

## **Analyse géophysique et structurale de l'aquifère de la plaine du Souss-Massa: synthèse et conséquences hydrogéologiques**

### **Geophysical and structural analysis of the Souss-Massa aquifer: synthesis and hydrogeological implications**

Mohammed HSSAISOUNE <sup>1\*</sup>, Said BOUTALEB <sup>1</sup>, Mohamed BENSSAOU <sup>1</sup>, El hassane BERAAOUZ <sup>1</sup>, Tarik TAGMA <sup>2</sup>, M'Hamed EL FASSKAOUI <sup>3</sup> & Lhoussaine BOUCHAOU <sup>1</sup>

**Abstract:** A multidisciplinary study based on electrical resistivity measurements and hydrogeology boreholes data combined with chemical and isotopic results, was performed in the Souss-Massa plain. The studied area occupies a depression between two major structural domains: the Anti-Atlas in the South and the High Atlas in the North. That depression is filled with Mesozoic to Quaternary deposits overlying the Palaeozoic basement and includes two main aquifers (shallow Plio-Quaternary and Cenomanian-Turonian confined aquifers). The calibration of electrical soundings with deep boreholes allowed to understand the geometry and the structure of the aquifer of Souss-Massa plain. The achievement of geoelectrical cross sections and an isohypse map of the top of the resistant Cenomanian/Turonian strata highlighted three groups of electrical discontinuities and four major compartments. The structural map compiled with transmissivity map, TDS map, isotopic and piezometric surface map support the existence of aquifer compartment. The hydraulic communication, the chemistry and natural and artificial recharge has been controlled directly by the geometry, global structure and lithological nature. The results will allow to improvement in the hydrodynamic and simulation modeling in order to manage the water resources in the area marked by the recurrent water crisis.

Key words: Souss-Massa Plain, Geoelectrical cross sections, Geometry, Shallow Plio-Quaternary aquifer, Cenomanian-Turonian confined aquifer.

**Résumé:** Une étude pluridisciplinaire basée sur les données de sondages électriques et sur les données de forages hydrogéologiques combinées aux résultats des études chimiques et isotopiques a été réalisée dans la plaine du Souss-Massa. La zone étudiée constitue une dépression entre deux grands domaines structuraux bien distincts : l'Anti-Atlas au sud et le Haut Atlas au nord. Cette dépression est comblée de dépôts d'âge mésozoïque à quaternaire recouvrant un socle paléozoïque. La plaine du Souss-Massa contient deux formations aquifères principales: la nappe phréatique du Plio-Quaternaire et la nappe profonde du Cénomano-Turonien.

L'étalonnage des sondages électriques avec des forages profonds a permis de comprendre la géométrie et la structuration globale des aquifères de Souss-Massa. La réalisation des coupes géo-électriques et la carte des isohypses du toit de l'aquifère profond a permis de distinguer trois familles de failles et/ou de discontinuités électriques et quatre compartiments.

La compilation de la carte structurale avec les cartes de transmissivité, de minéralisation, isotopique et piézométrique affirme le compartimentage hydraulique de l'aquifère du Souss-Massa. D'une manière générale, la géométrie, la structuration globale de la plaine et la nature lithologique des formations ont une influence plus au moins directe sur la chimie, la recharge et aussi sur les écoulements verticaux et latéraux des eaux souterraines de l'aquifère du Souss-Massa. Les résultats de cette étude permettront de mieux affiner les modèles hydrodynamiques et de simulation élaborés par l'Agence du Bassin Hydraulique du Souss-Massa-Draa (ABHSMD) en vue d'une gestion intégrée des ressources en eau dans cette région souffrant d'une crise hydrique.

Mots clés: Plaine de Souss-Massa, Coupes géo-électriques, Géométrie, Nappe phréatique du Plio-Quaternaire, Nappe profonde du Cénomano-Turonien.

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie Appliquée et Géo-Environnement, Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc.

<sup>2</sup> Département de Géologie, Faculté Polydisciplinaire de Khouribga, Université Hassan I, Settat, Maroc.

<sup>3</sup> Agence du bassin hydraulique du Souss-Massa-Draa

\* mhssaisoune@yahoo.fr

## INTRODUCTION

La plaine de Souss-Massa, couvrant une superficie de plus de 5500 km<sup>2</sup> est située au sud-ouest du Maroc. Elle occupe une position de dépression entre deux grands domaines structuraux bien distincts : le domaine de l'Anti-Atlas au sud et le domaine Atlasique au nord (Fig. 1). Elle est caractérisée par plusieurs systèmes aquifères à potentiel hydrique bien distinct. La configuration géométrique et structurale de ces systèmes aquifères reste mal connue malgré l'exploration géologique et hydrogéologique entreprise par plusieurs auteurs (AMBROGGI, 1963 ; DIJON, 1969 ; COMBE et EL HEBIL, 1977). Ces dernières années, d'autres travaux de recherche se sont intéressés au fonctionnement de l'aquifère plio-quadernaire en utilisant l'outil chimique et isotopique (SAIDI, 1995; HSISSOU et al., 1997, 1999; BOUTALEB et al., 2000; AHKOUK et al., 2003; DINDANE, 2005; KRIMISSA et al., 2004; BOUCHAOU et al., 2008; BOURAGBA et al., 2011; TAGMA et al., 2009). Si les résultats de ces études sont d'une grande importance, la non maîtrise d'une manière approfondie de la géométrie de l'aquifère limite certaines interprétations des phénomènes déterminants pour la gestion de la ressource en eau dans la région ; notamment dans le cas de l'étude des zones de drainage et de recharge préférentielles, de l'intrusion marine, de la dispersion latérale de la recharge naturelle et artificielle, de la relation nappe profonde-nappe superficielle et de l'ajustement des modèles mathématiques.

Les ressources en eau dans la région du Souss-Massa sont en cours de déstockage et de salinisation notamment ceux des aquifères superficiels. Pour diminuer l'effet de la surexploitation des eaux des aquifères superficiels, l'utilisation des eaux des aquifères profonds reste une solution opportune qui pourrait constituer une alternative pour combler en partie le déficit hydrique observé dans la région. Dans ce sens une connaissance approfondie des caractéristiques géométriques, structurales et hydrogéologiques des formations profondes se révélerait nécessaire.

La reconstitution de la configuration géométrique du système aquifère de la région de Souss-Massa peut être améliorée en intégrant les données de sondages électriques permettant ainsi de mieux identifier la structure et la géométrie du sous-sol, grâce à l'identification de la résistivité et de l'épaisseur de chaque unité géologique souterraine (ASFAHANI, 2007; GOUASMIA et al., 2006; ZOUHRI et al., 2004; TOTO et al., 2008; GUELLALA et al., 2009).

L'objectif de ce travail vise à préciser l'architecture géométrique et structurale des aquifères de la plaine du Souss-Massa et ses conséquences hydrogéologiques, dans l'optique d'une gestion raisonnable de ces aquifères. Pour atteindre cet objectif nous avons utilisé d'une part les données des sondages électriques réalisés dans la zone d'étude corrélés aux données de forages hydrauliques et pétroliers et d'autre part les données des analyses chimiques et isotopiques.

## CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

### Morphologie et Géologie

Du point de vue morphologique, la plaine du Souss-Massa est modélisée sous forme d'une gouttière à très faible rayon de courbure, redressée vers les piémonts montagneux et dans l'axe de laquelle l'oued Souss a tracé son lit. Celui-ci, ramifié et large en amont, est relativement encaissé vers l'aval. De l'est à l'ouest, la pente est de 1% vers Aoulouz, descend à 0.5 % près de Taroudant puis 0.3% dans le cours inférieur. De Aoulouz à l'océan, la dénivellation est ainsi de 700 m sur 150 km.

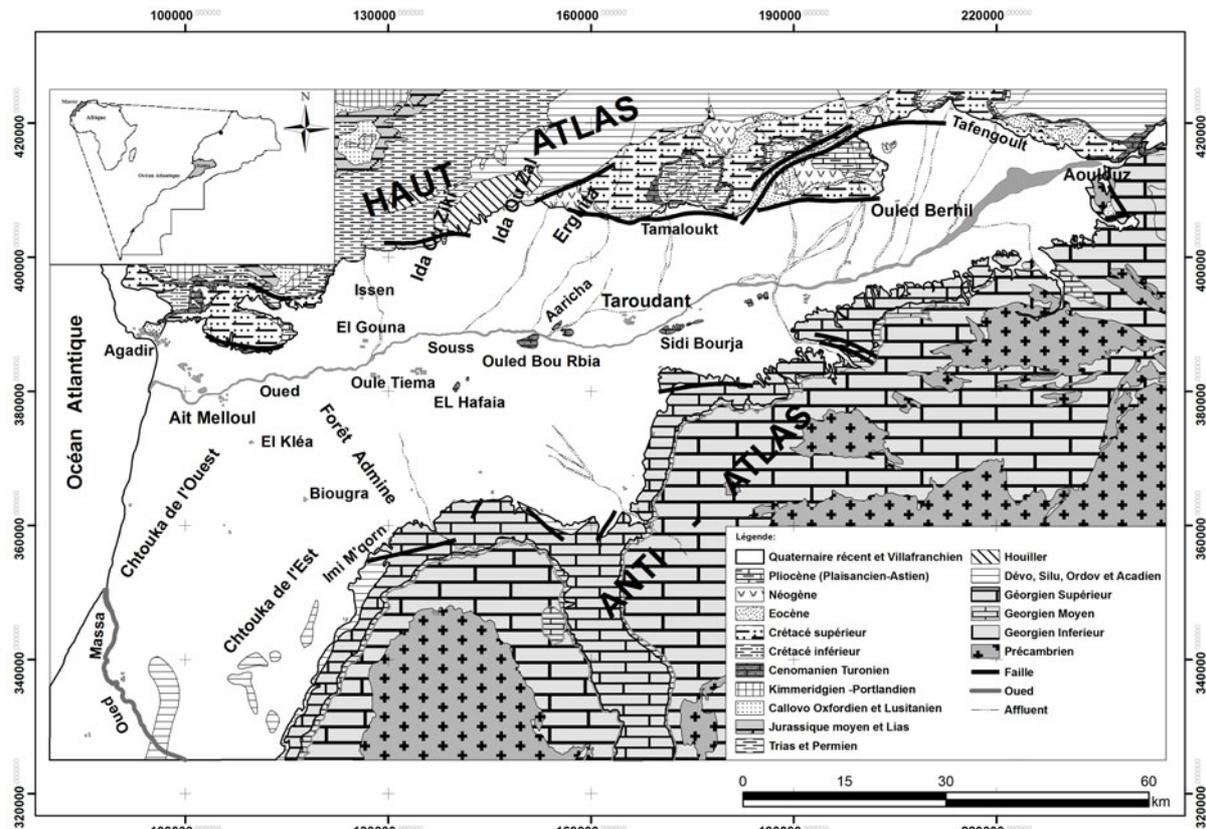
La plaine est dépourvue de reliefs notables à l'exception de quelques vestiges d'une cuesta crétacée sous forme de collines et de buttes dédoublées et presque entièrement dissimulées dans les formations de remplissage plio-quadernaire.

Sur le plan géologique, la succession stratigraphique des formations de la région de Souss-Massa est relativement connue grâce aux forages exécutés dans la plaine, et à travers quelques affleurements de surface surtout aux pieds des montagnes de l'Anti-Atlas et du Haut Atlas et au niveau de quelques buttes témoins au centre de la plaine (AMBROGGI, 1963). Les formations géologiques rencontrées s'étendent depuis le Précambrien jusqu'au Quadernaire (Fig. 1).

