



## **APPROCHE MULTICRITERE POUR L'ETUDE DE LA GENESE DES NAPPES D'EAUX SALEES, JEFFARA NORD (S-E TUNISIE)**

### **A MULTICRITERIA APPROACH TO STUDY GENESIS OF SALTED GROUNDWATER, NORTHERN JEFFARA (SOUTH-EASTERN TUNISIA)**

***BEN ALAYA M.<sup>1</sup>, KHOUNI R.<sup>2</sup>, ZEMNI T.<sup>3</sup>, KHMERI S.<sup>3</sup>, ZARGOUNI F.<sup>3</sup>***

<sup>1</sup> Laboratoire des Matériaux Utiles, Institut National de Recherche et d'Analyse  
Physico-Chimique, Pôle Technologique Sidi Thabet, Tunisie

<sup>2</sup> Primoil, Centre urbain Nord, immeuble PROMED BOUILDING, Etage 7 bloc B-1

<sup>3</sup> Université Tunis El Manar, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis,  
2092 Tunis, Tunisie

*benalaya.mohsen@gmail.com*

### **RESUME**

Des données de forages hydrauliques et géophysiques ont été utilisées, conjointement à des analyses géochimiques, pour esquisser un modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère de la Jeffara nord (Tunisie SE), largement influencé par la tectonique. L'étude des données de subsurface a permis de montrer que le passage d'un domaine de plate-forme saharienne stable au domaine atlasique a été marqué par de nombreux accidents, qui ont affecté les formations du côté des sebkhas. C'est à travers les dysharmonies tectoniques et les niveaux carbonatés fortement diaclasés que s'effectue probablement la contamination des eaux souterraines, respectivement, par l'ascension d'eau salée profonde et l'empiétement des saumures sous les sebkhas. En effet, le mélange entre eau douce/eau salée est fortement modifié par des interactions géochimiques: échanges de bases et phénomènes de précipitations/dissolution.

**Mots clefs :** Aquifère multicouche ; tectonique ; hydrochimie ; Tunisie SE

## **ABSTRACT**

A multi-disciplinary study comprising boreholes, geophysical and geochemical analyses are used to outline a conceptual hydrogeochemical model of northern Jeffara groundwater, largely influenced by tectonic. The study of subsurface data demonstrated that the passage of Saharian stable platform to Atlas domain is marked by fracturation affecting several geological formations near sebkhas. Indeed, contamination of groundwater is probably resulting from rise of deep salt water through tectonic disharmony and saltwater intrusion from the sebkhas by means of fractured carbonate formation. Moreover, the groundwaters quality is characterized by geochemical interactions: cationic exchange and the precipitation/dissolution process of minerals in the aquifer formations.

**Keywords:** multi-layered aquifer; tectonic; hydrochemistry; south-eastern Tunisia

## **INTRODUCTION**

La partie septentrionale du bassin de la Jeffara est représenté par le bassin de Gabès Nord-est ses alentours (Tunisie SE) (Figure 1), qui est le siège de plusieurs opérations de pompage d'eau destinée à l'alimentation en eau potable, ainsi qu'aux secteurs industriels et agricoles vu la rareté des eaux de surface. Parallèlement à cette forte sollicitation, le système aquifère multicouche de la Jeffara de Gabès nord et ses alentours est exposé à une pollution saline. Ce système aquifère est largement influencé par les caractéristiques structurales locales (Ben Alaya et al. 2014a & 2014b).

La présente étude a pour objectif d'examiner l'influence des structures profondes sur la structuration de ce système aquifère et sur la salinité de ses ressources en eaux. Dans ce but, nous avons eu recours à une approche multidisciplinaire qui regroupe plusieurs méthodes, directes et indirectes: (1) l'observation sur le terrain, (2) l'analyse des séquences lithologiques de forages hydrauliques et pétroliers, (3) l'interprétation des données sismiques (pétrolière et haute résolution) qui permettent d'affiner la configuration géométrique des réservoirs souterrains de ce bassin, et (4) l'analyse des données hydrogéochimiques.

Ce travail s'est poursuivi dans le secteur de Gabès Nord et ses alentours, afin de trouver des guides méthodologiques et de les utiliser ensuite dans d'autres

secteurs du bassin de la Jeffara. Ces guides permettent de proposer une orientation des prospections de la ressource en eau dans les zones arides.

## CADRE D'ETUDE

La zone d'étude concerne le bassin de Gabès Nord-est ses alentours dans sa partie côtière et non côtière. Elle est limitée par deux grands domaines (1) les derniers plis atlasiques de direction Sud-ouest-Nord-est, l'anticlinal de Zemlet El Beïda au Nord et la mégastructure anticlinale de Chott El Fejej à l'Ouest, (2) la plate-forme saharienne au Sud et (3) la plaine effondrée de la Jeffara (Bouaziz, 1995) (Figure 2).

