

Origine de la minéralisation des eaux de la nappe phréatique de l'île de Djerba (Tunisie) : Application des méthodes hydrochimique et Isotopique

Rim Trabelsi et Kamel Zouari

Laboratoire de Radio-Analyse et Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax
rimaenis@yahoo.fr, kamel.zouari@enis.rnu.tn

I. INTRODUCTION :

La salinisation des eaux souterraines est l'un des problèmes les plus complexes qui affectent les eaux souterraines des aquifères côtiers surtout en région aride et semi-aride. La surexploitation des eaux souterraines dans plusieurs régions du monde a provoqué la baisse du niveau piézométrique et la détérioration de la qualité chimique des eaux. Diverses études menées dans plusieurs pays comme Chypre [1], l'Italie [2], La France [3], Palestine occupée [4], l'Espagne [5], le Portugal [6], le Maroc [7, 8] et la Tunisie [9, 10, 11, 12], ont prouvé qu'en plus des phénomènes de lessivage des sols et les pratiques de l'irrigation qui participent à l'augmentation de la minéralisation, la mer constitue une origine commune de la salinisation des aquifères côtiers.

Dans le Sud tunisien, les eaux souterraines constituent la principale ressource utilisée pour répondre aux besoins en eau des différents secteurs socio-économiques, vu l'absence de cours d'eau permanents.

L'île de Djerba située au Sud Est de la Tunisie est caractérisée par un climat méditerranéen à tendance sub-aride (Fig.1). Ce climat est marqué par un déficit hydrique du fait que l'évaporation (1500mm/an) dépasse de loin la pluviométrie moyenne annuelle estimée à 207 mm/an. Djerba, la plus grande île tunisienne (514 km²), a connu ces dernières années un développement important du secteur touristique accompagné par une demande en eau de plus en plus accrue conduisant à une exploitation croissante des ressources en eaux souterraines. L'exploitation de cette nappe se fait par des puits de surface pour des fins généralement agricoles. Uniquement trois forages ont été réalisés, lors des années cinquante, dans la région de Guallela, pour assurer à cette époque l'alimentation en eau potable.



Figure 1 – Carte de Localisation de la zone d'étude

Malgré sa déclaration comme périmètre de sauvegarde depuis 1986, la nappe phréatique de Djerba est soumise à une forte exploitation (3,8 Mm³/an) dépassant les ressources renouvelable. La surexploitation de cette nappe s'est manifestée par une baisse générale de la piézométrie d'une part, et par l'augmentation

de la salinité des eaux dans les régions côtières, d'autre part. Dans ce contexte, cette étude a été entreprise afin d'identifier les processus d'acquisition de la salinité de la nappe phréatique de Djerba, en se basant sur la combinaison des méthodes hydrochimiques et isotopiques.

II. APERÇU GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Les différentes formations géologiques affleurantes dans l'île de Djerba sont d'âge quaternaire (Fig.2). Les formations du Crétacé, de l'Oligocène et du Miocène ne peuvent être détectées que par les forages. En effet, le Crétacé est très profond à l'île, on le rencontre après 800 m de profondeur. L'Oligocène, ayant une faible épaisseur, est situé à une profondeur dépassant 750 m. Concernant le Miocène, il est très puissant, avec une épaisseur dépassant 600m.

Faisant partie de la plaine côtière de la Djeffara, l'île de Djerba est affectée par un réseau de failles, orientées NW-SE, parallèle à la faille majeure d'effondrement passant par Mareth, Medenine et Ben Guerdane (Fig.2). L'île présente ainsi, une activité tectonique importante. Les argiles du Mio-pliocène indifférenciées, la croûte du villafranchien et les dépôts indurés de calcaires fins du Tyrrhénien constituent les niveaux marqueurs de cette déformation cassante [13].

