réalisés dans la plaine d'El Mida (Gabès Nord) ont permis d'établir un modèle géologique représenté par le graben d'El Mida, la zone intermédiaire et le horst de Draa Oudhref.

Le graben d'El Mida, qui est encadré par les deux failles F1 et F2, est surtout caractérisé par la présence d'un niveau très conducteur, s'identifiant à une séquence sablo-grés-argileuse du CI, contenant un aquifère à eau très salée. La forte salinité pourrait avoir deux origines : d'abord à partir de Sebkhet El Hamma, au sud-ouest, qui coule vers son exutoire l'Oued El Akarit,

puis, par drainage verticale et latérale, à partir de Zemlet El Beida à travers la faille bordière F1. Cet aquifère salé surmonte un substratum relativement résistant, qui pourrait, lui aussi, présenter un intérêt hydrogéologique. Mais sa position, en dessous d'un niveau très conducteur renfermant une nappe salée, poserait certainement des problèmes d'exploitation.

Le horst de Draa Oudhref est caractérisé, dans sa partie sud-ouest, par la présence d'un substratum résistant, formé par des grès du CI, pouvant constituer un objectif hydrogéologique. Dans la partie nord-est, on note la présence d'un substratum très résistant, qui pourrait être formé par des grès constituant un bon aquifère, ou par des carbonates pouvant également constituer un bon aquifère.

Ces deux structures sont séparées, au nord-est, par une zone intermédiaire, qui se présente comme un effondrement du horst de Draa Oudhref par l'effet de la faille F3.

Du point de vue méthodologique, cette étude montre l'importance du Sud-Est dans la recherche hydrogéologique, surtout dans les zones qui s'y prêtent bien, comme le Sud tunisien. Toute prochaine prospection hydrogéologique dans la plaine d'El Mida doit être guidée et orientée, tant latéralement que verticalement, par les résultats actuels.

## Références

- [1] C. Abbes, S. Abdeljaouad, H. Ben Oueddou, F. Zargouni, Carte géologique d'El Hamma à 1:100 000, feuille n° 74, Office national des mines, Tunis, 1986.
- [2] C. Abbes, H. Ben Oueddou, M.L. Louhaichi, A. Mamou, S. Lassoued, Notice explicative de la carte géologique d'El Hamma à 1:100 000, Office national des mines, Tunis, 1994 (60 p.).
- [3] J.-L. Astier, Géophysique appliquée à l'hydrogéologie, Masson & C<sup>ie</sup>, Paris, 1971 (272 p.).
- [4] N. Ben Ayed, Évolution tectonique de l'avant-pays de la chaîne alpine de Tunisie du début du Mésozoïque à l'actuel, thèse, université Paris-Sud, Orsay, 1986 (328 p.).
- [5] S. Bouaziz, Étude de la tectonique cassante dans la plate-forme et l'Atlas sahariens (Tunisie méridionale) : évolution des paléochamps de contraintes et implications géodynamiques, thèse d'État, université Tunis-2, 1995 (485 p. + annexe).
- [6] M.-L. Calvache, A. Pulido Bosch, Processus d'intrusion extrusion marine dans des aquifères côtiers du sud de l'Espagne, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA 323 (1996) 673–679.
- [7] L. Chihi, M. Ben Haj Ali, N. Ben Ayed, Mécanisme et signification structurale du plissement dans les chaînes des Chotts (Tunisie méridionale), Analogie avec les plis associés au décrochement est–ouest de Sbiba, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 315 (1992) 1245–1252.
- [8] L. Fedrigoni, M. Krimissa, K. Zouari, A. Maliki, G.M. Zuppi, Origin of the salinisation and hydrogeochemical behaviour of phreatic suffering severe natural and anthropic constraints an example from the Djbeniana aquifer (Tunisia), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA 332 (2001) 665–671.
- [9] M. Gasmi, H. Ben Dhia, A. Lahlou, Caractérisation géophysique d'une nappe artésienne superficielle à Sousse (Tunisie), La Houille blanche 6 (1997) 79–88.
- [10] M. Gasmi, P. Andrieux, H. Ben Dhia, F. Amri, Contribution de la prospection électrique à l'étude hydrogéologique des aquifères dans les plaines de Mech et de Sned sud (Tunisie centrale), La Houille blanche 3/4 (2001) 97–111.
- [11] M. Gasmi, Apport de la géophysique à la reconnaissance et à la gestion des ressources naturelles. Applications en Tunisie, thèse d'État, ENIS, juin 2002 (471 p. et 203 figures).
- [12] M. Goldman, A. Arad, U. Kafri, D. Gilad, A. Melloul, Detection of 1 freshwater/seawater interface by the time domain electromagnetic (TDEM) method in Israel, in: Proc. 10th SWIM, Gand, Belgique, 1988, pp. 329–344.
- [13] M. Goldman, D. Gilad, A. Ronen, A. Melloul, Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method, Geoexploration 28 (1991) 153–174.
- [14] U. Kafri, M. Goldman, The use of the time 1 domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity, J. Appl. Geophys. 57 (2005) 167–178.
- [15] O. Koefoed, Geosounding principle. Resistivity sounding measurements, tome 1, Methods in Geochemistry and Geophysics, 1979, 14 A (277 p.).
- [16] S. Krimissa, J.-L. Michelot, L. Bouchaou, J. Mudry, Y. Hisou, Sur l'origine par altération du substratum schisteux de la minéralisation chlorurée des eaux d'une nappe côtière sous climat semi-aride (Chtouka-Massa, Maroc), C. R. Geoscience 336 (2004) 1363–1369.
- [17] A. Mammou, Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du Sud tunisien, thèse d'État, université Paris-Sud, Orsay, 1990 (426 p.).
- [18] G. Masclé, H. Arnaud, G. Dardeau, J. Deblmas, P. Dubois, M. Gidon, P.-C. de Graciansky, C. Kerckhove, M. Lemoine, Halocinèse précoce sur la marge téthysienne alpine : vers une réinterprétation des zones de gypse des Alpes, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 302 (1986) 963–968.
- [19] A.F. Mekrazi, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Gabès-Nord, thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université Bordeaux-1, 1975 (169 p., 3 annexes).
- [20] B. Panteleit, W. Kessels, W. Kantor, H.D. Schulz, Geochemical characteristics of salinization-zones in the coastal aquifer test field (CAT-Field) in North-Germany, in: Proc. 1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Maroc, 2001.
- [21] D.S. Parasnis, Principles of Applied Geophysics, fifth ed., Chapman and Hall, London, 1997 (429 p.).
- [22] P. Pulido-Leboeuf, A. Pulido-Bosch, M.-L. Calvache, A. Vallegos, J.-M. Andreu, Strontium,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  and  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro Aquifer (SE Spain), C. R. Geoscience 335 (2003) 1039–1048.
- [23] V. Shtivelman, M. Goldman, Integration of shallow reflection seismics and time domain electromagnetics for detailed study of the coastal aquifer in the Nitzanim area of Israel, J. Appl. Geophys. 44 (2000) 197–215.
- [24] R. Trabelsi, M. Zairi, H. Smida, H. Ben Dhia, Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie, C. R. Geoscience 337 (2005) 515–524.