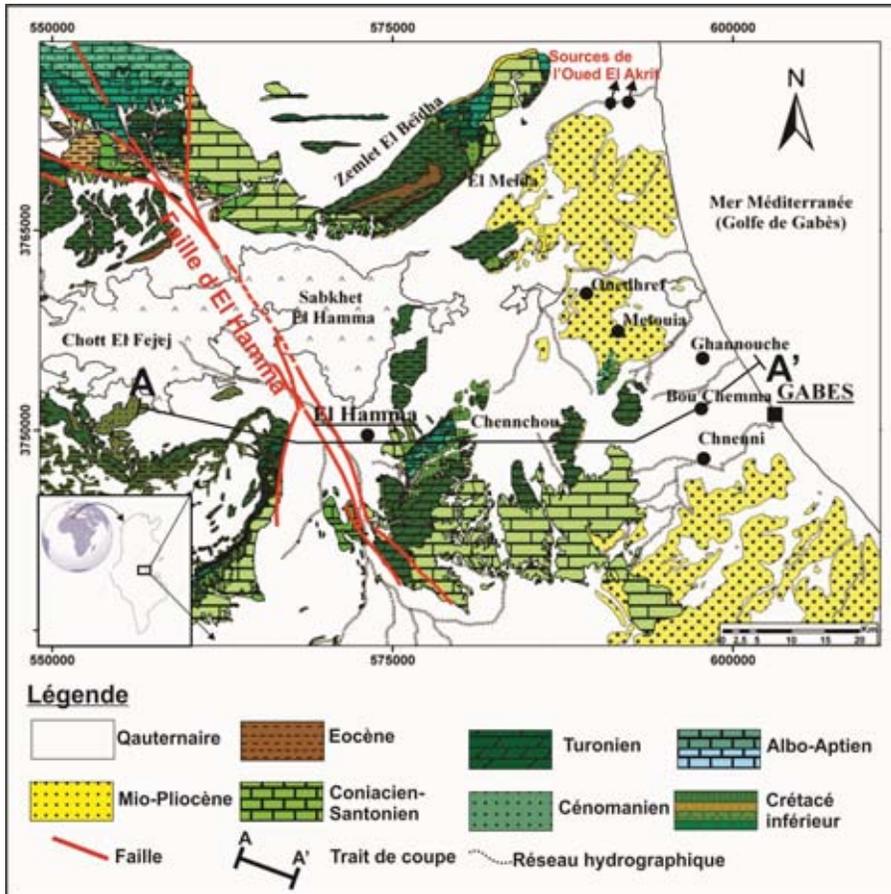


Figure 1 : Carte géologique de la région de Gabès Nord et ses alentours

Le secteur de Gabès Nord, qui se trouve dans la partie septentrionale du bassin de la Jeffara, est constitué par des formations d'âge Crétacé et Mio-Plio-Quaternaire (Figure 1 et 3). Le Crétacé inférieur regroupe les grès, les argiles, les gypses et les sables du Barrémien et les calcaires dolomitiques de l'Albo-Aptien. Le Crétacé supérieur se compose essentiellement de calcaires dolomitiques karstifiés et de dépôts marno-gypseux du Coniacien-Santonien, calcaires fissurés et karstifiés du Turonien, de dépôts marno-gypseux et calcaires lumachelliques du Cénomanién. Le Mio-Pliocène est représenté par des dépôts continentaux : sables grossiers, sables fins, argiles sableuses, argiles et conglomérats. Le Quaternaire se compose essentiellement de dépôts détritiques continentaux allant de sables plus ou moins grossiers à des argiles avec parfois de minces intercalations de gypses et de conglomérats.

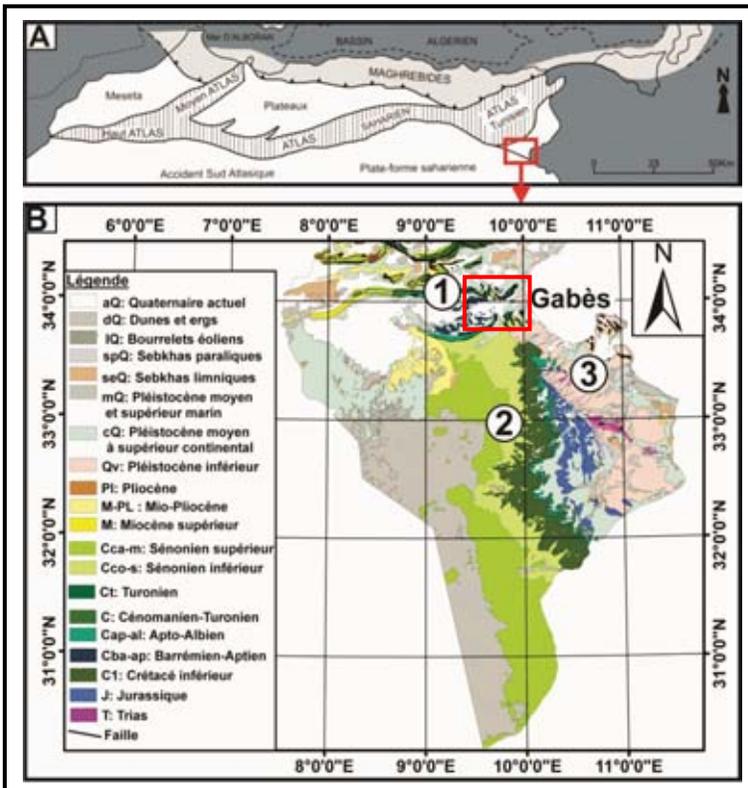


Figure 2 : Domaines structuraux du sud de la Tunisie et localisation de la zone étudiée

Le climat qui règne dans ce bassin est de type aride à semi-aride avec des tendances sahariennes. Les précipitations se caractérisent par leur irrégularité et leur violence, elles ne dépassent qu'exceptionnellement 180 mm/an.

Les investigations hydrogéologiques effectuées dans le secteur Gabès Nord et ses alentours (Mamou 1990 ; Ben Alaya et al. 2014a) ont révélé un système multicouche où se superposent plusieurs niveaux aquifères, dont les plus importants sont, du plus récent au plus ancien, les suivants: l'aquifère sableux du Miocène, l'aquifère calcaire du Coniacien-Santonien et l'aquifère calcaire du Turonien. Ce système aquifère est largement influencé par les caractéristiques structurales locales (Ben Alaya et al. 2014a & 2014b). La faille d'El Hamma (Figure 1) a en effet engendré l'effondrement du bloc Est mettant en contact les niveaux gréseux du Crétacé inférieur de forte perméabilité à l'Ouest avec les niveaux marno-gypseux du Crétacé supérieur de moindre perméabilité à l'Est (Figure 4). Ce "seuil hydraulique" (Castany, 1950) maintient à son amont une pression hydrostatique nettement plus élevée qu'en aval.