On reconnaît particulièrement:

**Le Pré-Cambrien:** Composé à la fois de terrains sédimentaires et cristallins, le Pré-Cambrien I dévoile des granites, des migmatites, des micaschistes, des gneiss et de roches basiques. Le Pré-

Cambrien II à dominance sédimentaire est, en revanche, composé d'une succession de quartzites et de schistes d'environ 2000 m de puissance surmontée par un ensemble conglomératique.



**Figure 1 :** Carte de situation géographique et géologique du bassin de Souss-Massa (extraite de la carte géologique de Marrakech 1:500000 dressée par G. CHOUBERT, 1957, modifiée).

A cette succession sédimentaire s'ajoutent des roches métamorphiques et magmatiques constituées de dolérites, et de granites. Enfin le Pré-Cambrien III est représenté par des formations sédimentaires détritiques constituées par des grès et des conglomérats dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Ces formations constituent des aquifères fissurés à potentiel très limité.

**Le Paléozoïque:** Dans la plaine du Souss, le Cambrien est représenté par les affleurements de la base de la colline de Sidi Bourja. Il est reconnu aussi par le biais des forages hydrogéologiques dans la plaine du Souss-Massa au niveau de la bordure septentrionale de l'Anti-Atlas. Il est représenté à la fois par la série schisto- calcaires géorgiens et par des schistes verts imperméables acadiens.

**Le Permo-Trias:** Reconnu essentiellement au niveau de l'oued Issen, le Permo-Trias à dominance détritique est représenté par des conglomérats, des grès, des argiles gréseuses et des marnes rouges (1000 m d'épaisseur), cette succession basale est surmontée par des argiles gypsifères et salifères de 500 m de puissance. Les évaporites du Trias sont à l'origine de l'anomalie de la salinité des eaux de la nappe du Souss au niveau de l'Issen (BOUTALEB et al., 2000, HSISSOU et al., 2002, BOUCHAOU et al. 2008).

**Le Jurassique:** Dans la plaine du Souss-Massa, le Jurassique a été reconnu par le forage pétrolier de Hassi El-Beguer HB1 (2374 m de profondeur) qui a recoupé les grès et les marnes du Lias et du Dogger et l'ensemble calcaires dolomitiques-marnes du Jurassique supérieur. Par sa nature calcaire, le Jurassique constitue un aquifère karstique relativement important dans le Haut Atlas.

**Le Crétacé:** il est reconnu au niveau de la plaine du Souss-Massa en subsurface par sondages et en affleurement d'une manière discontinue au niveau des collines de Haffaia, Ouled-Bou-Rbiaa, Sidi Bourja, Tagma-Tagtrannt et Igoudar (Ouled Berrehil). Le Crétacé inférieur est caractérisé par des formations carbonatées où dominent les calcaires et les dolomies gréseux avec intercalation de quelques niveaux marneux ou gréseux. Le Cénozoïque est constitué de calcaires et de dolomies intercalés de niveaux marneux (TGA1 et TGA2) ou de gypses (EGA1). Cet ensemble est coiffé par des dolomies et calcaires massifs à silex typique du Turonien (100 m). Au sommet, le Sénonien (300 m) est constitué par des dolomies et calcaires gréseux ou marneux à intercalation de niveaux

d'anhydrite (EGA1). Le Cénomano-Turonien est reconnu comme aquifère profond dans la plaine du Souss.

**L'Eocène:** Dans la partie nord de la plaine du Souss-Massa, les trois niveaux éocènes ont été observés en affleurement au niveau du pli d'Igoudar et en subsurface grâce aux coupes des forages profonds des Ouled Berrehil et d'Aoulouz. L'Eocène inférieur est représenté par des marnes sableuses et gréseuses de couleur rouge brique. L'Eocène moyen est reconnu par ses conglomérats et ses calcaires à silex blancs ou roses. L'Eocène supérieur est représenté par des marno-calcaires blancs ou grès rougeâtres. Dans la partie sud de la plaine, l'Eocène est constitué de calcaires et marnes gréseuses. Les formations perméables de l'Eocène sont des aquifères potentiels quand elles présentent des épaisseurs suffisantes.

**Le Néogène continental:** Les dépôts du Néogène sont représentés par des formations conglomératiques et marno-calcaires pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de puissance.

**Le Pliocène:** Dans le golfe d'Agadir, le Pliocène ancien est figuré par des calcaires, des grès, des niveaux lumachelliques et des marnes sombres. Le Moghrébien, par contre, montre des grès coquilliers, des calcaires gréseux et des conglomérats en discordance sur le Pliocène ancien. Dans la plaine des Chtouka, le Pliocène et le Miocène sont représentés par l'unique formation fluvio-lacustre constituée par des sables marneux, des marnes et des calcaires d'une puissance comprise entre 50 et 200 m.

**Le Quaternaire:** Les dépôts du Quaternaire sont modelés en alluvions fluviales, cônes de déjection, dépôts lacustres et dunes de sables. Selon AMBROGGI (1963), le Quaternaire ancien est représenté par des cônes de déjection, le Quaternaire moyen par la formation du Souss et le Quaternaire récent par des alluvions et surtout des limons. Dans la plaine des Chtouka qui est l'extension naturelle de la plaine du Souss vers les sud-ouest, le Quaternaire récent est constitué par des dunes sableuses le long de littoral pouvant atteindre 100 m de puissance. Le Quaternaire moyen et inférieur montre des grès dunaires et des barres calcaires (20 à 100 m de puissance) intercalées par des niveaux de calcaires lacustres plus ou moins marneux. Ces changements complexes dans les environnements sédimentaires peuvent être dus aux changements climatiques au cours du Plio-Quaternaire (AIT HSSAIN & BRIDGLAND, 2009).

## Hydrogéologie

Dans la plaine du Souss-Massa, deux types de réservoirs aquifères importants sont distingués: un superficiel (Plio-Quaternaire) et l'autre profond (Cénomano-Turonien)

La nappe phréatique superficielle constitue l'aquifère le plus important de la région. Elle circule principalement dans un remplissage sédimentaire reconnu par sondage et composé d'une part de marnes sableuses et grès coquilliers dans le golfe d'Agadir et d'autre part de conglomérats, de marno-calcaires, de calcaires, de grès, et de limons dans l'ensemble de la plaine. L'écoulement général se fait de l'est vers l'ouest. Il joue un rôle important dans l'alimentation en eau potable et le développement agricole de la région du Souss-Massa.

Pour l'aquifère profond, deux nappes profondes ont été reconnues dans la plaine du Souss-Massa, la première a pour réservoir les conglomérats du Néogène et la deuxième est formée par les calcaires et les calcaires dolomitiques du Cénomano-Turonien. Cet aquifère profond se manifeste sous forme d'eaux artésiennes au niveau des forages d'Ouled Teima, Aïn Chaïb, El-Kléa, El-Gounna et récemment à Taroudant, avec des faibles débits au sol. Par endroits, ces aquifères se rencontrent étroitement avec la nappe phréatique superficielle permettant ainsi sa recharge d'une part et d'autre part son alimentation au niveau des montagnes du Haut Atlas adjacent (DIJON, 1969 ; BOUTALEB *et al.*, 2000). La recharge des aquifères de la plaine se fait essentiellement à partir des reliefs de l'Atlas via les abouchements et l'infiltration le long des oueds.

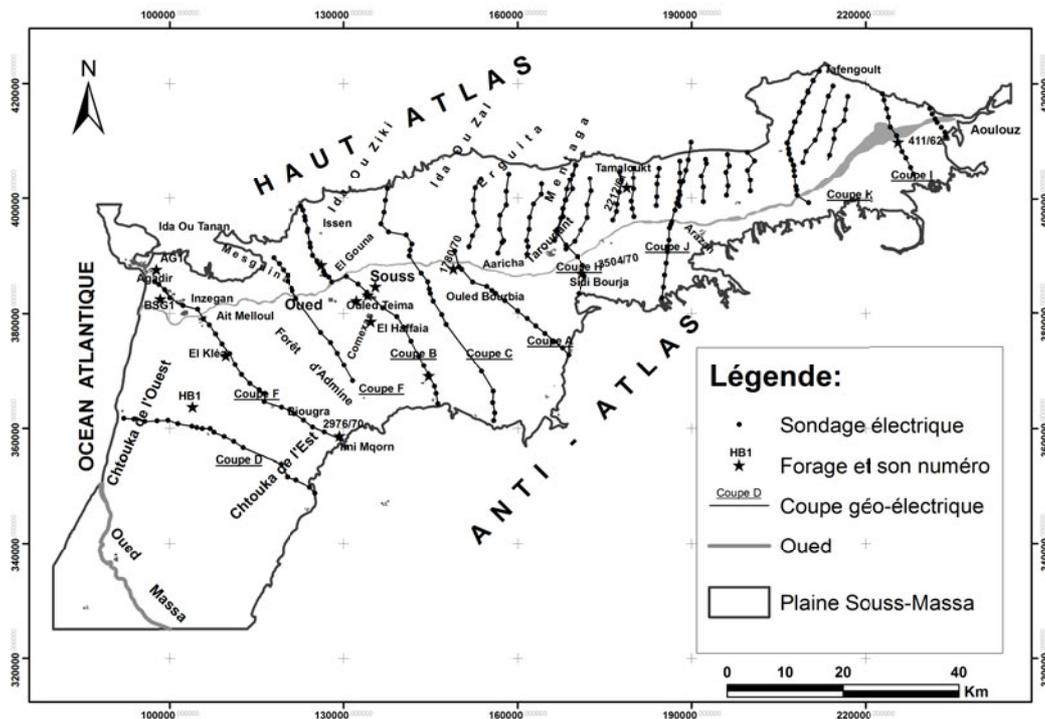
Notre étude vise à mieux éclaircir la structure et la géométrie de ces formations aquifères de la plaine du Souss-Massa.

## APPROCHE UTILISEE

Pour répondre aux objectifs de cette étude, nous nous sommes basés sur les données de l'ensemble des forages, des sondages et les résultats des différentes études chimiques et isotopiques réalisés dans la plaine du Souss ainsi que les récents travaux de géologie structurale qui proposent des modèles

structuraux du bassin et ses relations avec la chaîne atlasique (MISSENARD, 2006 et MISSENARD *et al.*, 2007). Un regard spécial a été porté sur les campagnes géophysiques (sondages électriques et sismiques) réalisées dans la région et qui n'ont fait à nos jours aucune synthèse hydrogéologique à l'échelle du bassin. Dans notre étude, nous avons repris les anciennes campagnes réalisées par la Compagnie Africaine de Géophysique entre 1947 et 1977, la Compagnie Générale de la Géophysique entre 1952 et 1954, le bureau de Recherche Pétrolière et Minière (BRPM) 1968 et les récentes campagnes réalisées par GEOATLAS en 2003 et MAADIRASSAT en 2008.

Plus de 260 sondages électriques répartis sur une superficie de 5550 km<sup>2</sup> et suivant 26 profils géo-électriques ont été utilisés (Fig. 2). Selon la nécessité, ces sondages électriques de type Schlumberger ont été exécutés avec une longueur de ligne AB, entre les électrodes d'émission varie entre 1000 et 10000 m.



