

## Etude géochimique et isotopique d'un aquifère phréatique côtier anthropisé: Nappe de Oussja-Ghar El Melah (Tunisie)

SAFOUAN BEN AMMAR<sup>1,3</sup>, JEAN-DENIS TAUPIN<sup>2</sup>, KAMEL ZOUARI<sup>3</sup>,  
MOHAMED KHOATMIA<sup>4</sup> & MOHAMED BEN ASSI<sup>5</sup>

1 ISCU, La Charguia II, Univ. de Carthage, Tunis, Tunisie

2 Hydrosociences, UMR 5569 (IRD, CNRS, UMI, UM2), Montpellier, France  
[taupin@msem.univ-montp2.fr](mailto:taupin@msem.univ-montp2.fr)

3 LRAE, ENI Sfax, Univ. de Sfax route de Soukra, Sfax, Tunisie

4 CNSTN, Sidi Thabet, Tunis, Tunisie

5 SONEDE, El Manar, Tunis, Tunisie

**Résumé** L'aquifère de la plaine de Oussja-Ghar El Melah en Tunisie (P = 500 mm/an), est constitué d'une cuvette côtière fluviatile Plio-Quaternaire, enserrée entre montagnes, zone marécageuse et mer. Durant les dernières décennies, urbanisation et activités agricoles se sont intensifiées, induisant une baisse de la piézométrie, processus amplifié par les années sèches, et une détérioration de la qualité de l'eau. Les premiers résultats chimique et isotopique (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H) des eaux ont montré une hétérogénéité des faciès salins ainsi que différentes origines possibles dans l'acquisition de la minéralisation. La dégradation de la qualité des eaux est plus importante dans les zones les plus irriguées marquées par de fortes teneurs en nitrates. Les teneurs en tritium montrent un renouvellement récent des eaux différenciant deux modes de recharge, rapide liée à l'infiltration des eaux d'irrigation et des eaux de ruissellement au niveau des rivières et plus diffuse constituée par l'infiltration directe des précipitations.

**Mots clés** aquifère côtier; Tunisie; hydrogéochimie; isotopes de l'eau; salinisation; âge de l'eau

### Geochemical and isotope study of coastal anthropogenic phreatic groundwater: Oussja-Ghar El Melah aquifer (Tunisia)

**Abstract** The coastal plain aquifer of Oussja-Ghar El Melah close to Bizerte in Tunisia (P = 500 mm/year) is composed of a detrital fluvial Plio-Quaternary basin, surrounded by a mountainous relief, the Mediterranean Sea and a marshy area. During recent decades, the urbanization of the plain, the development of the agricultural activities and the succession of dry years have led to a water-level lowering and groundwater quality degradation. Preliminary results from a geochemical and isotopic (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H and <sup>3</sup>H) study show different origins of groundwater with different geochemical characteristics indicating various possible origins in the acquisition of the mineralization. The degradation of water quality is larger in the most irrigated areas marked by high nitrate contents. The tritium data show a recent groundwater renewal with two different recharge modes: fast recharge due to the infiltration of irrigation water and runoff water, and diffuse recharge by direct infiltration of precipitation.

**Key words** coastal groundwater; Tunisia; hydrochemistry; water isotopes; salinization; water age

### INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, l'activité humaine et les changements climatiques ont largement modifié les cycles hydrologiques notamment en zones côtières, occupées par environ 50% de la population mondiale (Custodio & Bruggeman, 1987). En Tunisie, 75% de la population est urbaine et se situe majoritairement dans des villes du littoral.

Le bassin méditerranéen constitue une zone où l'abondance des eaux, la fertilité des terres et le climat doux sur les côtes, ont engendré une migration continue vers les zones côtières. Cette augmentation de population s'est traduite par un changement d'occupation des sols et surtout par un pompage intensif de l'eau souterraine afin de satisfaire une demande domestique toujours croissante mais surtout des besoins en eaux de plus en plus importants dans le domaine agricole. Cette demande est due à l'extension des terres cultivées et notamment au développement des cultures irriguées. Cette situation a engendré de graves conséquences sur les ressources en eau surtout phréatiques, marquées par une baisse des niveaux des nappes, qui peut localement être matérialisée par des processus d'intrusion marine et plus généralement par la dégradation de la qualité des eaux.