En surface, ce seuil est matérialisé par l'alignement des sources de l'Oued El Hamma, dont la température est d'environ 50°C (Figure 3). Depuis quelques années, l'exploitation de la nappe de la Jeffara à l'Est de la faille d'El Hamma a conduit à une baisse de la piézométrie entraînant l'extinction de l'artésianisme sur la plus grande partie de la nappe de la Jeffara et le tarissement généralisé des sources au niveau de la partie septentrionale de la Jeffara. Depuis quelques années, l'exploitation de la nappe de la Jeffara à l'Est de la faille d'El Hamma a conduit à une baisse de la piézométrie entraînant l'extinction de l'artésianisme sur la plus grande partie de la nappe de la Jeffara et le tarissement généralisé des sources au niveau de la partie septentrionale de la Jeffara.

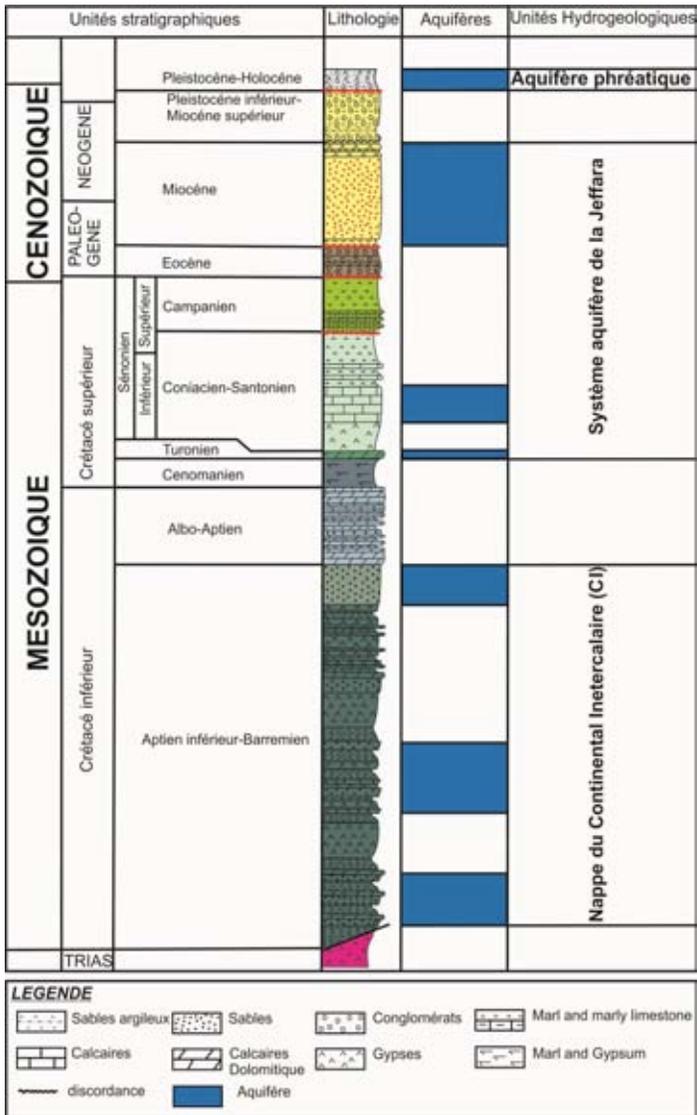
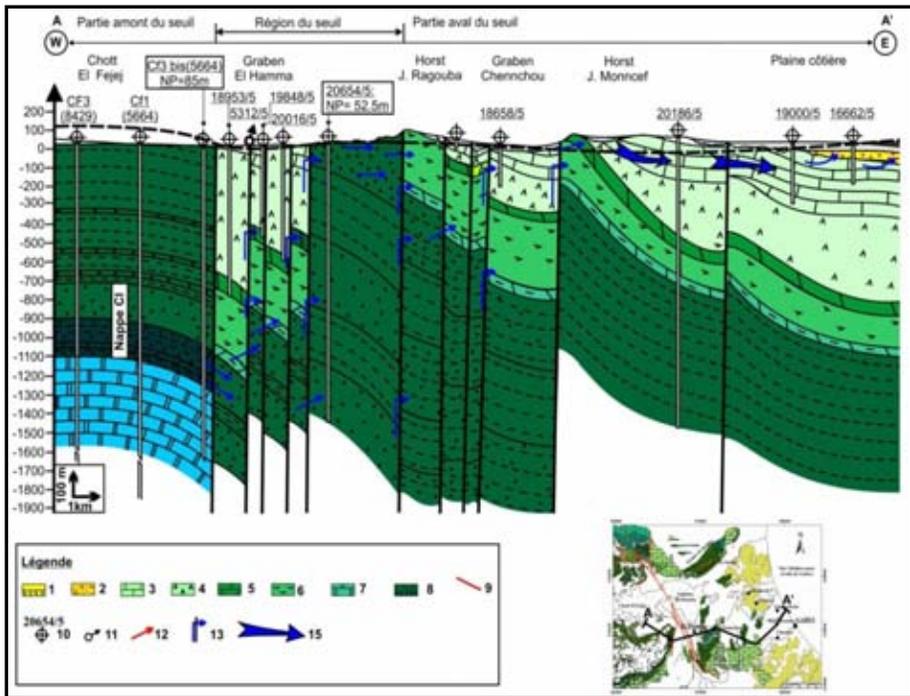


Figure 3: Log lithostratigraphique de la partie septentrionale du Bassin de la Jeffara



**Légende:**

1: Mio-Plio-Quaternaire; 2: Miocène; 3: Sénonien inférieur; 4: Sénonien lagunaire; 5: Turonien; 6: Cénomaniens-Turonien basale; 7: Apto-Albien; 8: Crétacé inférieur; 9: Faille; 10: Forage et son N°IRH; 11: Source; 12: circulation des eaux souterraines; 13: Déversement des eaux du CI dans la nappe de la Jeffara et 14: sens d'écoulement de la nappe de la Jeffara.