L'île de Djerba referme un aquifère superficiel de structure complexe, logé dans les différents niveaux sableux du Mio-Plio-Quaternaire ainsi que dans les calcaires marins du Tyrrhénien [14]. Ces sables sont présents dans presque toute l'île, à l'exception de la côte Nord Est où on rencontre les calcaires du Tyrrhénien en bordure [15]. Cette nappe phréatique, la plus importante nappe superficielle du Sud-Est tunisien [16], renferme près de 60 % des puits de surface du gouvernorat de Médenine. L'épaisseur totale de la formation aquifère varie d'une cinquantaine à une centaine de mètres [17].

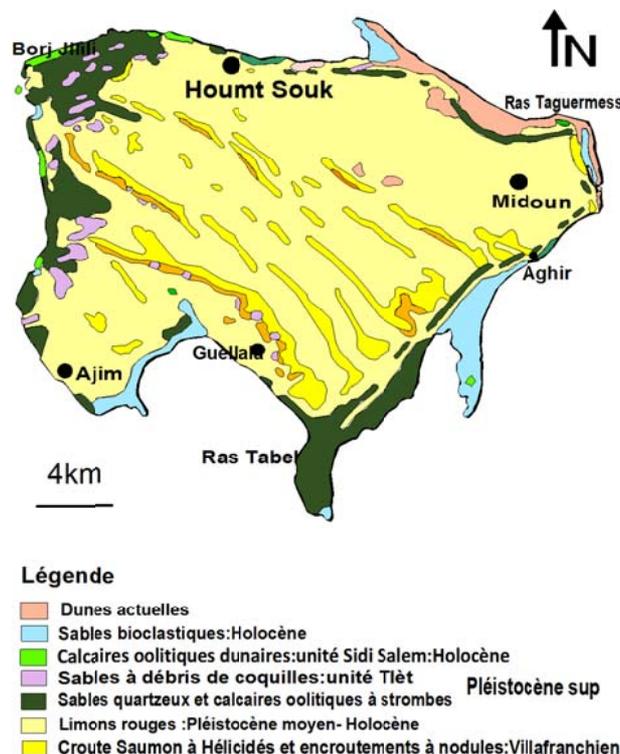


Figure 2 – Carte géologique de la zone d'étude

La carte piézométrique de l'année 2008 de cet aquifère (Fig.3), montre qu'il s'agit d'une nappe divergente dont l'exutoire naturel est la mer. Les zones de recharge correspondent aux régions les plus élevées topographiquement. Elles se situent à Dharet Guallela et au niveau de la région de Sidi Salah, plus au Nord. L'alimentation primordiale de cet aquifère est assurée surtout par l'infiltration des eaux de pluie.

Cependant, la migration de l'isopièze -1m à l'intérieur du continent, dans la partie Est de L'île, peut engendrer l'inversion du gradient hydraulique. Ce qui met en évidence la vulnérabilité de cette région au phénomène de l'intrusion marine (Fig.3).

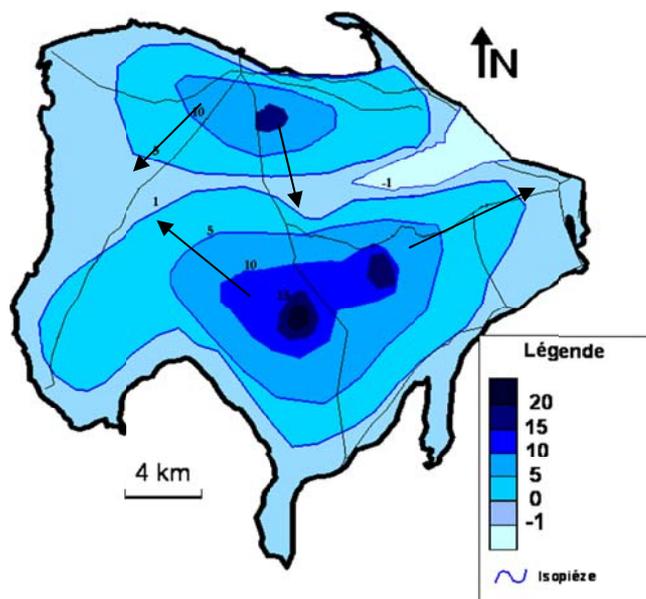


Figure 3 – Carte Piézométrique de l'année 2008

III. ECHANTILLONNAGES ET ANALYSES

Un total de 11 échantillons a été prélevé de la nappe phréatique pendant l'année 2007, en plus d'un échantillon de l'eau de mer (Fig.4). La conductivité, la température et le pH ont été mesurés sur le terrain. Les analyses chimiques ont été effectuées par chromatographie ionique en phase liquide où les teneurs en Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Br^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ ont été déterminées.