**Figure 2 :** Carte de positionnement des sondages électriques verticaux réalisés dans la plaine du Souss-Massa

Plus de 420 fichiers de forages hydrauliques et 7 fichiers de forages pétroliers, où les données techniques relatives aux faciès géologiques et hydrogéologiques disponibles ont été consultées, ces données ont été fournies par l'agence du bassin hydraulique du Souss-Massa-Draa (ABHSM).

La base de données de la géophysique est combinée aux résultats de l'interpolation des sondages pétroliers et hydrauliques.

## PRESENTATION DES DONNEES GEO-ELECTRIQUES ET RESULTATS OBTENUS

Les sondages d'étalonnages calibrés sur des forages mécaniques ont permis de déterminer les résistivités vraies des couches des différentes formations constituant l'aquifère du Souss-Massa et d'établir des corrélations électriques tout au long des profils électriques (Fig.3 et 4).

Le log lithologique restitué du forage 1039/70, comparé au diagramme du sondage électrique B'4 permet d'attribuer une résistivité à chaque faciès (tableau 1). Il montre aussi que l'aquifère superficiel, formé par des dépôts hétérogènes correspond à une succession de couches résistantes et conductrices notées R0, Bcd, C0, R' et Cp attribuée depuis la surface aux formations du Quaternaire au Pliocène continental et à la partie sommitale du Sénonien marneux. Cette succession surmonte un niveau résistant noté Rct d'une résistivité d'environ 170 Ohm.m et d'une épaisseur de 95 m dont la cote du toit atteint -195 m qui correspond à l'aquifère profond des calcaires cénomano-turonien (Tableaux 1 et 2), ce dernier surmonte un conducteur moyen Cm qui est accordé au Cénomanién.

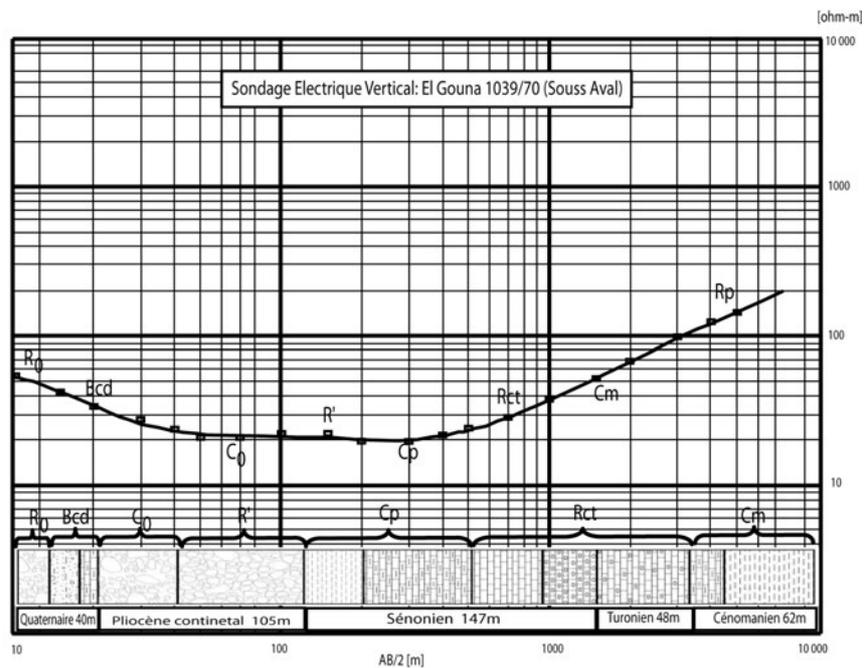


Figure 3 : Exemple d'étalonnage de sondages électriques B'4 sur le forage d'El Gouna dans la plaine de Souss-Massa.

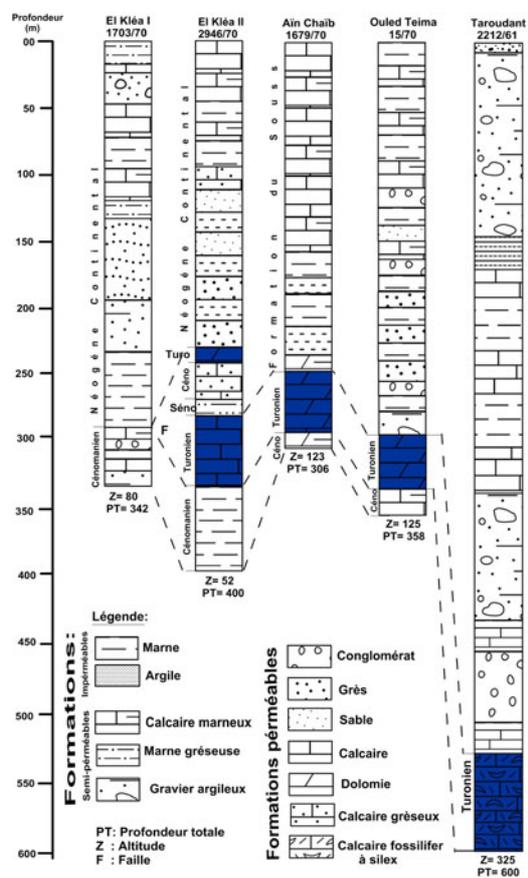


Figure 4 : Coupes lithologiques de quelques forages profonds exécutés dans la plaine du Sous.

Couche n°.		Résistivité (Ohm.m)	Epaisseur (m)	Prof. Toit (m)	Cote de toit (m)
1	R <sub>0</sub>	68.00	06.00	0.00	106.00
2	Bcd }	22.50	31.00	-06.00	100.00
3		26.20	41.00	-37.00	69.00
4		C <sub>0</sub>	11.02	78.00	-78.00
5	R'	78.15	44.00	-156.00	-50.00
6	Cp	06.33	65.00	-200.00	-94.00
7	<b>Rct</b>	<b>170.00</b>	<b>95.00</b>	<b>265.00</b>	<b>-159.00</b>
8	Cm	15.56	100.00	-360.00	-254.00

**Tableau 1 :** Interprétation de sondage électrique d'étalonnage calibré sur le forage d'El Gouna (Z = 106 m).

SEV	Forage	R de Rct (Ohm.m)	Epaisseur de Rct (m)	R de Cm (Ohm.m)
B'4	1039/70	170,00	95,00	15,56
B2	15/70	201,35	105,00	16,72
S15	1782/70	301,95	30,00	38,00
S4	1043/70	190,00	17,50	8,00

**Tableau 2 :** Valeurs de résistivité du niveau résistant Rct et conducteur Cm déduites à partir de l'étalonnage des sondages électriques sur les logs lithologiques.

Les résultats obtenus à partir des sondages électriques étalons ont conduit aux observations suivantes :

- Pour une même formation, la résistivité peut varier largement d'un sondage à un autre ;
- La couverture formée par des conglomérats, des marnes sableuses à galets, des calcaires et des calcaires marneux d'âge Plio-Quaternaire correspond à une alternance de niveaux résistants et conducteurs ;
- Les formations marneuses et les calcaires marneux du Sénonien correspondent au niveau le plus conducteur ;
- Les calcaires blanc-rose à silex et les calcaires et marno-calcaires gris d'âge Cénomano-Turonien correspondent au niveau profond le plus résistant ou au substratum résistant ;
- Les formations marneuses et marno-calcaires d'âge cénomanien correspondent au niveau profond le plus conducteur.

Malgré les variations de résistivité, les résultats obtenus par l'ensemble des sondages électriques ont permis de déterminer les caractéristiques électriques des différentes unités géologiques, leurs épaisseurs, ainsi que la géométrie de l'ensemble de l'aquifère.

## INTERPRETATIONS ET DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats obtenus à partir de la réinterprétation des données géo-électriques ont permis l'établissement de (a) dix coupes géo-électriques (aspect quantitatif, Fig. 5, 6 et 7), (b) la carte des isohypses de toit du substratum résistant attribué au calcaire de Cénomano-Turonien (aspect qualitatif, Fig. 8 et 9) et (c) la carte structurale de la plaine du Souss-Massa (ESSAHLAOUI *et al.*, 2001 ; GOUASMIA *et al.*, 2006).

### Interprétation quantitative

Les coupes géo-électriques réalisées dans la plaine du Souss-Massa (10 coupes) permettent, d'une part de visualiser les relations existantes entre la structure profonde de la plaine et celle des domaines structuraux qui l'encadrent et d'autre part de déterminer la nature des contacts éventuels entre l'aquifère plio-quaternaire et l'aquifère profond des calcaires du Cénomano-Turonien.

### ***Coupes géo-électriques Souss amont I, K, J et H (Fig. 5):***

Ces coupes orientées N-S, NNE-SSO et NNO-SSE montrent un approfondissement des formations depuis les affleurements paléozoïques de l'Anti-Atlas jusqu'aux formations mésozoïques du Haut Atlas.

A l'amont du Souss, près d'Aoulouz la coupe géo-électrique (I), réalisée à partir des sondages électriques d'une longueur de ligne AB/2 varie entre 2000 et 4000 étalonnés par le forage 411/62, ne permet pas de suivre l'allure des formations du Crétacé, et ceci est dû à une très grande épaisseur des formations du Plio-Quaternaire (600 m) et de l'Eocène continental (115 m). Au niveau des Ouled Berhil, la coupe géo-électrique (K) met en évidence le soulèvement du niveau résistant Rct qui est attribué au calcaire de Cénomano-Turonien vers la surface, puis s'enfonce vers le front sud du Haut Atlas avec un gradient moyen à faible.

La coupe géo-électrique (J) montre le plongement des formations paléozoïques (schistes du Cambrien moyen) avec un gradient faible vers le nord et les affleurements du Crétacé inférieur dans la région de Tagdrant. Depuis la rive droite de l'oued Souss jusqu'à Tamaloukt, l'examen de la coupe fait ressortir le niveau résistant attribué au Cénomano-Turonien plongeant régulièrement vers le NNE pour atteindre une profondeur maximale de -300 m au droit du sondage électrique J13 avec une épaisseur de 100 m.

A partir des piémonts de l'Anti-Atlas au Sud jusqu'à la faille F3, la coupe géo-électrique (H) indique le prolongement des formations résistantes attribuées aux schistes de l'Acadien vers le nord, surmontées par des dépôts de la formation du Souss (forage 3504/70). Au niveau de la colline de Sidi Bourja, la coupe met en évidence l'affleurement des schistes de l'Acadien, des marnes vertes du Crétacé inférieur, des marnes du Cénomaniens et enfin de la barre calcaire du Cénomano-Turonien. Au delà de la colline de Sidi Bourja, la coupe montre un enfoncement maximale du niveau résistant Rct, qui peut atteindre une profondeur maximale au droit des sondages électrique H7 et H8 (-300 m) puis remonte relativement au delà du sondage électrique Hb8 jusqu'à la faille F10. Vers le nord, la coupe indique un soulèvement de la barre cénomano-turonienne jusqu'à une profondeur de 300 m au droit du sondage H9.

### ***Coupes géo-électriques Souss moyen A, B et C (Fig. 6):***

Les coupes géo-électriques NO-SE réalisées au moyen Souss, montrent un enfoncement des formations mésozoïques vers le flanc sud du Haut-Atlas. La coupe géo-électrique (A) met en évidence l'affleurement du niveau résistant Rct aux Ouled Bou-Rbia avant de s'enfoncer graduellement vers le nord. Elle montre aussi que les formations du Plio-Quaternaire sont très hétérogènes et que globalement leur épaisseur diminue en allant de la colline des Ouled Bou-Rbia vers les affleurements du Géorgien de l'Anti-Atlas au sud.