**Figure 4 : Coupe hydrogéologique synthétique à travers la partie septentrionale du bassin de la Jeffara entre El Hamma et Gabès.**

Le seuil hydraulique d'El Hamma constitue à la fois l'exutoire naturel de la nappe du CI à travers les sources de l'Oued El Hamma, et l'alimentation souterraine qui transite vers la nappe de la Jeffara. En effet, le seuil d'El Hamma induit une dénivelée piézométrique de plus de 50 m. Cette dénivelée s'explique par la configuration géologique du seuil d'El Hamma permettant à l'eau du CI de remonter le long des accidents tectoniques successifs (Figure 4), pour se déverser dans les différentes formations aquifères de la Jeffara. La pression au niveau du seuil est appelée à baisser en fonction du temps, vu la

forte exploitation de la nappe du CI pratiquée en amont (bassin du Grand Erg Oriental en Algérie et en Tunisie), et celle de la Jeffara à travers toute la plaine côtière.

## **MATERIELS ET METHODES**

Les interactions entre les aquifères de la nappe de la Jeffara de Gabès Nord et les aquifères profondes (salinité  $> 7$  g/l) et l'interaction eau/niveaux évaporitiques ont été étudiées à partir de l'analyse et de l'interprétation des données de sismique réflexion. Les études par sismique-réflexion pétrolière et haute résolution ont contribué à l'identification des structures profondes et appréhender la géométrie des aquifères (Laroque & Dupuy, 2004 ; Zouhri et al., 2011). Dans la région de Gabès nord et ses alentours, les données fournies par les puits pétroliers (Cf1 et ZB1) et les forages hydrauliques sont un secours pour le calage, respectivement, de la sismique pétrolière et haute résolution (Figure 5). La conversion des profondeurs en utilisant les courbes temps-profondeur a permis d'affiner la structure géologique des différents horizons perméables et imperméables.

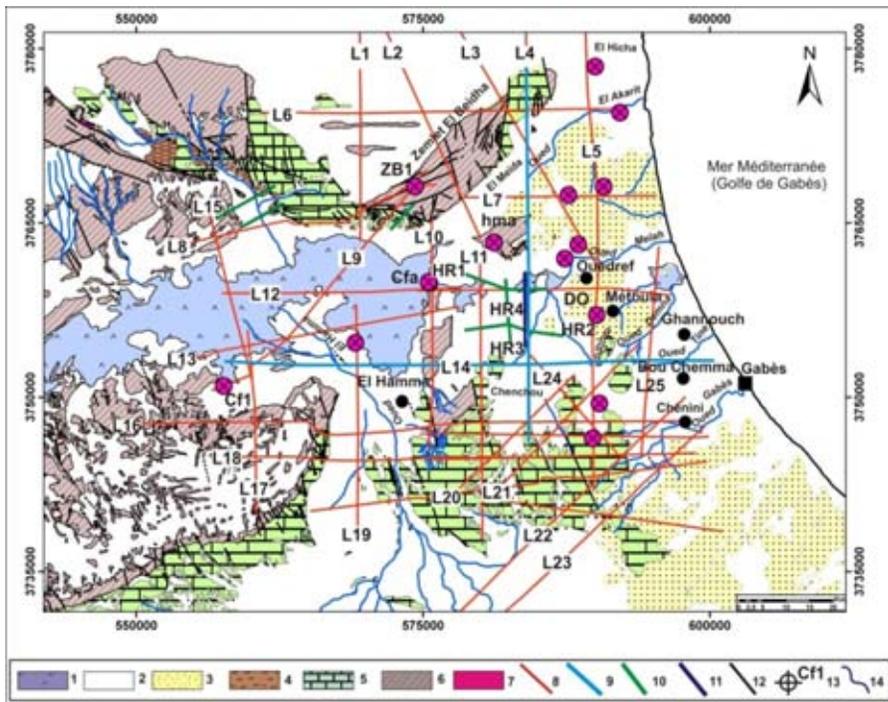
Afin d'évaluer la minéralisation des eaux souterraines de la région, une campagne de mesure a été réalisée pendant l'année 2008. Les analyses chimiques des éléments majeurs ont été réalisées par différentes méthodes (gravimétrie, titrimétrie et spectrométrie à flamme). L'erreur sur la balance ionique reste acceptable ( $E < 5\%$ ) pour l'ensemble des points analysés.

## **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

### **Coupe géosismique**

Les coupes géosismiques des profils sismiques pétroliers L4 et L14 de direction, respectivement, E-W et N-S (Figure 6) permet de confirmer d'une part la complexité géologique de la région Gabès Nord et d'autre part l'existence d'une mosaïque de failles normales et profondes de directions NW-SE, N-S, E-W et NE-SW qui affectent les séries allant du Trias au Crétacé supérieur. Les mêmes directions de failles sont identifiées sur la sismique haute résolution (Figure 7). Ces informations impliquent qu'en plus des traits structuraux déjà décrits sur les cartes géologiques de Gabès, il existe en profondeur d'autres structures de même importance, qui devront être prises en considération pour mieux

comprendre le schéma hydrodynamique du système aquifère de la Jeffara de Gabès Nord et ses alentours. En effet, l'influence des structures anciennes est bien visible sur les sections sismiques, qui révèlent un système aquifère compartimenté en horsts et en grabens.



**Légende :** 1 : Sebkhass, 2 : Quaternaire, 3 : Mi-Pliocène, Éocène, 5 : Crétacé supérieur, 6 : Crétacé inférieur, 7 : Trias, 8 : Profil sismique pétrolière non publié dans ce travail, 9 : profil sismique pétrolière publié dans ce travail, 10 : Profil sismique Haute résolution (HR) non publié dans ce travail, 11 : profil sismique Haute résolution (HR) non publié dans ce travail, 12 : Faille certaine, 13 : Forage pétrolier et 14 : Oued.

**Figure 5 : Carte de position des profils sismique**

Une telle structuration présente des implications hydrogéologiques très importantes, dans la mesure où elle contrôle l'écoulement et la qualité chimiques des eaux souterraines.