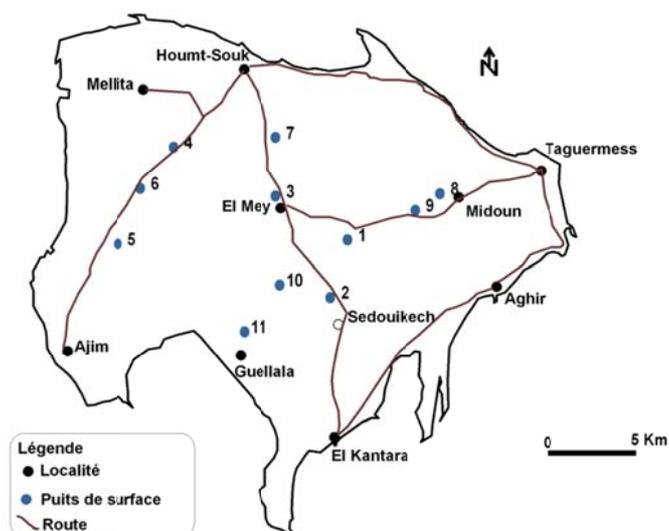


Figure 4 – Carte de localisation des points d'eaux échantillonnées

Les échantillons ont fait l'objet d'analyses en isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) par spectrométrie laser. Les résultats sont exprimés en part pour mille par rapport au standard international VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). L'ensemble de ces analyses ont été effectuées au laboratoire de Radio-Analyses et Environnement (LRAE) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) de Tunisie.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Répartition spatiale de la minéralisation

La carte de répartition spatiale du résidu sec des eaux de la nappe phréatique de Djerba montre des valeurs qui oscillent entre 2171 et 9795 mg/l. Les valeurs les plus faibles sont observées au centre de l'île (Fig.5) témoignant d'un apport d'eau douce. Les eaux les plus minéralisées caractérisent les puits situés sur la frange côtière. L'augmentation de la salinité dans ces puits est liée, soit à l'intrusion des eaux salées à partir de la mer, soit aux interactions eau-roche de l'amont vers l'aval du bassin dans le sens d'écoulement souterrain.

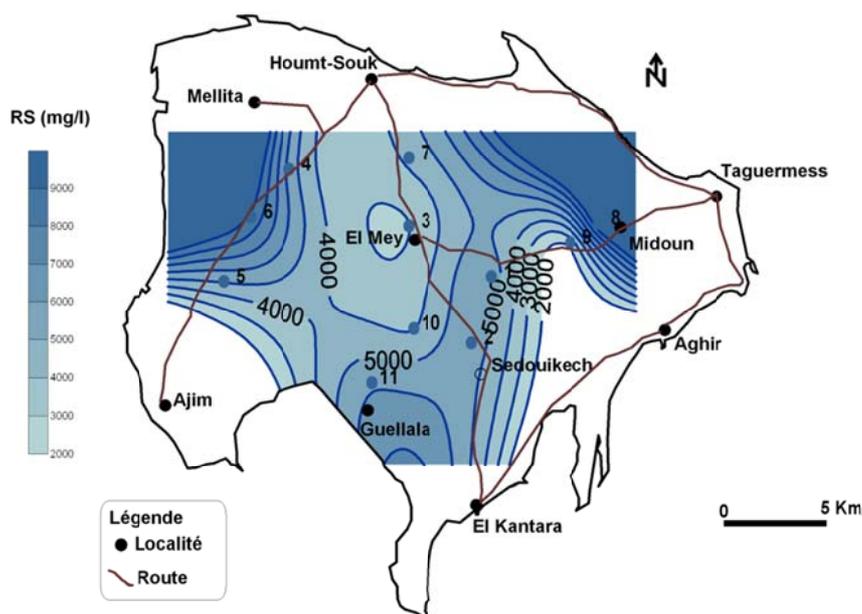


Figure 5 – Carte de répartition spatiale du résidu sec des eaux de la nappe phréatique de Djerba