La coupe géo-électrique (B) relie les affleurements de l'Anti Atlas au sud et le Haut Atlas au nord au niveau de la zone d'Amskroud en passant par les collines d'El Hafaia, Ouled Teima et la zone d'El Gounna. Elle montre la présence de nombreuses discontinuités électriques F1a, F1b, F2, attribuées à des failles. Au SSE, entre les affleurements de l'Anti Atlas et la faille F2, la coupe montre la présence d'une structure monoclinale moins profonde, dessinée par le toit du substratum résistant Rp. Vers le NNO, au delà de la faille F2, la coupe met en évidence la présence du niveau résistant Rct d'une résistivité comprise entre 130 et 200 Ohm.m, qui se manifestent électriquement sous forme d'une bicouche ascendante dans sa partie sommitale. Ce niveau résistant est attribué à l'ensemble lithologique suivant: conglomérats de la base du Néogène, calcaires du Turonien et calcaires du toit du Cénomaniens (coupe lithologique du forage 15/70, Ouled Teima) et dont le niveau conducteur Cm sous-jacent n'est autre que la partie argileuse du Cénomaniens.

Depuis les collines crétacées d'El Hafaia, on assiste à un plongement régulier de la structure jusqu'au sondage B'14 (rive droite de l'oued Souss) où le toit du résistant Rct atteint une profondeur de 350m. Cette structure remonte au niveau d'El Gounna par les failles F1a et F1b où le toit de Rct atteint une profondeur de 260 m au niveau du forage 1039/70. Au nord de celui-ci, on note la présence d'une zone située entre les sondages électriques B'15 et B'9 où le toit du substratum Rct dessine une structure synclinale centrée sur le sondage électrique B'16. A ce niveau le toit de Rct atteint sa profondeur maximale de - 470 m.

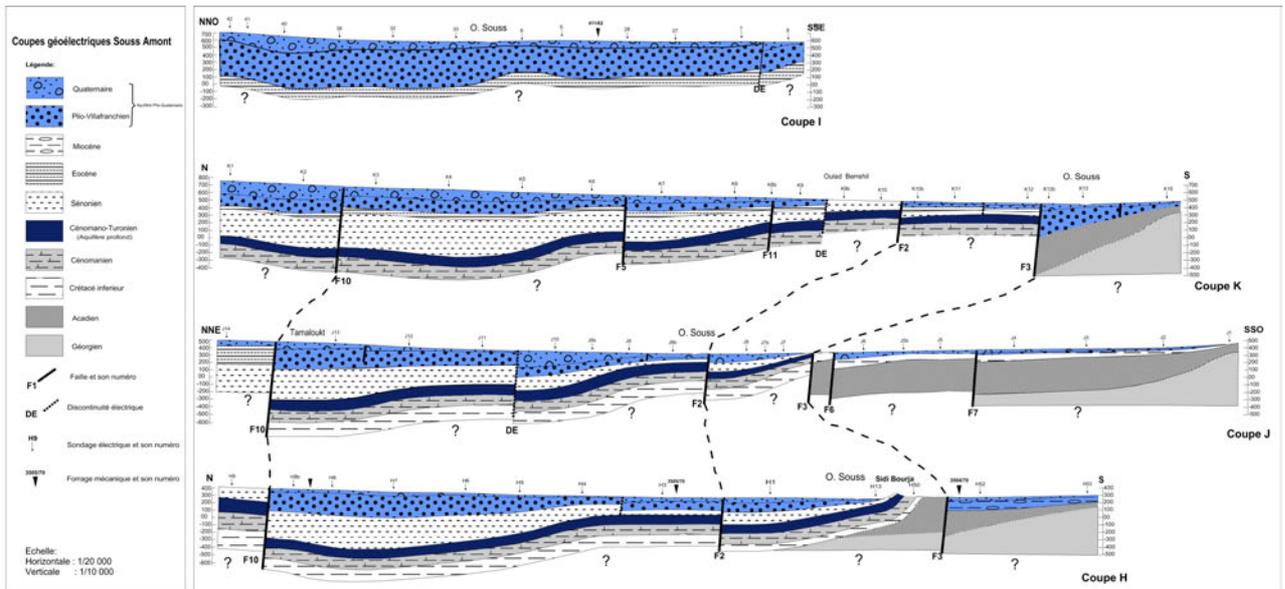


Figure 5 : Coupes géo-électriques réalisées dans le Souss amont (I, K, J et H).

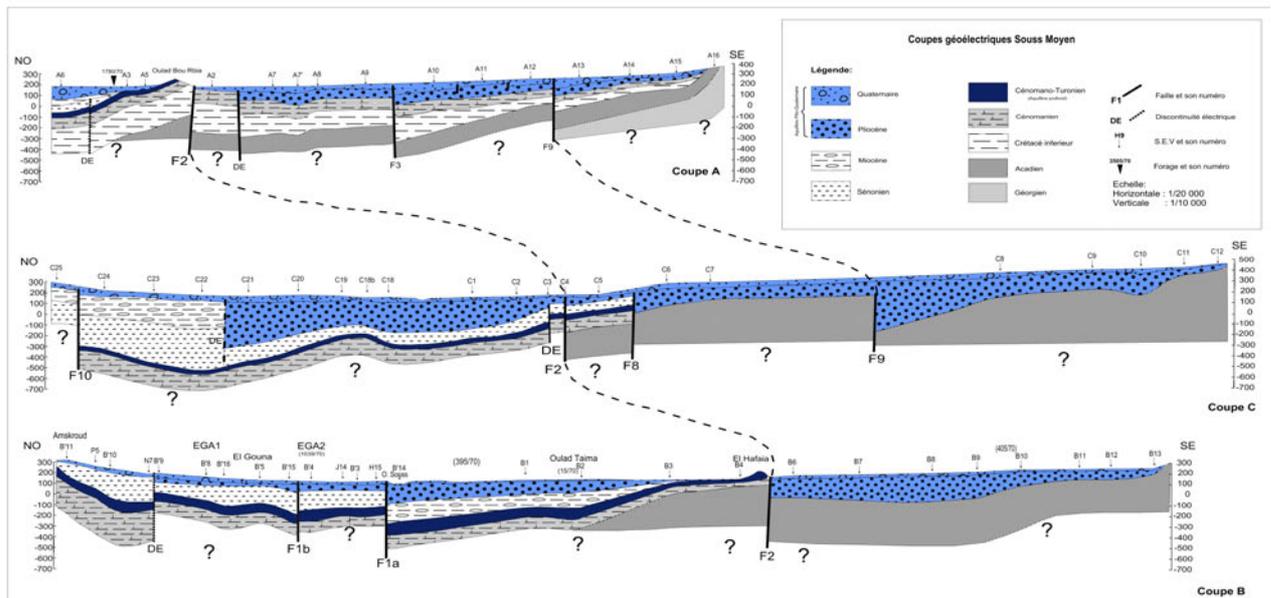


Figure 6 : Coupes géo-électriques réalisées dans le moyen Souss (A, C et B).

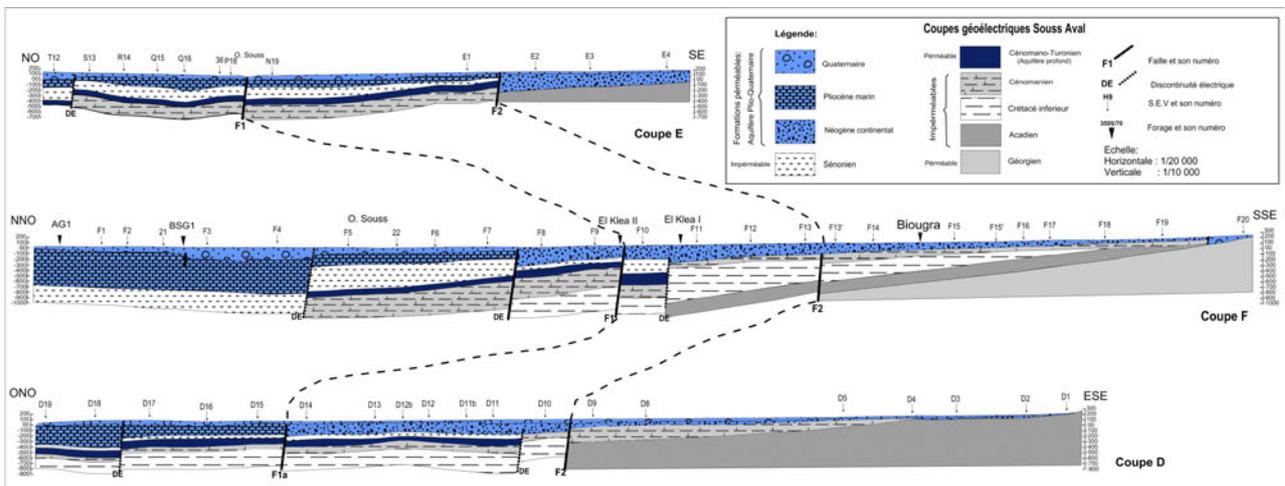


Figure 7 : Coupes géo-électriques réalisées dans le Souss Aval et dans la plaine des Chtouka (E, F et D).

Située entre les coupes A et B, la coupe géo-électrique (C) relie les affleurements paléozoïques de l'Anti-Atlas au sud et crétacés du Haut Atlas au nord. Entre les affleurements de l'Anti-Atlas et la discontinuité F8, cette coupe met en évidence la présence d'une structure monoclinale dessinée par le toit du substratum résistant attribué aux formations paléozoïques de l'Anti Atlas qui plongent vers le NNO avec un gradient moyen. Sa couverture est constituée par les formations du Quaternaire ancien et du Pilo-Villafranchien. A partir de la discontinuité F8, la coupe montre la présence d'une structure synclinale croquée par les formations du Crétacé dont le substratum résistant est attribué à la barre calcaire de Cénomano-Turonien dont le toit atteint une profondeur maximale d'environ 700 m.

### ***Coupes géo-électriques Souss aval E, F et D (Fig. 7):***

Les deux premières coupes (E et F) sont situées à l'aval de l'oued Souss et la troisième au sein de la plaine des Chtouka. La coupe géo-électrique (E), orientée NO-SE, met en évidence deux types de discontinuité électrique. La première F2 est située entre E1 et E2 et constitue ainsi la limite entre une structure monoclinale et une autre synclinale. La première structure (monoclinale) est formée à la base par un substratum résistant attribué aux schistes de l'Acadien et aux calcaires du Géorgien surmontés par le Néogène continental puis par le Quaternaire. En revanche, la structure synclinale est constituée du bas en haut en partant de la discontinuité F2 par les formations conductrices du Cénomaniens, la barre calcaire résistante du Cénomano-Turonien et la formation conductrice du Crétacé supérieur recouverte par le Néogène continental et le Quaternaire. Notons ici que la barre calcaire du Cénomano-Turonien s'enfonce graduellement vers le nord avec un faible pendage, comme le précise les discontinuités électriques F2 et F1.