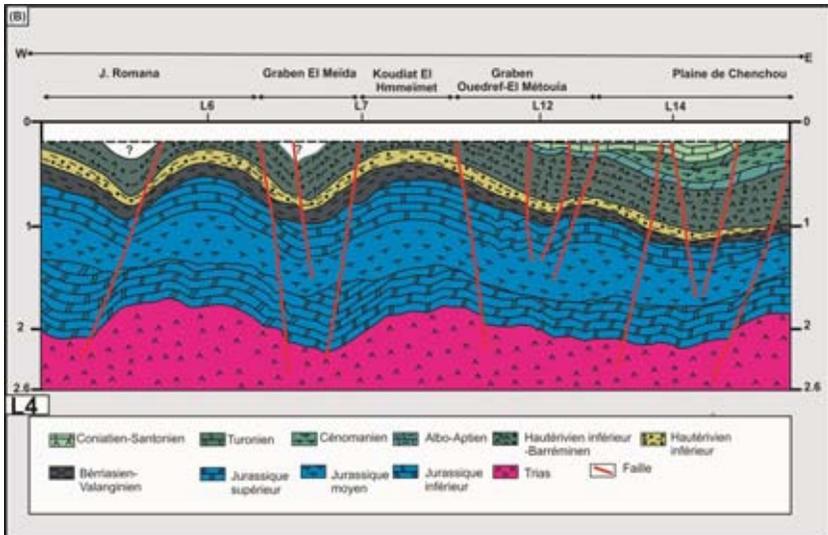
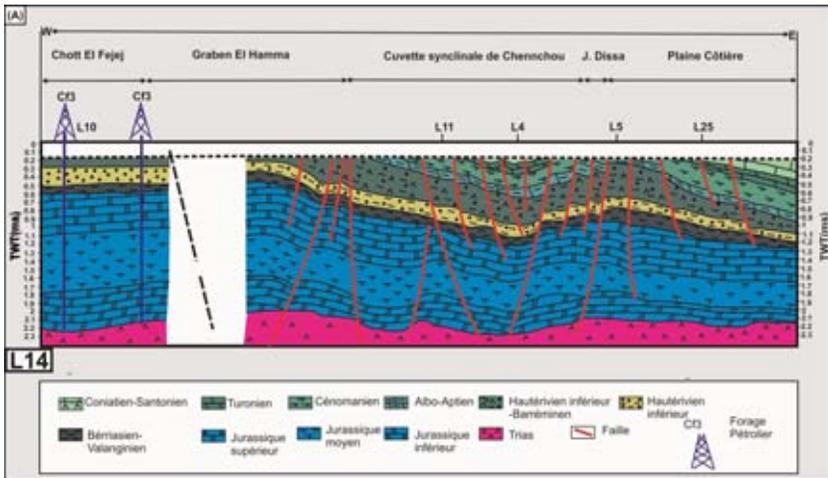


Figure 6 : Coupes géosismiques des profils sismiques L14 (A) et L4 (B)

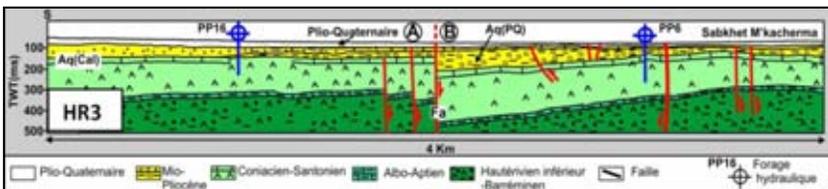


Figure 7 : Coupe géosismique du profil sismique haute résolution HR3

## Piézométrie

Afin de comprendre le fonctionnement hydrogéologique de cet aquifère et le sens d'écoulement, et afin de détecter les zones renfermant des ressources souterraines, la combinaison de l'apport piézométrique et géométrique des réservoirs a été prise en compte. L'analyse piézométrique (Figure 8) montre que le sens de l'écoulement de la nappe est de direction moyenne Ouest-Est. Cet écoulement se fait dans plusieurs compartiments hydrogéologiques. En effet, les eaux convergeraient à partir des structures en horsts vers les zones de dépressions (Grabens). La structure piézométrique identifiée sur la carte piézométrique est un dôme piézométrique qui est une zone de recharge au niveau du Turonien fracturé qui favorise l'infiltration dans la nappe.

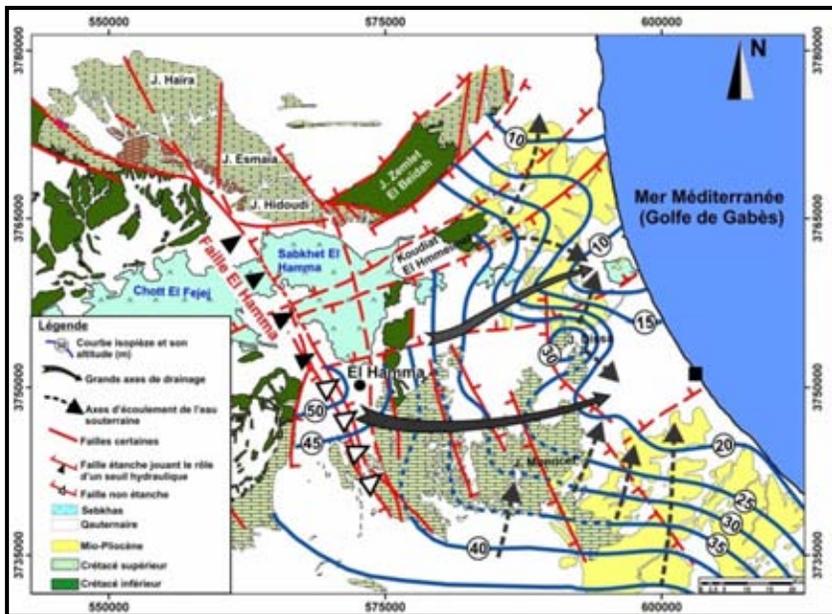


Figure 8 : Carte piézométrique de la nappe de la Jeffara de Gabès Nord

## Hydrochimie

La carte de répartition spatiale de salinité ( $\text{g L}^{-1}$ , Figure 9) montre une similitude assez étroite avec l'allure de la carte piézométrique de la nappe (3 et  $10 \text{ g L}^{-1}$ ). La salinité des eaux est influencée par la lithologie, le séjour des eaux dans les réservoirs et l'interaction eau-roche évaporitique. Dans les alentours de Gabès,