IV.2. Faciès Chimique et matrice de corrélation

Sur le diagramme de Piper, les points représentatifs des eaux de la nappe phréatique montrent un alignement des points qui traduit l'évolution entre un faciès sulfaté calcique et un autre chloruré sodique traduisant la complexité des processus d'acquisition de la minéralisation (Fig.6). Cette gradation est très nette dans le triangle des anions, où les eaux souterraines montrent un enrichissement progressif en Cl en s'approchant des côtes. Les eaux se caractérisant par un faciès chloruré sodique, typique de celui de l'eau de mer, peuvent indiquer un processus d'intrusion marine.

La matrice de corrélation (tab. 1) met en évidence les fortes relations existantes entre la variable représentant la salinité (RS) et quelques éléments chimiques (Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- , Na^+ et Mg^{2+}) où le coefficient de corrélation est compris entre 0,79 et 1. Ainsi, ces éléments chimiques sont à l'origine de l'augmentation de la salinité des eaux dans les régions côtières.

IV.3. Le rapport Na^+/Cl^-

Dans le diagramme Na^+ en fonction de Cl^- (Fig.7a), les eaux faiblement minéralisées s'alignent sur une droite de pente 1, indiquant ainsi une probable dissolution de l'halite. Cette droite relie surtout les points situés dans le centre de l'île de Djerba. Certains points d'eau (6, 8, 11) montrent un rapport molaire Na^+/Cl^-

proche à celui de l'eau de la méditerranée (0,86) [9] (Fig.7a) et se placent sur la droite de dilution de l'eau de Mer.

Tableau 1 – Matrice de corrélation entre les éléments chimiques

	RS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄	Br
RS	1									
Ca	0	1								
Mg	0.97	0	1							
Na	1	0.01	0.95	1						
K	0.96	0.01	0.88	0.97	1					
HCO ₃	0	0.02	0.03	0	0.01	1				
CO ₃	0.36	0.04	0.28	0.39	0.48	0.09	1			
Cl	1	0.01	0.96	1	0.97	0	0.39	1		
SO ₄	0.79	0.1	0.78	0.74	0.68	0.01	0.11	0.75	1	
Br	0.99	0	0.96	0.99	0.96	0	0.39	1	0.75	1

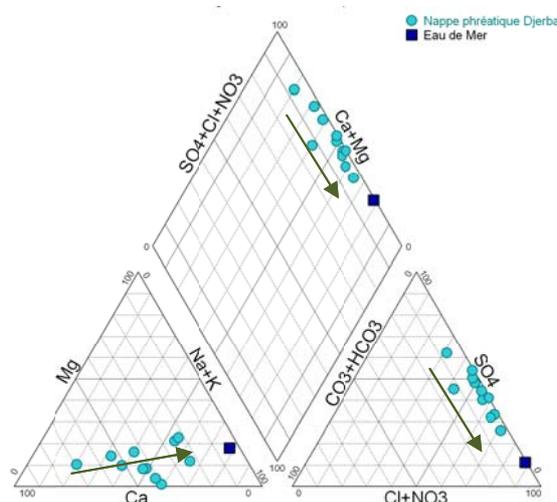


Figure 6: Diagramme de Piper des eaux de la nappe phréatique de Djerba

IV.4. Le rapport Br⁻/Cl⁻

Vu leur comportement géochimique similaire et leur faible activité chimique, le brome et le chlore sont toujours associés pour étudier l'origine des chlorures et les anomalies de salinité affectant les eaux souterraines. En effet le brome est considéré comme un bon indicateur du phénomène de l'intrusion des eaux marines dans les aquifères côtiers. Les eaux marines présentent un rapport Br⁻/Cl⁻ de l'ordre de 1,5 et 1,7‰ [7]. Les eaux évaporées enrichies en chlorures et appauvries en bromures doivent afficher des valeurs plus faibles. Les valeurs les plus élevées par rapport à l'eau marine correspondent à des eaux anormalement enrichies en bromures et qui peuvent provenir des bassins fermés ou des secteurs à faible circulation des eaux [7].