La coupe géo-électrique (F), faite au niveau du forage 2976/70 au pied des affleurements paléozoïques de l'Anti Atlas, passe par les forages d'El Klea (1703/70 et 2946/70) pour se terminer au niveau du forage F1 situé à Agadir. L'examen de cette coupe fait ressortir la présence de nombreuses discontinuités électriques en réponse à la présence des failles F1, F2. Vers le sud, entre le forage 2946/70 et la faille F2, la coupe (F) indique la présence d'une structure monoclinale dessinée par le toit du substratum résistant attribué aux schistes acadiens et aux calcaires Géorgiens de l'Anti Atlas, qui plonge vers le NNO avec un gradient moyen. Sa couverture n'est autre que les formations du Quaternaire ancien et du Plio-Villafranchien (formation du Souss). Vu la variation importante de la résistivité des différents niveaux géo-électriques, il semble que la partie sommitale du substratum Rp est attribuée aux calcaires Géorgiens au niveau des sondages électriques F19 et F20 et aux schistes Acadiens au niveau des sondages électriques F18 à F13'.

La coupe met en évidence une zone comprise entre les failles F2 et F1a, qui montre la présence d'un conducteur épais (5 Ohm.m – 610 m) bien individualisé sur le diagramme du sondage électrique et qui pourrait correspondre au Cénomaniens argileux et à l'Albien marneux.

La zone comprise entre la faille F1a et F1b est caractérisée par la présence d'une structure en horst dessinée particulièrement par les toits des résistants Rct et Rvc. Le résistant Rct (200 Ohm. m – 120 m) est attribué aux calcaires du Cénomano-Turonien; l'autre résistant Rvc (80 Ohm.m – 300 m) est attribué aux calcaires du Vraconien-Cénomaniens. Ces résistants reposent directement sur le conducteur Ci dont le toit atteint 910 m de profondeur au droit du sondage électrique F8.

La zone comprise entre la faille F1 et la discontinuité électrique D où le résistant Rct se comporte électriquement comme un substratum infiniment résistant qui plonge vers le NNO le toit de cette zone se localise à une profondeur maximale de 760 m au niveau du sondage électrique 23 avec un développement important de sa couverture, en particulier, le niveau conducteur Cs qui atteint une épaisseur d'environ 450 m que l'on peut attribuer aux marnes du Crétacé supérieur.

La zone comprise entre les sondages F4 et F1 (près de la ville d'Agadir) est caractérisée par la présence d'un substratum moins résistant et qui correspond, d'après les coupes lithologiques des forages AG1, BSG1 et 491/70, aux marnes sableuses, conglomérats et calcaires gréseux du Mio-Pliocène.

La coupe géo-électrique (D), orientée ONO-ESE, est située dans la plaine des Chtouka. Elle relie les affleurements paléozoïques de l'Anti-Atlas aux niveaux des dunes sableuses de Tifnit située sur la côte atlantique en passant par El Khmiss n'Ait Aamira. Au sein des affleurements de l'Anti-Atlas, la coupe met en évidence une structure monoclinale dont le substratum résistant est de nature schisteuse d'âge acadien, qui plonge vers l'ONO avec un gradient moyen. Sa couverture est constituée

par les formations conductrices du Cénomanién et du Néogène continental, surmontées par les dépôts hétérogènes du Quaternaire. Vers l'ONO, entre la faille F2 et les dunes côtières de Tifnit, la coupe (E) indique la présence d'un niveau résistant que l'on peut attribuer à la barre calcaire du Cénomano-Turonien. Cette dernière est surmontée par le Néogène continental et le Quaternaire continental (DIJON, 1969) entre la faille F2 et la faille F1a. Au-delà de la faille F1a jusqu'à la plage de Tifnit, la barre calcaire est surmontée par les formations du Pliocène marin et les formations sableuses du Quaternaire.

### Interprétation qualitative

Cette interprétation consiste en l'établissement de la carte structurale du sous sol de la plaine et de la carte des isohypses du toit de substratum résistant du Cénomano-Turonien (Rct). Ces cartes permettent d'avoir une idée sur la géométrie de l'aquifère profond du Souss-Massa (Fig. 8 et 9).

#### Carte structurale

La reconnaissance de la structure profonde de la plaine du Souss-Massa est basée sur la détermination des discontinuités électriques à partir de l'interprétation quantitative des sondages électriques et sur les corrélations faites sur les coupes géo-électriques. Ces discontinuités correspondent probablement à des failles ou à des flexures qui affectent le sous-sol de la plaine, elles se répartissent principalement en trois familles suivant les directions NE-SO, ENE-OSO et N-S. Elles sont représentées respectivement par les discontinuités électriques F1 (F1a et F1b), F2 et F3 et par les discontinuités transversales F5, F6, F8 et F11 (figure 8).

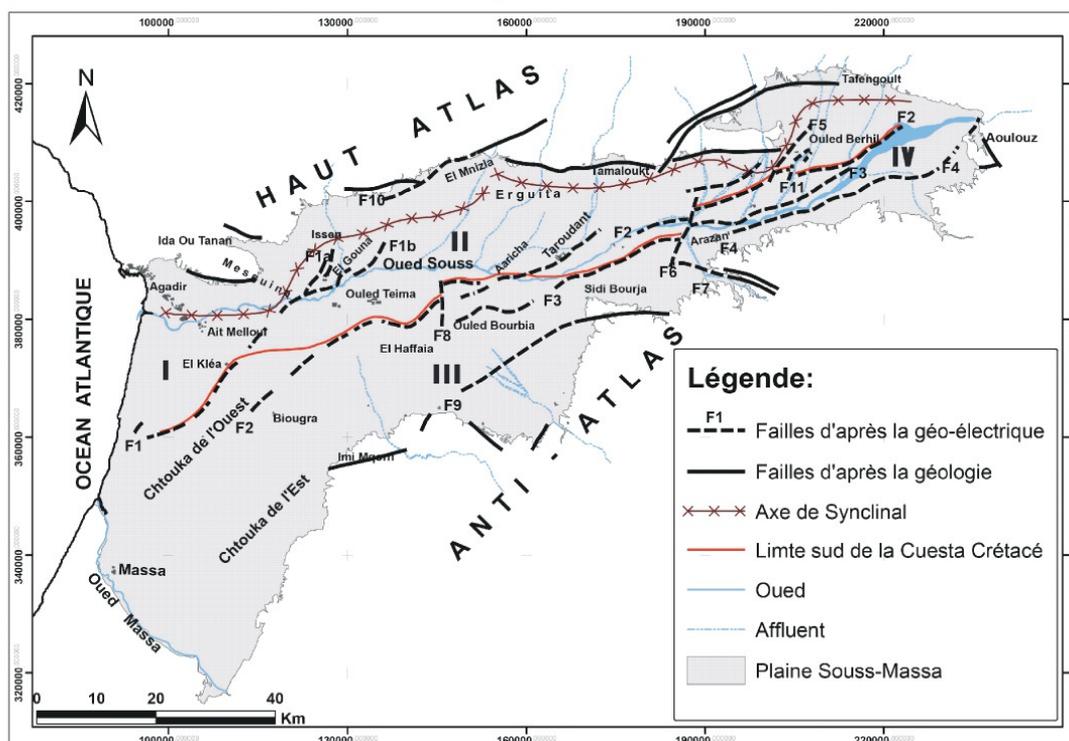


Figure 8 : Carte structurale du complexe aquifère de la plaine de Souss-Massa.

La première famille est représentée par la discontinuité F1 (F1a et F1b) passant par El Kléa et au nord des Ouled Teima au niveau de la région d'El Gouna, de direction NE – SO. Elle correspond à la faille connue dans la région sous le nom de faille d'El Kéa (DIJON, 1969; COMBE & EL HEBIL, 1977) et qui a été initialement décrite comme flexure à pendage Nord-Ouest à partir des observations de surface par AMBROGGI, 1963. Cette faille a été reconnue au niveau des forages pétroliers HB1 et EGA2, son tracé est d'environ 60 km (EL MAAMAR, 1988) et d'après l'analyse des profils sismiques, la faille d'El Kléa (F1) affecte avec un pendage moyen d'environ 50-60° vers le NNO, les formations mésozoïques et leur socle paléozoïque, délimitant ainsi un demi-graben basculé vers le

SSE avec un pendage initial approximatif de 10° (MUSTAPHI, 1997; MUSTAPHI *et al.*, 1997 ; MRIDEKH *et al.*, 2000 ; MRIDEKH *et al.*, 2009). Elle est prolongée vers l'Océan, séparant ainsi la zone côtière du Souss aval de la plaine des Chtouka de l'ouest et du Souss moyen délimitant ainsi le premier compartiment du Souss-Massa.

La deuxième famille de direction ENE-OSO est indiquée, par la discontinuité F2 passant au niveau de Biougra et au sud des affleurements crétacés et par la discontinuité F3 de direction parallèle à F2, apparaît à l'Est de la colline d'Elhaffaia, passant au niveau des affleurements Crétacés de Sidi Bourja et Tagdrant puis rejoint la discontinuité F2 au niveau de la colline crétacée d'El Madida. Cette famille sépare le deuxième et le troisième compartiment, ce dernier est situé au-delà des affleurements crétacés de la plaine du Souss vers l'Anti-Atlas et l'autre est situé au delà des affleurements crétacés vers le Haut Atlas.

La troisième famille est constituée par les discontinuités F5, F6, F8 et F11 de direction presque N-S à NNE-SSO. Les discontinuités F5 et F11 passent entre la colline du Crétacé des Ouled Berhil et Oued Fakhar. La discontinuité F6 est située entre la colline de Tagdrant et le confluent des oueds Talment et Moukmoul en traversant l'oued Souss. La discontinuité F8 est, quant à elle, détectée entre la colline des Ouled Bou Rbia et celle d'El Hafaia.

La corrélation de ces failles, d'une coupe à l'autre, a été réalisée en tenant compte des directions structurales déjà décrites dans le secteur et ses environs par NAIRN *et al.*, 1980, EL MAAMAR, 1988, MUSTAPHI, 1997, MUSTAPHI *et al.*, 1997, MRIDEKH *et al.*, 2000 FRIZON DE LAMOTTE *et al.*, 2000, SEBRIER *et al.*, 2006, FRIZON DE LAMOTTE *et al.*, 2008 ; MRIDEKH *et al.*, 2009.

Le travail de calage et de redressement des profils géo-électriques nous a permis l'élaboration de la carte structurale (figure 8). Cette dernière, compile toutes les failles, les discontinuités électriques et les failles décrites par les études antérieures en plus des limites de l'extension du Crétacé vers le sud. Il ressort de cette étude que l'aquifère profond est un modèle compartimenté dont la structure(en blocs soulevés et affaissés) est engendrée par des épisodes tectoniques très cassants favorisés par une succession de deux phases tectoniques bien distinctes.