et le long de la frange côtière, les valeurs de la salinité de l'eau de la Jeffara varient de 2,8 à 3 g L<sup>-1</sup>. Ceci peut s'interpréter comme un apport local en eau douce caractérisant l'aquifère calcaire du Coniacien-Santonien à travers ses affleurements dans le bassin versant de l'Oued Gabès. En plus, dans ce secteur, la forte karstification des calcaires du Coniacien-Santonien est de nature à favoriser la bonne circulation des eaux souterraines et par conséquent une légère variation de leur salinité dans le sens de l'écoulement. A proximité des sebkhas, les valeurs élevées de salinité de la nappe de la Jeffara semblent être dues à une communication avec les eaux très chargées des sebkhas (Sabkhet El Hamma et Sabkhet El Melah-M'khacherna) d'une part, et à une remontée d'eau très minéralisée piégée dans les séries du Crétacé inférieur (salinité > 7g/l) à la faveur des accidents tectoniques bordant le graben d'Ouedref-Métouia d'autre part. Il y a risque de transformer aussi les dépressions de type sebkhas à des aires de recharge en cas de surexploitation à moyen et à long terme, source éventuelle de contamination des eaux souterraines, au niveau des accidents, par des eaux superficielles plus salées.

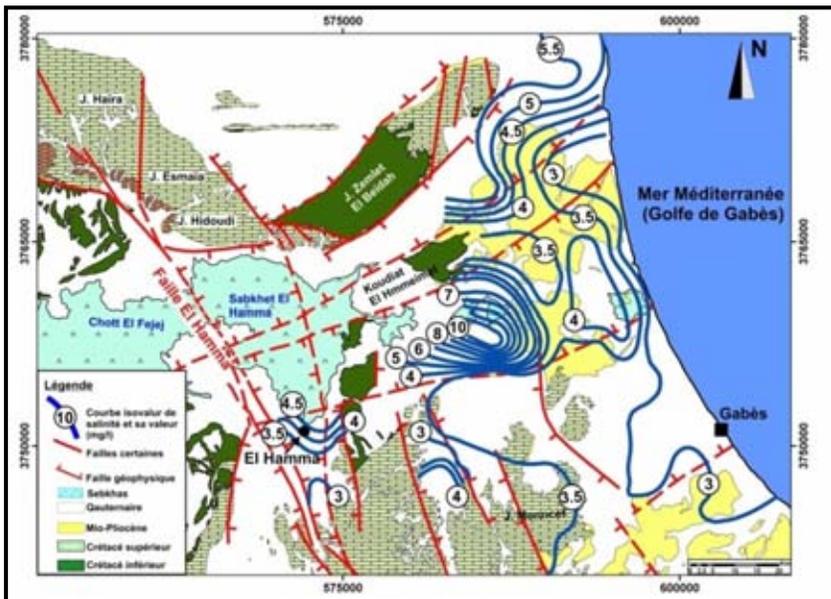


Figure 9 : Carte de salinité de la nappe de la Jeffara

## **Mécanismes de l'acquisition de la charge saline**

Le traitement des données analytiques a été réalisé à l'aide du logiciel AquaChem afin de préciser l'origine de la minéralisation des eaux et la nature des niveaux réservoirs. En effet, l'approche hydrochimique appliquée aux différentes eaux analysées, au Laboratoire du Groupe Chimique Tunisien (GCT), dans la région d'étude a révélé que les eaux de la nappe de la Jeffara, présentent des salinités variables et sont dans l'ensemble caractérisées par une dominance des sulfates, des chlorures et du sodium. Ceci montre bien que la minéralisation de ces eaux est acquise principalement par la dissolution des minéraux évaporitiques.

Afin de déterminer le faciès chimique des eaux analysées, nous avons reporté les résultats d'analyses dans le digramme de Piper (1944). Les points représentatifs de tous les points d'eau échantillonnés (Figure 10) montrent que les faciès chimiques des eaux évoluent du faciès hydrochimique Na-Ca- $\text{SO}_4$ -Cl au Ca-Na- $\text{SO}_4$ -Cl pour les eaux les moins chargées et au faciès hydrochimique Na-Ca-Cl- $\text{SO}_4$  au Na-Cl pour les eaux les plus chargées. Ceci est corroboré par les indices de saturation (Is) calculés par le programme WateqF (Plummer et al. 1976) qui montrent un état de sous-saturation pour tous les échantillons vis-à-vis de la halite et de légère sous saturation vis-à-vis du gypse. Le calcul des indices de saturation de la calcite et la dolomite (Figure 11) montre que la majorité des eaux prélevées sont saturés vis-à-vis des minéraux carbonatés, la calcite, la dolomite et l'aragonite. L'eau est en équilibre avec un minéral lorsque  $I_s = 0$ , elle est sous-saturée lorsque  $I_s < 0$  et sursaturée lorsque  $I_s > 0$  (Subyani 2005, Cidu et al. 2009).

Les teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  et en  $\text{Mg}^{2+}$  montrent une grande variabilité, de 272 à 712  $\text{mg L}^{-1}$  pour  $\text{Ca}^{2+}$  et de 37 à 264  $\text{mg L}^{-1}$  pour  $\text{Mg}^{2+}$ . Ceci peut s'expliquer par le fait que ces deux cations sont probablement impliqués dans les processus de dissolution/ précipitation du gypse, de la calcite et de la dolomite (présence d'un ion commun le  $\text{Ca}^{2+}$ ) et aux phénomènes d'échanges de base  $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+$ - $\text{Mg}^{2+}$  et d'échanges  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ , dus à l'interaction entre eau et roches carbonatées (dolomitisation). Les phénomènes d'échanges de bases, qui caractérisent les niveaux aquifères de la nappe de la Jeffara, sont mis en évidence par la relation  $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  en fonction de  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  (Fig. 12).