Dans le diagramme Br⁻/Cl⁻ en fonction de Cl⁻ (Fig.7b) quelques points d'eau (6, 8, 11) se trouvent dans le domaine de dilution de l'eau de mer avec un rapport molaire Br⁻/Cl⁻ compris entre 1,5 et 1,7‰, traduisant une origine marine de la salinité. D'autre part, l'augmentation des teneurs en brome dans le puits 3, caractérisé par une salinité relativement faible (3g/l), peut être expliquée par le fait que dans les régions côtières les aérosols en provenance de la mer sont enrichis en Br⁻ et par la suite les pluies auront un rapport Br⁻/Cl⁻ proche de celui de la mer.

D'autres points (9 et 10) ont des rapports beaucoup plus faibles témoignant de l'existence d'une autre source de salinisation (dissolution de sels).

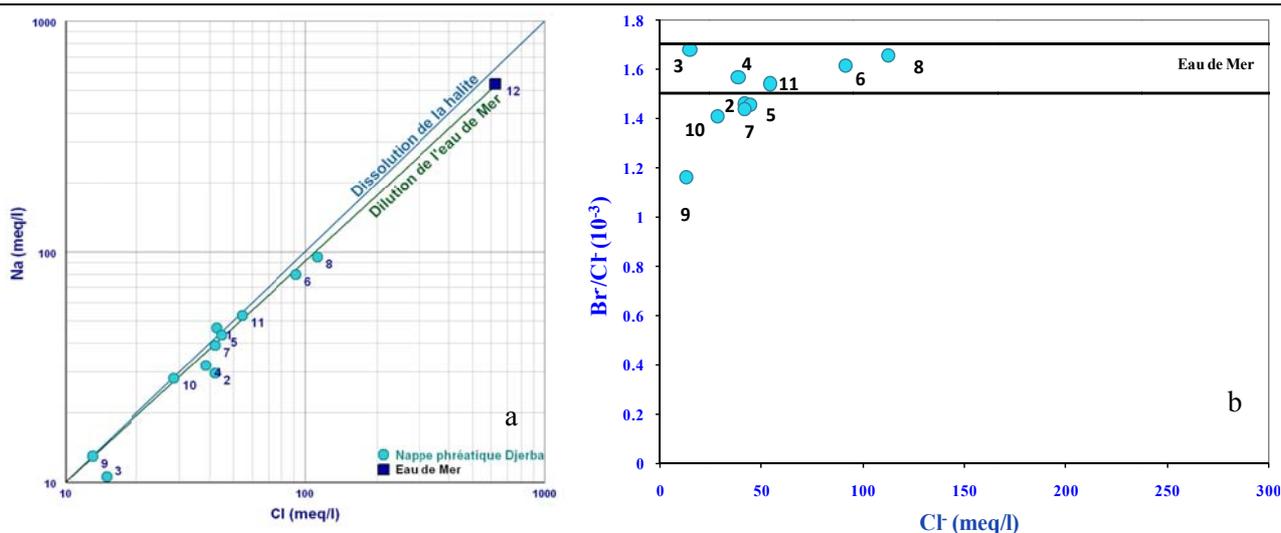


Figure 7– Evolution des teneurs en Na^+ (a) et du rapport Br^-/Cl^- (b) en fonction de la teneur en Cl^- (meq/l) des différents points d'eaux

IV.5. Les rapports $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

Les rapports $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ et $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ (en méq/l) peuvent être utilisés comme traceurs naturels de temps de résidence de l'eau de mer dans les aquifères côtiers [18]. En effet, le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ augmente en fonction de la proportion d'eau de mer introduite dans les aquifères. Les eaux marines sont caractérisées par un rapport proche de 5, cependant, les eaux douces se caractérisent par un faible rapport inférieur à 1 [7,18]. L'augmentation du rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ et la diminution du rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ observées dans les puits 9 et 6 témoignent d'un processus d'intrusion marine plus important avec un écoulement rapide (Fig.8). Les eaux de certains du puits (11 et 7) ont des rapports $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ élevés et des rapports $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ faibles, ce qui suggère un écoulement plus lent et un processus d'intrusion d'eau de mer plus faible.