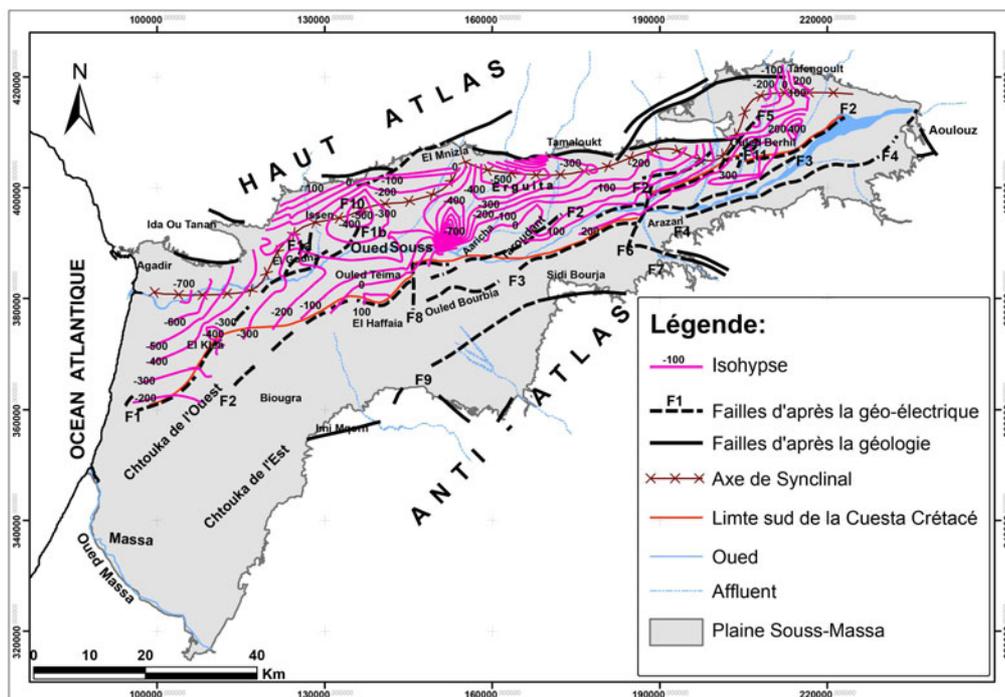


Figure 9 : Carte des isohypses du toit de l'aquifère Cénomano-Turonien

La première activité tectonique, extensive, serait liée à l'ouverture de l'Atlantique central qui est à l'origine des failles normales et du détachement profond au niveau de substratum. La deuxième est une phase d'inversion tectonique liée à la collision de la plaque africaine et de la plaque européenne. Celle-ci est responsable du rejeu des failles normales en failles inverses (MUSTAPHI *et al.*, 1997).

Par conséquent, ces trois familles de failles ont divisé la plaine du Souss-Massa en quatre compartiments. Le premier compartiment (I) correspond à une zone effondrée située entre le passage de la faille d'El Kléa (F1) et la côte atlantique à l'ouest formant ainsi l'aquifère côtier du Souss. Le deuxième compartiment (II) correspond à une dépression, limitée au sud, par les collines du Crétacé au sein de la plaine et au nord par les piémonts sud-atlasique. Le troisième compartiment (III) est situé entre les affleurements crétacés du centre de la plaine du Souss et les affleurements paléozoïques de l'Anti-Atlas. Le quatrième compartiment (IV) est situé au-delà de la faille F6 vers la région d'Aoulouz à l'amont (Fig. 8).

### ***Carte des isohypses du toit de substratum résistant***

Cette carte de synthèse a été réalisée en utilisant les logiciels Surfer 10 et ArcGis 9.3, les cotes du toit de substratum résistant (Rct) sont interpolées spatialement en utilisant la méthode du krigéage, reconnue comme très pertinente en géosciences (KANEVSKI & MAIGNAN, 2004). Elle met en évidence le comportement du substratum résistant attribué à la barre calcaire du Cénomano-Turonien, qui représente l'aquifère profond du Souss-Massa. D'une manière générale la carte des isohypses fait ressortir que le substratum résistant du Cénomano-Turonien (Rct) plonge depuis les affleurements turoniens au niveau des buttes témoins du Crétacé jusqu'aux affleurements du Haut Atlas vers le nord. Elle est limitée au sud par la faille F1 au niveau des coupes D et F, la faille F2 au niveau des coupes E et B et par la faille F3 au niveau des coupes C, A, H, J, K et I.

La première cuesta turonienne qui épouse les failles F1 et F2 suit les affleurements Crétacés d'El Hafaïa, ceux de l'Ouled Bou Rbia et ceux de l'Ouled Berrehil-Madida passant par Taroudant. La deuxième cuesta turonienne qui épouse la faille F3 se dresse au sud de l'Ouled Bou Rbia passant par les collines crétacées de Sidi Bourja et les affleurements du Crétacé inférieur de Tagdrant vers l'est. Son tracé correspond sensiblement au cours de l'oued Souss (DIJON, 1969).

La carte de la figure 9 montre l'existence d'une zone effondrée centrée à Erguita et à Agadir où le toit du niveau Rct atteint une cote maximale de -1000 m (forage d'Erguita) et de -743 m (sondage électrique F11) au niveau du golfe subsident d'Agadir. Son axe épousant les affleurements du Haut Atlas, est de direction sensiblement OSO-ENE, qui débute depuis l'embouchure de l'oued Souss (sud d'Agadir) passe par la fosse d'Erguita, et se poursuit jusqu'à Aoulouz. Nous remarquons ainsi la présence d'un fort gradient des isohypses entre El Mnzila et la fosse d'Erguita; il semble que le flanc ouest de cette fosse soit affecté par une faille qui pourrait être le prolongement de son homologue F1a vers le NE. De même, cette fosse est bordée au Nord par les affleurements du Haut Atlas.

L'existence d'une dépression bordée au SE par la faille F8 et au NO par la faille F1a. Cette fosse semble rejoindre la gouttière Sud Atlasique située au pied du Haut Atlas et est limitée par deux zones hautes qui débute depuis les affleurements crétacés d'El Hafaïa et ceux de l'Ouled Bourbia jusqu'à la faille F1a.

Une anomalie située à El Gounna entre les deux failles F1a et F1b, avec un axe de direction NE-SO, la cote du niveau résistant Rct est de -159 m (forage 1039/70, d'El Gounna).

On observe un soulèvement du résistant Rct au niveau de la région d'El Kléa dont le toit atteint environ une profondeur de 200 m.

En général, la carte des isohypses du toit de substratum calcaire du Cénomano-Turonien dessine une structure synclinale dont l'axe est situé à la rive droite de l'oued Souss et la limite sud située au niveau des affleurements crétacés à la rive gauche. Les profondeurs maximales du toit du substratum calcaire variant entre -300 et -700 m sont situées au niveau de l'axe du synclinal. Au nord et au sud de cette structure, le toit du résistant est situé à une profondeur qui varie entre 0 et 200 m (Fig. 9). L'aquifère turonien est artésien dans la zone des profondeurs maximales.

## **CONSEQUENCES HYDROGEOLOGIQUES**

La géophysique est l'outil d'investigation complémentaire profond de l'hydrogéologie, auquel elle apporte des données indispensables sur la géométrie du réservoir possible, sur sa nature lithologique ainsi que sur l'évolution de ces caractéristiques hydrodynamiques. Les résultats de cette analyse hydro-structurale montrent la présence de failles majeures et/ou de discontinuités électriques qui découpent la plaine du Souss en quatre compartiments (I, II, III, et IV). L'épaississement des séries

aquifères dans certaines zones (plaine alluviale de l'oued Souss en particulier) explique l'importance du réservoir et par conséquent la durabilité de la ressource malgré la surexploitation et les aléas de la sécheresse dans la région ces dernières décennies (BOUCHAOU *et al.*, 2012).

Sur le plan recharge (aspect quantitatif), l'écoulement global de la nappe du Souss se fait de l'est vers l'ouest (exutoire de la nappe). La superposition des cartes structurale et piézométrique (Fig. 10) montre que l'écoulement épouse majoritairement la direction des structures majeures définies (failles, F1, F2 et F3, l'axe synclinal principal et la plaine alluviale de l'oued Souss). Cet écoulement est hétérogène et limite parfois la dispersion latérale notamment à partir de l'oued Souss vers la partie sud de la plaine (vers le compartiment III) qui présente le maximum de baisse de la nappe (40 m par rapport au niveau initial).

Les différentes failles jouent un rôle dans le drainage horizontal et vertical. Les paramètres hydrodynamique (transmissivité et piézométrie) font apparaître une hétérogénéité spatiale où se distingue presque les mêmes secteurs définis par l'analyse structurale. L'alimentation majoritaire mise en évidence à partir de l'Atlas est en accord avec la direction des failles reliant l'Atlas et la plaine. Les échanges de drainage ascendant ou descendant sont favorisés par les failles verticales entre les aquifères profonds et superficiels. Les sources d'Elgouna au niveau de la plaine en faveur des failles F1a et F1b. La recharge artificielle de la nappe lancée par l'ABHSMMD depuis 1991 avait pour but de recharger la nappe du Souss en général et en particulier au niveau d'Elguerlane (compartiment IV) où elle observe des baisses importantes atteignant 40 m. Les essais montrent que le maximum (60 à 80%) de débit lâché est infiltré au cours des 30 premiers kilomètres à l'aval d'Aoulouz. Ce taux d'infiltration est favorisé probablement d'un côté par la faille F6 qui joue un rôle d'une barrière souterraine limitant ainsi la recharge de la nappe vers le centre de la plaine à partir des eaux du barrage d'Aoulouz (Fig. 8 et 11) et d'un autre côté par une forte perméabilité des formations quaternaires montrant une épaisseur de 100 à 200 m entre Ouled Berhil et Aoulouz. Les failles F2 et F3 coïncidant aussi avec les crêtes Crétacées peuvent limiter la diffusion des écoulements latéraux vers le sud notamment vers la zone d'Elguerlane. L'écoulement de recharge se fait majoritairement le long de la plaine alluviale qui épouse grosso modo le compartiment délimité par les failles F1 et F2. Cette recharge le long des affluents provenant de l'Atlas et en particulier l'oued Souss confirme bien les résultats de la distribution des valeurs des isotopes stables ( $^{18}\text{O}$ ) montrant des valeurs appauvries en  $^{18}\text{O}$  caractérisant les hautes altitudes. Ce flux suit globalement le couloir du compartiment II (Fig. 11).

Le compartimentage hydraulique semble jouer aussi un rôle sur la distribution des flux d'eaux minéralisées. La répartition spatiale de la minéralisation (TDS) montre une certaine superposition de la structure, des eaux à forte et à faible minéralisation et entre des zones à forte et à faible transmissivité (Fig.12 et 13). La carte de la répartition de la minéralisation au sein de la nappe Plio-Quaternaire montre trois anomalies, la première est détectée à la nappe côtière du Souss, elle est liée à l'intrusion marine (HSISSOU *et al.*, 1997 ;TAGMA, 2011), la deuxième rencontrée dans le secteur d'Issen résulte principalement de l'influence des terrains Triasiques salifères du Haut Atlas (BOUTALEB *et al.*, 2000).

La distribution spatiale de la minéralisation semble être contrôlée par endroits par la structure du réservoir. La faille F1 paraît comme une limite du panache de salinité provenant de l'Issen. Le compartiment II qui est le siège de la circulation majeure de l'aquifère semble drainer les eaux douces de l'Atlas et permet une certaine dilution vers les zones à l'aval. Les failles E-O peuvent favoriser cet apport d'eau douce des zones de recharge au niveau de l'Atlas.