La projection des différents points sur le diagramme  $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  en fonction de  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  (Figure 12) montre que 31% des points d'eau subissent un échange de bases inverse par lequel les ions  $\text{Na}^+$  sont adsorbés à la surface des minéraux argileux en libérant du  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^- < 1$ ), 22% des points subissent

un échange de bases direct par lequel les ions  $\text{Na}^+$  sont libérés du complexe et sont remplacés par les ions  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 1$ ) et 47% des points présentent l'état naturel ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1$ ). Tous les points d'eau présentent un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  par rapport aux ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  sûrement dû à l'effet de la fixation du calcium par les argiles et à la précipitation de la calcite. En effet, la précipitation de la calcite est contrôlée par l'échange de bases inverse et la dissolution du gypse qui tendent à maintenir la saturation et la sursaturation de l'eau vis-à-vis ce minéral (calcite). En outre, les bicarbonates formés par la dissolution de la calcite mettant en jeu le  $\text{CO}_2$  (g) sont équilibrés par  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$  libérés du complexe des minéraux argileux de la formation aquifère (Andrews et al. 1994).

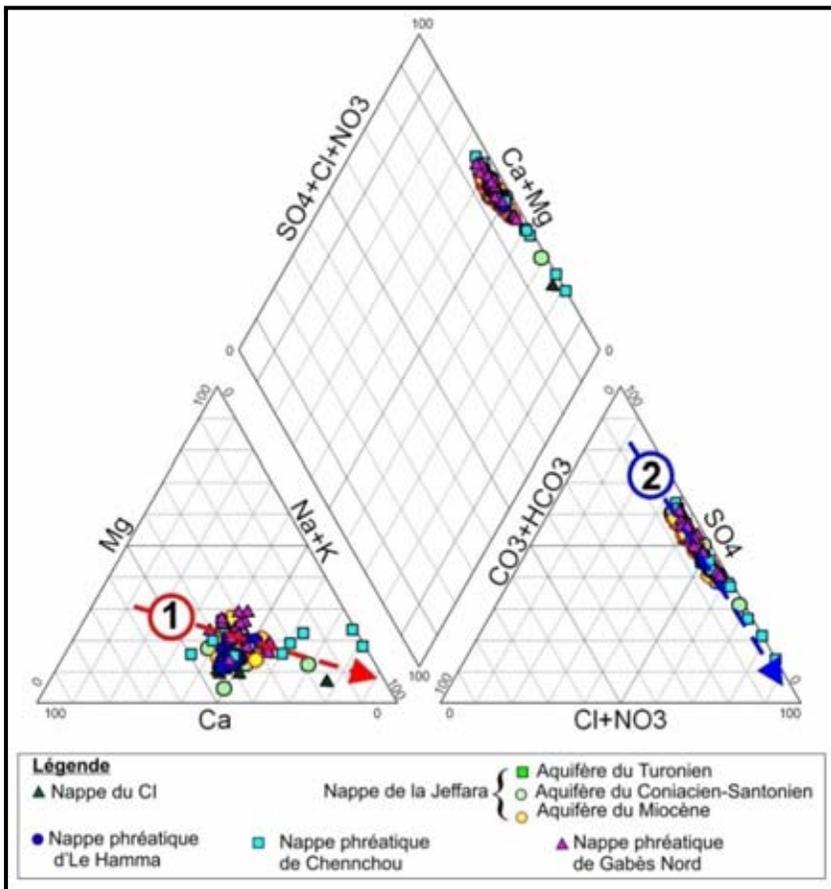


Figure 10 : Diagramme de Piper (1944) appliqué aux eaux de la nappe de la Jeffara de Gabès Nord.

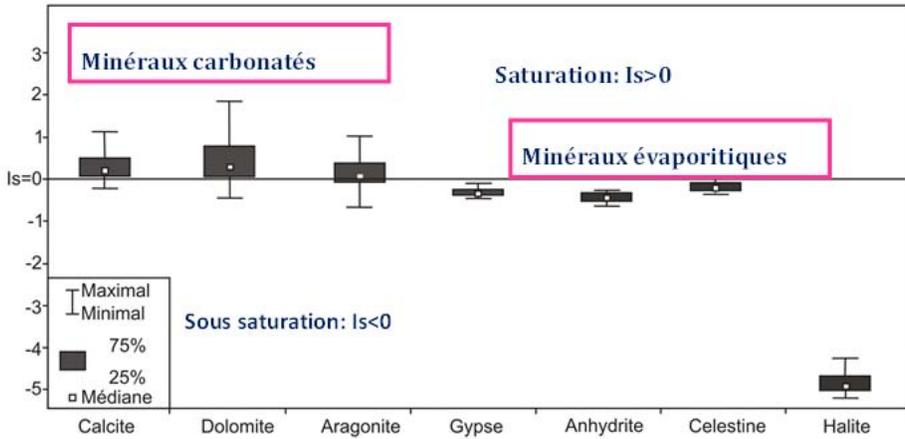


Figure 11 : Box plots illustrant la variation des indices de saturation (IS) de certains minéraux des formations aquifères