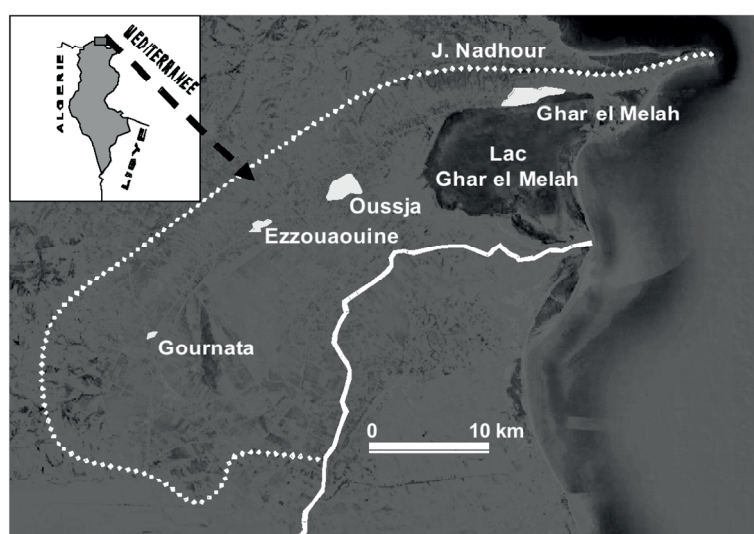
C'est ainsi le cas pour les nappes phréatiques des côtes orientales de la Tunisie qui connaissent depuis plusieurs années une dégradation quantitative et qualitative des eaux causées

principalement par la forte pression exercée sur la ressource pour satisfaire une demande en accroissement continu (Trabelsi *et al.*, 2007; Kouzana *et al.*, 2009). La nappe phréatique de Oussja Ghar Melah (OGM) objet de cette étude, est un exemple de nappe côtière soumise à des contraintes climatiques et anthropiques sévères.

## CONTEXTE GENERAL

### Données environnementales

La plaine côtière de OGM est située dans le NE tunisien, à environ 40 km au Nord de la capitale Tunis et 30 km au SO de Bizerte. Elle est limitée, par une série de montagnes se relayant du nord (Nadhour; 300 m) au Sud-Ouest (Kechabta; 400 m), et du côté Est, par la Méditerranée et la lagune de Ghar el Melah (Fig. 1).



**Fig. 1** Situation géographique de la zone d'étude.

Le climat de la région est de type semi-aride supérieur à hiver doux. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de  $500 \text{ mm.a}^{-1}$  et les températures moyennes sont modérées, variant entre  $11^\circ\text{C}$ ; en hiver et  $27^\circ\text{C}$  en été. Le fort contraste de pluviosité et de température entre un hiver doux et humide et un été chaud et sec, est atténué par la proximité de la mer.

La zone d'étude fait partie du bassin molassique du NE tunisien qui a été engendré au moment de l'importante subsidence au cours du Mio-Pliocène. Sur les reliefs de bordure qui correspondent à des structures monoclinales, affleurent des formations grésosableuses et argileuses attribuées au Mio-Pliocène, faisant plus de 260 m d'épaisseur au niveau du J. Nadhour (Burrolet, 1951). La zone basse de OGM correspond à une ancienne plaine deltaïque comblée par des dépôts fluviaux récents de la Medjerda suite au retrait de la mer. Les travaux de géophysique et les récentes études (Oueslati *et al.*, 2006) ont montré qu'il s'agit d'une structure synclinale constituée généralement par des alluvions détritiques (sablo-argileux et limoneux) d'âge Pliocène supérieur à Quaternaire, dont l'épaisseur varie de 100 à 300 m au sud de Gournata, environ 600 m à Oussja et dépasse 700 m en zone basse au voisinage de la lagune de Ghar el Melah. Ces dépôts récents constituent un réservoir hydrogéologique favorable où circulent les eaux de la nappe phréatique de OGM.

La plaine se caractérise par des altitudes faibles qui dépassent rarement 20 m aux piedmonts des montagnes, qui oscillent au centre de la plaine autour de 3 m, pour atteindre quelques décimètres seulement près de la mer et aux environs de la lagune de Ghar el Melah. Ces pentes topographiques faibles ont favorisé l'extension des terres humides et marécageuses dans la partie orientale aux environs de l'oued Medjerda et de la lagune de Ghar el Melah.

Le maraîchage sous irrigation domine de loin les pratiques agricoles. Toutefois, l'arboriculture et la céréaliculture sont majoritaires en zone de piedmonts. Les terres cultivées sont parfois

fortement réduites par l'urbanisation croissante des agglomérations locales (Gournata, Ezzouaouine, Oussja et Ghar el Melah) due au phénomène de périurbanisation en développement dans les zones proches de la capitale. Cependant quel que soit le type d'occupation des sol, la pression sur les ressources en eau a considérablement augmenté et notamment sur les nappes matérialisée par un nombre de puits toujours plus important.