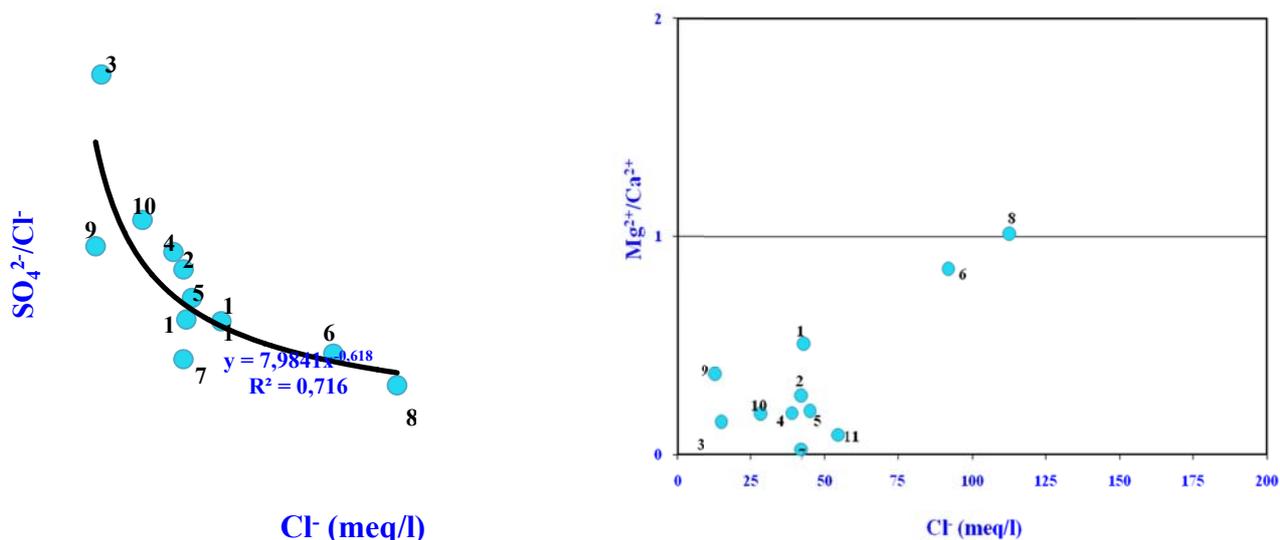


Figure 8– Rapports $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ (a) et $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (b) en fonction de la teneur en Cl^- (meq/l)

V. LES ISOTOPES STABLES DE LA MOLECULE D'EAU

Sur le diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ (Fig.9), on a rapporté la droite météorique mondiale (DMM) et la droite météorique locale de Sfax (DM Sfax) : $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 13$ [19]. Les eaux échantillonnées présentent des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ qui varient de -2,39 à -6,36 ‰ vs VSMOW traduisant l'existence de diverses origines d'eau. Le puits n°4 situé au Nord du bassin montre les teneurs les plus faibles en isotopes stables (-6,36 ; -45‰) qui peuvent être expliquées par un mélange avec les eaux de la nappe profonde de la Djefara, favorisé par l'existence du réseau de failles. Les puits 5, 9 et 10 se placent sur les droites météoriques suggérant une infiltration rapide des eaux de pluie au centre de l'île de Djerba. Les autres points d'eau se répartissent selon une droite de mélange avec l'eau de mer, traduisant un phénomène d'intrusion marine.