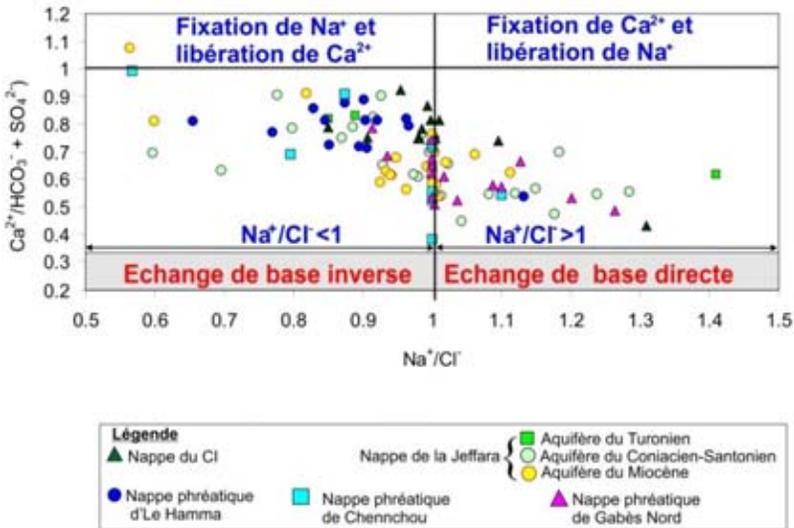


Figure 12 : Relation entre  $Ca^{2+}/(HCO_3^- + SO_4^{2-})$  et  $Na^+/Cl^-$

## **CONCLUSION**

Les méthodes géologiques et géophysiques (sismique réflexion) et l'analyse des forages hydrogéologiques et pétroliers ainsi que les l'interprétation des données hydrogéochimiques ont été utilisées ici pour montrer le rôle que peut jouer la tectonique dans la compréhension du fonctionnement des aquifères et la genèse des nappes d'eau salée.

Ainsi, les lignes sismiques ont permis de relever les principales caractéristiques de la partie septentrionale du bassin de la Jeffara (tectonique, extension des couches aquifères...), de suivre les limites de fonctionnement des aquifères profonds et de déceler les zones hydrogéologiques favorables. Elles montrent que le dispositif en horsts et grabens a contrôlé la répartition des formations perméables, l'écoulement souterrain et la qualité chimique des eaux. De même, elles donnent aussi des indications précieuses de profondeurs de réservoirs pour une éventuelle implantation de forages.

La variation de la salinité et le comportement hydrogéochimique des aquifères de la nappe de la Jeffara de Gabès s'expliquent par une interaction avec leur environnement global (niveaux évaporitiques et sebkhas) et par un contexte géologique complexe.

Par ailleurs, cette étude montre que la région de Gabès Nord est affectée par des accidents qui hachent l'ensemble des formations allant du Trias au Plio-Quaternaire dans la partie Nord du secteur d'études et aux alentours des sebkhas. Il est évident que certaines remontées d'eau salée se sont faites à la faveur des failles à partir des formations aquifères du Crétacé inférieur (Salinité > 7g/l) dans la plaine de la Jeffara de Gabès Nord. Aux alentours des sebkhas, C'est à travers la fracturation et la fissuration des niveaux notamment carbonatés et la bonne perméabilité des niveaux sableux du Miocène que s'effectue probablement la contamination des eaux souterraines par des eaux superficielles plus salées. Le mélange entre eau douce/eau salée est fortement modifié par des interactions géochimiques : échanges de bases et phénomènes de précipitations des minéraux carbonatés et dissolution des minéraux évaporitiques.

Cette démarche nous a permis d'obtenir des guides méthodologiques qui seront utilisés pour orienter l'implantation de nouveaux forages. La prise en compte de la géométrie, sur laquelle se fondent les modèles hydro-structuraux, permettra dans une prochaine étape de réaliser une étude de gestion des ressources de ce système aquifère.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDREWS, J.N., FONTES, J.C., ARANYOSSY, J.F., DODO, A., EDMUNDS, W.M., JOSEPH, A., TRAVI, Y. (1994). The evolution of alkaline aquifer of the Irhazer Plain, Niger. *Water Resour Res* 30(1): 45–61
- BEN ALAYA, M., ZEMNI, T., MAMOU, A. & ZARGOUNI, F. (2014): Acquisition de salinité et qualité des eaux d'une nappe profonde, Tunisie: Approche statistique et géochimique. *Hydrological Sciences Journal*. 59 (2), 395-419.
- BEN ALAYA, M., SAIDI, S., ZEMNI, T. & ZARGOUNI, F. (2013b). Suitability assessment of deep groundwater for drinking and irrigation use in the Djeffara aquifers (Northern Gabes, south-eastern Tunisia). *Environ Earth Sci*. 71, 3387–3421.
- BOUAZIZ, S. (1995). Étude de la tectonique cassante dans la plateforme et l'Atlas sahariens (Tunisie méridionale): évolution des paléochamps de contraintes et implications géodynamiques. Thèse Es Sciences. Université Tunis-II, Tunisie.
- CASTANY, G. (1954). L'accident sud tunisien et ses relations avec l'accident sud-atlasique. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences, Paris*, 238.
- CIDU, R., BIDDAU, R., AND ET FANFANI, L. (2009). Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 100, 125–132.
- LARROQUE, F.& DUPUY, A. (2004). Apports de la méthode sismique réflexion haute résolution à l'identification des structures profondes des formations tertiaires en Médoc (Gironde, France): implications hydrogéologiques. *C.R.G.* 336, 1111–1120.
- MAMOU, A. (1990). Caractéristiques et évolution des ressources en eau du Sud Tunisien.
- PIPER, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Am. Geophys. Union* 25, 914–923.
- PLUMMER, L.N., JONES, B.F., and et TRUESDELL, A.H. (1976). WATEQF, a Fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. US Geological Survey Water Resources Investigation Report 76–13. Available from: <http://pubdupws.nrc.gov/docs/ML0331/ML033170395.pdf>
- SUBYANI, A.M. (2005). Hydrochemical identification and salinity problem of groundwater in Wadi Yalamlam basin, Western Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 60, 53–66.
- ZOUHRI, L., GORINI, C., LAMOUREUX, C., VACHARD, D., DAKKI, M. (2003): Interprétation hydrogéologique de l'aquifère des bassins Sud rifains (Maroc): apport de la sismique réflexion. *C. R. G.* 335, 319–326.