### Hydrogéologie

L'aquifère de OGM se présente en structure synclinale comblée par d'épaisses couches de dépôts détritiques sablo-argileux et limoneux d'âge Plio-Quaternaire issus de défluviations successives de la basse vallée de Medjerda. Dans la région située à l'Est de la ville de Ghar el Melah (entre la montagne de Nadhour et la mer ou la lagune) où la largeur de la zone n'excède pas quelques centaines de mètres; La nappe se trouve dans les formations d'éboulis de pente du J. Nadhour. Elle est alimentée à partir de l'infiltration directe des eaux pluviales et des eaux de ruissellement centralisées dans les oueds descendant des reliefs de bordure vers la lagune notamment les oueds Saadane et el Kherba au Nord, l'oued el Melah dans la partie centrale et l'oued Tlil au Sud. L'écoulement global des eaux souterraines se fait selon une direction NO-SE. La zone basse traversée par la Medjerda et le lac de Ghar el Melah constituent l'exutoire naturel des eaux souterraines et de surface (Fig. 2). Le niveau statique de la nappe se trouve entre 60 à 70 m de profondeur dans les zones hautes aux piedmonts des djebels et passe à moins d'un mètre en zones basses de la plaine notamment sur les bordures de la lagune de Ghar el Melah. Les transmissivités mesurées sont faibles, 3 à  $9 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s au sud-ouest de la plaine et de 1 à  $5.5 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s aux environs de Oussja, en raison de la lithologie fine (abondance d'argile et de silts). Le bilan annuel d'exploitation est à ce jour proche de 13 Mm<sup>3</sup> (Bouzourra, 2009), dépassant largement les volumes de recharge naturelle estimés à 7 Mm<sup>3</sup>. La plus forte exploitation se situe dans la région de Oussja située entre Ezzouaouine et Ghar el Melah où l'on observe la plus grande concentration de puits dont la plupart sont équipés de motopompes.

Depuis quelques années, l'augmentation notable de la salinisation des eaux de la nappe OGM pourrait être un facteur limitant quant à leur utilisation et pourrait conduire aussi à une dégradation de la qualité des sols. La surexploitation des ressources pourrait également conduire à une invasion d'eaux marines sur les portions côtières. Afin de rechercher les principales causes de la salinisation des eaux de la nappe, une campagne d'échantillonnage a été entreprise entre mars et mai 2010 sur 60 points d'eau (dont une source) qui ont fait l'objet d'analyses géochimique (éléments majeurs et quelques traces) et isotopique (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H et <sup>3</sup>H).

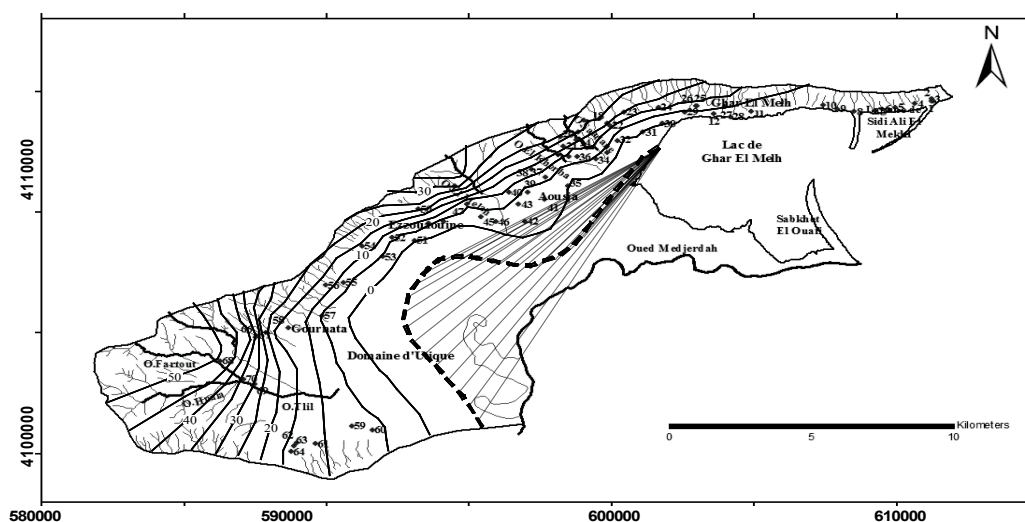


Fig. 2 Piézométrie de la nappe phréatique de Oussja Ghar el Melah (mars-mai 2010) et situation des points de mesure.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Qualité de l'eau et faciès chimique