## CONCLUSIONS

Cette étude montre l'intérêt que peut présenter les données de la géophysique électrique associées aux données de forages pour la reconstitution géométrique et structurale des aquifères de Souss-Massa. Ces données ont, en effet, permis d'établir un modèle géologique représenté par quatre compartiments :

- (I) correspond à une zone effondrée située entre le passage de la faille d'El Kléa (F1) et l'océan Atlantique ;
- (II) correspond à une dépression bordée au sud par les collines crétacées et au nord par les piémonts atlasiques ;

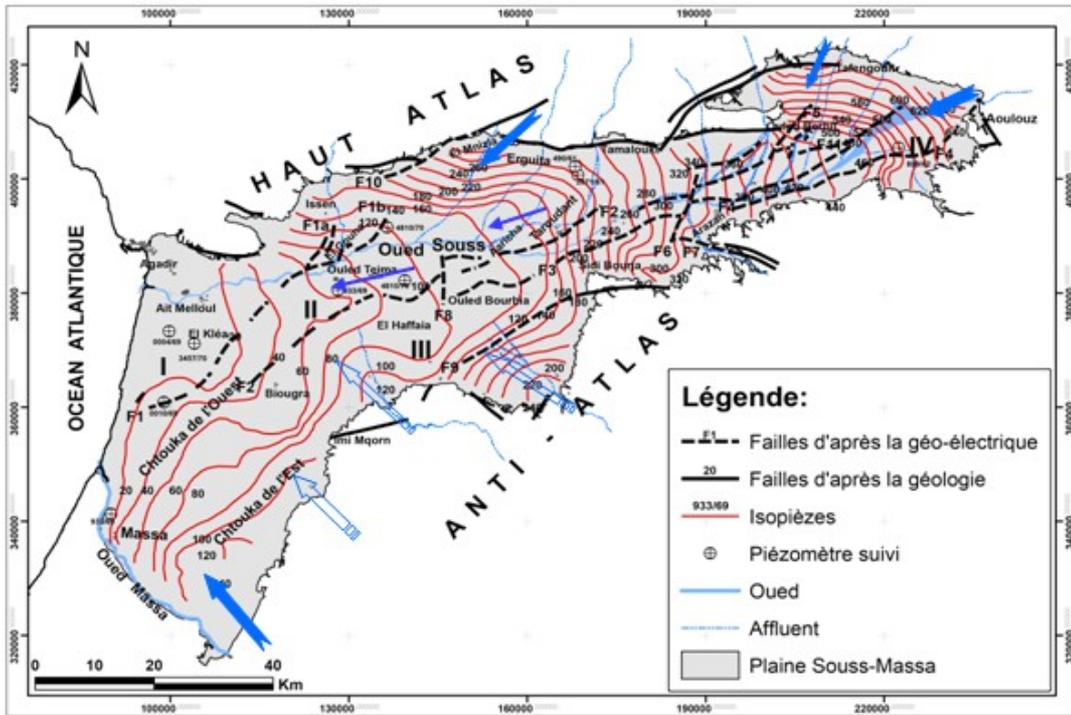


Figure 10 : Compilation de la carte structurale avec la carte piézométrique de l'aquifère superficiel 2003

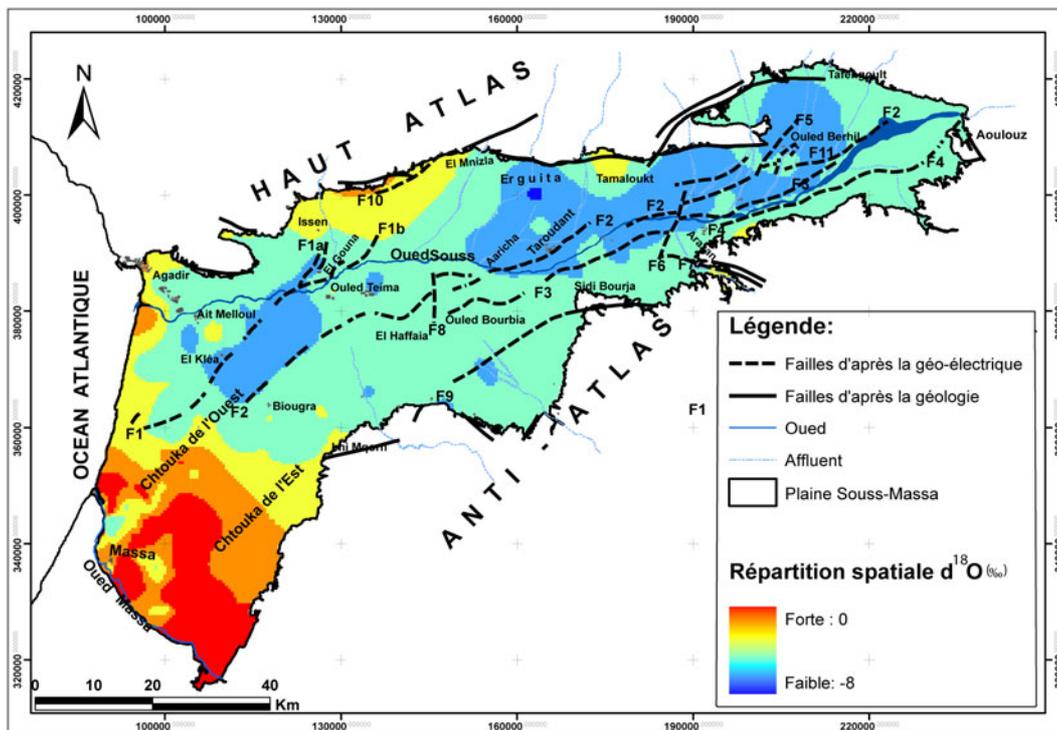


Figure 11 : Carte de répartition spatiale de l'oxygène-18

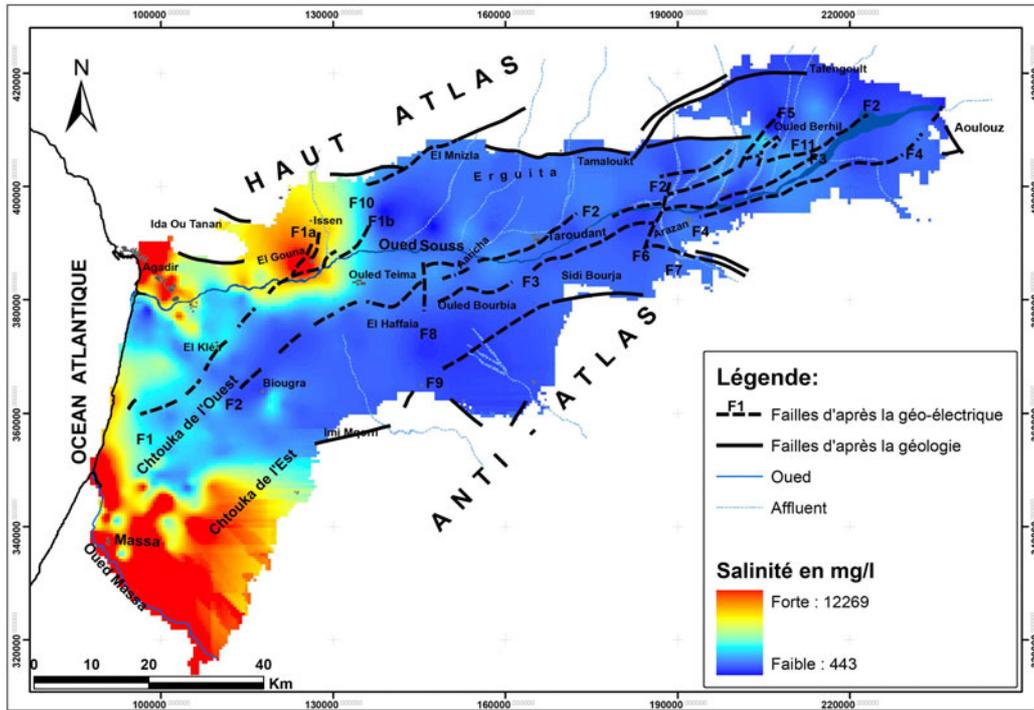


Figure 12 : Carte de salinité des eaux souterraines de l'aquifère superficiel

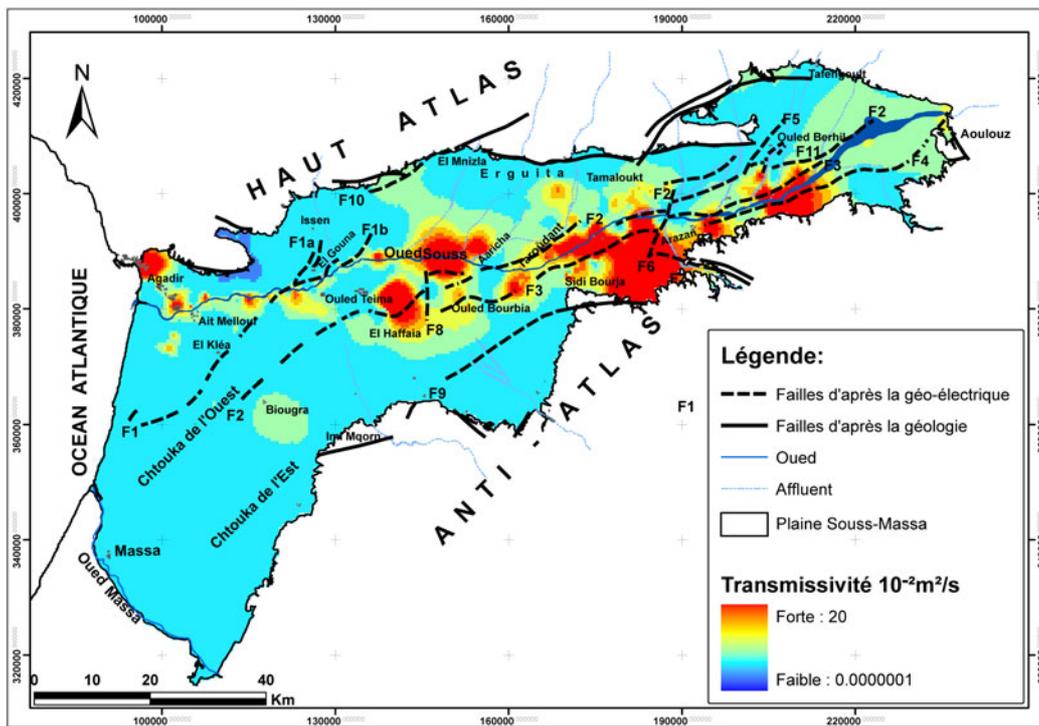


Figure 13 : Carte de la répartition spatiale de la transmissivité de l'aquifère superficiel

(III) est situé entre les affleurements crétacés du centre de la plaine du Souss et les affleurements paléozoïques de l'Anti-Atlas ;

(IV) est situé au-delà de la faille F6 vers la région d'Aoulouz à l'amont (figure 8).

Cette étude a, en outre, permis d'obtenir d'importants renseignements: (a) sur la structure globale lithologique complexe du sous-sol de la plaine, (b) de définir les différents horizons électriques et leurs correspondances en termes géologiques, (c) d'indiquer les principales discontinuités électriques, (d) de tracer des coupes géo-électriques qui montrent que la plaine du Souss présente une structure synclinoïdale faillée, (e) d'élaborer la carte structurale du complexe aquifère du Souss-Massa et enfin (f) de dresser la carte des isohypses du toit du substratum résistant attribué à la barre calcaire du Cénomano-Turonien, qui présente un grand intérêt qualitatif pouvant assister à mieux connaître la structure de cet aquifère profond pour aider les responsables à prendre des bonnes décisions quant aux positionnements des forages de reconnaissance ou d'exploitation.