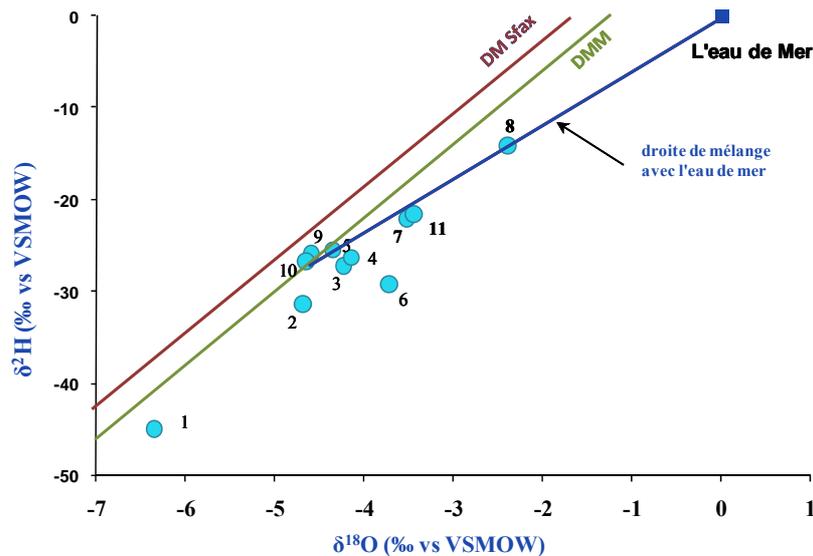


Figure 9— Diagramme oxygène-18/Deutérium des eaux de la nappe phréatique de Djerba

VI. QUANTIFICATION DE L'INTRUSION MARINE

Le taux d'intrusion des eaux marines peut être estimé en se basant sur l'équation de conservation des chlorures.

$$F = \frac{[Cl^-]_{ech} - [Cl^-]_{douce}}{[Cl^-]_{mer} - [Cl^-]_{douce}} \times 100$$

Avec: F : Taux de mélange avec l'eau de mer exprimé en %;

Cl^-_{ech} : La concentration en Cl^- des eaux échantillonnées

Cl^-_{douce} : La concentration en Cl^- des eaux souterraines douces

Cl^-_{mer} : Concentration en chlorures des eaux de la Méditerranée.

Les taux de mélange avec l'eau de mer calculés varient de 0 à 16%. Ils montrent que l'Est de l'île de Djerba est la région la plus touchée par l'intrusion de l'eau de mer.

VII. CONCLUSION

L'ensemble des résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux de la nappe phréatique de Djerba a permis de mettre en évidence deux principales sources de minéralisation.

Au centre de l'île, les eaux ont des rapports Na^+/Cl^- proches de 1, des rapports Br^-/Cl^- inférieurs à celui de l'eau de mer, dévoilant que la dissolution des évaporites, est la principale source de minéralisation.

Cependant, dans les régions côtières, et plus particulièrement la côte Est de l'île, la baisse piézométrique causée par les prélèvements excessifs a engendré une intrusion des eaux marines. Ceci a été suggérée par les rapports ioniques ($Br^-/Cl^- > 1,5\%$, Na^+/Cl^- proche de 0,86 et Mg^{2+}/Ca^{2+} important), ainsi que par les

isotopes stables qui ont met en évidence l'alignement des points d'eau selon une droite de mélange avec les eaux de mer.

A la lumière de ces résultats et pour préserver les conditions d'alimentation en eau de la population de l'île de Djerba, et assurer une gestion durable des ressources en eau, il convient de limiter à court terme l'exploitation des eaux dans les régions côtières, d'établir un schéma de gestion des eaux souterraines et d'examiner les possibilités de recharge artificielle dans les secteurs les plus vulnérables à l'intrusion marine.