Du point de vue hydrogéologique, la géométrie, la structuration globale de la plaine et la nature lithologique des formations ont une influence plus au moins directe sur la chimie, la recharge et aussi sur les écoulements verticaux et latéraux des eaux souterraines de l'aquifère du Souss-Massa. La nappe profonde au niveau de la barre calcaire fissuré du Cénomano-Turonien à potentiel hydrique non négligeable est suffisamment identifiée. Ce réservoir constitue une alternative pour répondre en partie aux besoins en eau potable et agricole dans la région. Ces résultats sont d'un intérêt considérable sur le plan scientifique en permettant de confirmer les résultats des traceurs chimiques et isotopiques. Sur le plan socio-économique, les éclaircissements apportés sur le compartimentage de l'aquifère du Souss-Massa peuvent contribuer à l'amélioration des modèles de simulation entrepris par le département de l'Hydraulique en vue d'une bonne gestion de la ressource en eau dans cette région soumise à déficit hydrique récurrent.

#### REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'Agence du Bassin Hydraulique Souss-Massa-Draa (ABHSMD) qui nous a fait part de toute la base de données nécessaire pour la réalisation de cette étude.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SOUSS MASSA DRAA (ABHSMD), 2003: Etude de la stratégie de gestion des ressources en eau dans le bassin du Souss-Massa. Rapport inédit
- AHKOUK, S. ; HSISSOU, Y. ; BOUCHAOU, L. ; KRIMISSA, M. & MANIA, J. ; 2003. Impact des fertilisants agricoles et du mode d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines (cas de la nappe libre des Chtouka, bassin du Souss-Massa, Maroc. *Africa Geoscience Review*, 9: 355-364.
- AIT HSSAINE, A. & BRIDGLAND, D., 2009. Pliocene-Quaternary fluvial and eolian records in the Souss Basin, southwest Morocco: A geomorphological model. *Global and Planetary Change*, 68: 288-296.
- AMBROGGI, R., 1963. Etude géologique du versant méridional du Haut Atlas Occidental et de la plaine du Souss. *Notes et Mémoires du service géologique du Maroc*, 16, (143) : 7-16.
- ASFAHANI, 2007. Geoelectrical investigation for characterizing the hydrogeological conditions in semi-arid region in Khanasser valley, Syria. *Journal of Arid Environments*, 68 : 31-52.
- BOUCHAOU, L. ; TAGMA, T. ; BOUTALEB, S. ; HSSAISOUNE, M. & EL MORJANI, Z., 2012. Climate change and its impacts on groundwater resources in Morocco: the case of the Souss- Massa basin. In: *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations. International Association of Hydrogeologists*, 27:129-144 CRC Press - 414 P.
- BOUCHAOU, L.; MICHELOT, J.L.; VENGOSH, A.; HSISSOU, Y.; QURTOBI, M; GAYE, C.B.; BULLEN, T.D. & ZUPPI, G.M., 2008. Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco. *Journal of Hydrology*. 352 : 267-287.
- BOURAGBA, L. ; MUDRY, J. ; BOUCHAOU, L. ; HSISSOU, Y. ; KRIMISSA, M. ; TAGMA, T. & MICHELOT, J.L., 2011. Isotopes and groundwater management strategies under semi-arid area: Case of the Souss upstream basin (Morocco). *Applied Radiation and Isotopes*, 69 : 108-1093.
- BOUTALEB, S. ; BOUCHAOU, L. ; MUDRY, J. ; HSISSOU, Y. & CHAUVE, P., 2000. Effects of lithology on quality of water resources. The case of oued Issen (Western Upper Atlas, Morocco). *Hydrogeology Journal*, 8 : 230-238.
- COMBE, M. & EL HEBIL, A., 1977. Vallée du Souss, in *Ressources en eau du Maroc*, tome 3. Domaines atlasique et sud atlasique. *Notes et Mémoires du Service Géologique, Maroc*, 231 : 169-201.
- DIJON, R., 1969. Etude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau dans la vallée du Souss. *Notes et Mémoires Service Géologique, Maroc*, 299 pp.

- DINDANE, K. ; BOUCHAOU, L. ; HSISSOU, Y. & KRIMISSA, M., 2003. Groundwater in the Souss upstream basin, south-western Morocco: evidences to its chemical evolution and origin. *J. Afr. Earth Sci.*, 36 : 315-327.
- DINDANE, K., 2005. Apports des techniques hydrogéochimiques et isotopiques à la compréhension des systèmes aquifères des régions arides et semi arides : application à la nappe du Souss amont (Sud-Ouest du Maroc) Thèse de doctorat national. Univ. Ibn Zohr, Fac. Sci. Agadir, 174p.
- EL MAAMAR, 1988. Etude tectonique et microtectonique dans la bordure sud du Haut Atlas occidental région d'Agadir - Maroc. Thèse de 3ème cycle 97p. Université de Montpellier, France.
- ESSAHLAOU, A. ; SAHBI, H. ; BAHIL. & EL-YAMINE, N., 2001. Reconnaissance de la structure géologique du bassin de Saïis occidental, Maroc, par sondages électriques, *J. Afr. Earth Sci.*, 32, (4) : 777-789
- ESSAHLAOU, A. & EL OUALI, A., 2003. Détermination de la structure géologique de la partie Sud de la plaine du Saïss (bassin de Meknès-Fès, Maroc) par la méthode géo-électrique. *Bull Eng. Geol. Env.*, 62 : 155–166
- FRIZON DE LAMOTTE, D. ; SAINT BÉZAR, B. ; BRACÈNE, R. & MERCIER, E., 2000. The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics*, 19 : 740–761.
- FRIZON DE LAMOTTE, D. ; LETURMY, P. ; MISSENARD, Y ; KHOMSI, S. ; RUIZ, G. ; SADDIQUI, O. ; GUILLOCHEAU, F. & MICHARD, A., 2008. Mesozoic and Cenozoic vertical movements in the Atlas system (Algeria, Morocco, Tunisia): An overview. *Tectonophysics*, 475 : 9–28
- GOUASMIA, M. ; GASMI, M. ; MHAMDI, A. ; BOURI, S. & BEN DHIA, H. ; 2006. Prospection géo-électrique pour l'étude de l'aquifère thermal des calcaires récifaux, Hmeïma–Boujabeur (Centre ouest de la Tunisie). *C. R. Geoscience*, 338 : 1219–1227
- GUELLALA, R. ; HEDI INOUBLI, M. & AMRI, F., 2009. Nouveaux éléments sur la structure de l'aquifère superficiel de Ghardimaou (Tunisie): Contribution de la géophysique électrique. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 5 : 974-983.
- HSISSOU, Y. ; MUDRY, J. ; MANIA, J. ; BOUCHAOU, L. & CHAOUVE, P., 1997. Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. Hydrochemistry (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997) IAHS Publ.no. 244,
- HSISSOU, Y., 1999. Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride : cas de la plaine du Souss (Maroc), Thèse d'état, Univ. Ibn Zohr, Fac. Sci. Agadir, 226p.
- HSISSOU, Y. ; MUDRY, J. ; BOUCHAOU, L. ; CHAOUVE, P. & MANIA, J., 2002. Use of chemical tracy to study acquisition modality of mineralization and behaviour of unconfined groundwater under semi-arid climate: the case study of the Souss plain (Morocco). *Environmental Geology*, 42: 672-680.
- KANEVSKI, M. & MAIGNAN, M., 2004. Analysis and modelling of spatial environmental data. EPFL Press, Lausanne, 327p.
- KRIMISSA, S. ; MICHELOT, J.L. ; BOUCHAOU, L. ; MUDRY, J. & HSISSOU, Y., 2004. Sur l'origine par altération du substratum schisteux de la minéralisation des eaux d'une nappe côtière sous climat semi-aride (Chtouka- Massa, Maroc). *C. R. Geosci.*, 336 : 1363-1369.
- MISSENARD, Y., 2006. Le relief des atlas marocains : contribution des processus asthénosphériques et du raccourcissement crustal, aspects chronologiques. Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise Cedex France, 236p.
- MISSENARD, Y.; TAKI, Z.; FRIZON DE LAMOTTE, D.; BENAMMI, M.; HAFID, M.; LETURMY, P. & SÉBRIER, M., 2007. Tectonic styles in the Marrakesh High Atlas (Morocco): The role of heritage and mechanical stratigraphy *Journal of African Earth Sciences*, 48 : 247–266.
- MRIDEKH, A.; MEDINA, F.; MHAMMDI, N.; SAMAKA, F. & BOUATMANI, R., 2009. Structure of the Kasbah fold zone (Agadir bay, Morocco). Implications on the chronology of the recent tectonics of the western High Atlas and on the seismic hazard of the Agadir area. *Estudios Geológicos*, 65, (2) : 121-132
- MRIDEKH, A.; TOTO, E.; HAFID, M. & EL OUATAOUI, A., 2000. Structure sismique de la plate-forme Atlantique au large d'Agadir (Maroc sud-occidental). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes* 331 : 387–392
- MUSTAPHI, H., 1997. Apport des données de subsurface (forage et profils sismiques) et de la modélisation à l'étude de l'évolution du bassin du Souss du Trias à l'actuel. Thèse de 3ème Cycle, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat, 284 pp.
- MUSTAPHI, H.; MEDINA, F.; JABOUR, H. & HOEPFFNER, C., 1997. Le bassin du Souss (Zone de faille du Tizi n'Test, Haut Atlas occidental, Maroc) : Résultat d'une inversion tectonique contrôlée par une faille de détachement profonde. *J. Afr. Earth Sci.*, 24 : 153–168.
- NAIRN, A. E. M. ; NOLTIMIER, H. C. & NAIRN, B., 1980. Surface magnetic survey of the Souss basin, southwestern Morocco. Evaluation of the tectonic role postulated for the Agadir and Tarfaya fault zones and the South Atlas flexure. *Tectonophysics*, 64 : 235-248.
- OUTTANI, F., 1996. Cinématique, modélisation et bilan énergétique des plis de rampe. Approche théorique et application à deux régions du front sud-atlasique, thèse, Université de Cergy-Pontoise, 1996, 203 p.
- SAIDI, M.E., 1995. Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss. (Maroc). Thèse. Doct. Univ. Paris IV, 210 p.

- SEBRIER, M.; SIAME, L.; ZOUINE, E. M.; WINTER, T.; MISSENARD, Y. & LETURMY, P., 2006. Active tectonics in the Moroccan High Atlas. *Geodynamics .C. R. Geoscience*, 338 : 65–79
- TAGMA, T. ; HSISSOU, Y. ; BOUCHAOU, L. ; BOURAGBA, L. ; & BOUTALEB, S., 2009. Groundwater nitrate pollution in Souss-Massa basin south-west Morocco. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 310: 301-309.
- TAGMA, T., 2011. Ressources en eau souterraine de l'aquifère du souss-massa : étude de la qualité et de la vulnérabilité. Thèse de doctorat national. Univ. Ibn Zohr, Fac. Sci. Agadir, 120p.
- TOTO, EL.; KERROURI, C.; ZOUHRI, L.; EL BASRI, M.; IBENBRAHIM, A.; HAFID, M; & BENAMMI, M., 2008. Geoelectrical exploration for groundwater in Al Maha Forest, Ain Jouhra, Morocco. *Hydrol. Process.*, 22 : 1675–1686.
- ZOUHRI, L. ; GORINI, C. ; MANIA, J. ; DEFFONTAINES, B. & ZEROUALI, A., 2004. Spatial distribution of resistivity in the hydrogeological systems, and identification of the catchment area in the Rharb basin, Morocco. *Hydrol. Sci. J.*, 49, (3) : 387–398.