Références bibliographiques

- [1] Milnes E., Renard PH., 2004 - The problem of salt recycling and seawater intrusion in coastal irrigated plains: an example from the Kiti aquifer (Southern Cyprus). *Journal of Hydrology*, 288, pp 327-343.
- [2] Capaccioni B., Didero M., Paletta C., Didero L., 2005 - Saline intrusion and refreshing in multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. *Journal of hydrology*, 307, pp 1-16.
- [3] DE Montety V., Radakovitch O., Vallet-Coulomb CH., Blavoux B., Hermitte D., Vallès V., 2008 - Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta (Southern France). *Applied Geochemistry*, 23, pp 2337-2349.
- [4] Rosenthal E., Vinokurov A., Ronen D., Magaritz M., Moshkovitz S., 1992 - Anthropogenically induced salinization of groundwater: A case study from the coastal plain aquifer of Israel. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1992; 11: 149-171.
- [5] Pulido- Leboeuf P., 2004 - Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied Geochemistry*, 19, pp 1517-1527.
- [6] Cruz J.V., Sliva M.O., 2000 - Groundwater Salinization in Pico Island (Azores, Portugal): Origin and mechanisms. *Environmental Geology*, 10, 1181-1189.
- [7] Fakir Y., EL Mernissi M., Kreuser T., Berjami B., 2002 - Natural tracer approach to characterize groundwater in the coastal Sahel of Oualidia (Morocco). *Environmental Geology*, 43, pp197-202.
- [8] Bouchaou L., Michelot J.L., Vengosh A., Hsissou Y., Qurtobi M., Gaye CB., 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*, 2008; 352: 267-287.
- [9] Fedrigoni L., Krimissa M., Zouari K., Maliki A., Zuppi G.M., 2001 - Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie). *C. R. Acad. Sci. Paris* 332, pp 665-671.
- [10] Paniconi C., Khlaifi I., Lecca G., Giacomelli A., Tarhouni J., 2001-Modeling and Analysis of Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Eastern Cap-Bon, Tunisia. *Transport in Porous Media*, 43(1), pp 3-28.
- [11] Ben Hamouda MF., 2008 - Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères côtiers du Cap Bon : cas des nappes de la Côte Orientale et d'El Haouaria, Tunisie. *Thèse de doctorat en sciences agronomiques de l'Institut National Agronomique de Tunisie*.
- [12] Trabelsi R., Abid K., Zouari K., Yahyaoui H., 2011 - Groundwater salinization processes in shallow coastal aquifer of Djefara plain of Medenine, Southeastern Tunisia. *Environ Earth Sci.*, DOI 10.1007/s12665-011-1273-8.
- [13] Bouaziz S., 1995 - Etude de la tectonique cassante dans la plateforme et l'atlas saharien (Tunisie Méridionale) : Evolution des plaéochamps de contraintes et implications géodynamiques. *Thèse d'Etat. Faculté des Sciences de Tunis*, 485p.
- [14] Mamou A., Kassah A., 2002 - Eau et développement dans le sud tunisien Projet National mobilisateur « Potentialités et gestion de l'eau dans le Sud tunisien. *Cahier du C.E.R.E.S, Série géographique n°23.Centres d'études et de recherches économiques et sociales*. pp 249-267.
- [15] Khalili B., 1983 - Note pour la création d'un périmètre de sauvegarde pour la nappe phréatique de Jerba; Direction des ressources en eau. *Rapport interne, CRDA de Médenine DGRE*.
- [16] Teissier J.L., 1967 - Etude Hydrogéologique de la nappe phréatique de Djerba. *Rapport interne. CRDA de Médenine*, 32p.
- [17] Yahyaoui H., 1998 - Fluctuations piézométriques des nappes d'eau souterraines de Médenine. *Rapport interne, CRDA de Médenine*.
- [18] Pulido- Leboeuf P., Pulido-Bosch A., Calvache M. L., Vallejos A., Andreu J. M., 2003 - Strontium, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratios as tracers for the evolution of sea water into coastal aquifers: The example of Castell de Ferro-aquifer. *C.R.Geoscience* 335, pp 1039-1048.
- [19] Trabelsi R., 2009 - Caractérisation hydrogéologique et géochimique du système aquifère de la Djefara (Sud-Est tunisien): Modélisation et Intrusion marine. *Thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax*, 219p.