La conductivité électrique (CE) des eaux montre de larges variations, plus de 60% des échantillons prélevés présentent des valeurs supérieures à 3 mS/cm. Géographiquement on peut distinguer trois zones:

- une première zone (A) située à l'Est de la ville de Ghar el Melah où CE oscille entre 3 et 8 mS/cm. Dans cette zone enserrée entre la lagune de Ghar el Melah et le djebel de Nadhour, l'aquifère est formé par les formations détritiques d'éboulis de pente. Le niveau de la nappe est très proche de la surface du sol et elle est parfois sub-affleurante.
- Une seconde zone (B) comprise entre la ville de Ghar Melah à l'Est et Gournata au Sud-ouest: Il s'agit de la région la plus cultivée notamment dans les zones basses où la faible profondeur (moins de 10 m) de la nappe facilite son utilisation, les valeurs de CE sont comprises entre 3 et 7.5 mS/cm. Dans les zones hautes situées entre Ghar el Melah et Oussja les valeurs de CE sont comprises entre 1 et 2.5 mS/cm pour des profondeurs de nappe entre 15 et 70 m.
- La troisième zone (C) est celle située à l'Ouest et au Sud de Gournata caractérisée par des valeurs de conductivité variant entre 1.5 et 3.5 mS/cm.

Le diagramme de Piper (Fig. 3) différencie une évolution d'un faciès chloruré sodique et calcique dans les parties hautes de la plaine et la zone C vers un faciès chloruré sodique caractéristiques dans la zone A et la zone basse de la région B autour de la lagune de Ghar el Melah.

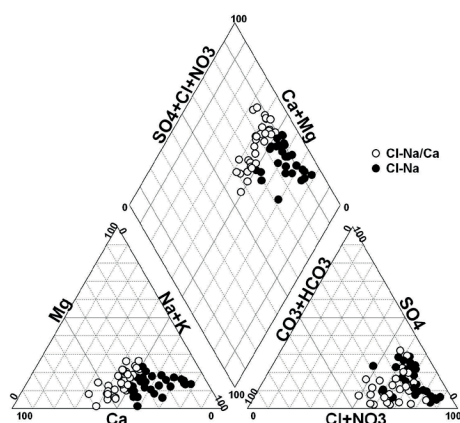


Fig. 3 Faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique de OGM.

Les faciès chimiques observés sont en relation directe avec la nature de l'encaissant et de la proximité du puits à la mer ou à la lagune. Le retour d'eau d'irrigation dans les zones basses fortement cultivées (nappe inférieure à 10 m) est aussi un facteur important conditionnant la qualité de l'eau souterraine localement. Les corrélations établies entre CE et concentrations en éléments majeurs montrent une bonne corrélation avec  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  ( $r^2$  respectifs de 0.93 et 0.83) éléments dominants qui contrôlent la charge saline. La forte présence des  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  dans les eaux chargées des zones côtières et dans la partie basse de la plaine entre Gournata et Ghar el Melah serait le résultat de la conjugaison de deux facteurs importants caractérisant la région d'étude: l'effet des embruns marins et des dépôts secs déposés sur le sol et le retour des eaux d'irrigation vers la nappe, l'intrusion marine directe étant peu probable; le niveau de la nappe restant plus élevé que le niveau marin.

### Origine des sels dans les eaux de nappe

En zone semi-aride les sels déposés dans la zone non saturée suite à l'évaporation des eaux pluviales et surtout celles utilisées pour l'irrigation, sont repris par dissolution au cours des

épisodes pluvieux suivants, en atteignant l'aquifère cela entraîne une augmentation de la salinité des eaux souterraines. Dans la zone étudiée, le retour des eaux d'irrigation est aussi confirmé par l'abondance des nitrates à des concentrations élevées, notamment dans la zone centrale (entre Gournata et Ghar el Melah), 40 à 136 mg/l (136 mg/l au puits N° 45). Ceci est le résultat de l'utilisation intensive d'engrais d'origines chimiques et animales dans la culture maraîchère fortement pratiquée ici. Le rejet des eaux usées domestiques dans des fosses septiques mal imperméabilisées contribue aussi à la contamination dans les zones les plus basses où le niveau de la nappe est proche du sol. Les fortes concentrations marquent ainsi beaucoup plus les zones où le niveau statique de la nappe est inférieur à 10 m en raison des activités agricoles plus intensives (Fig. 4).

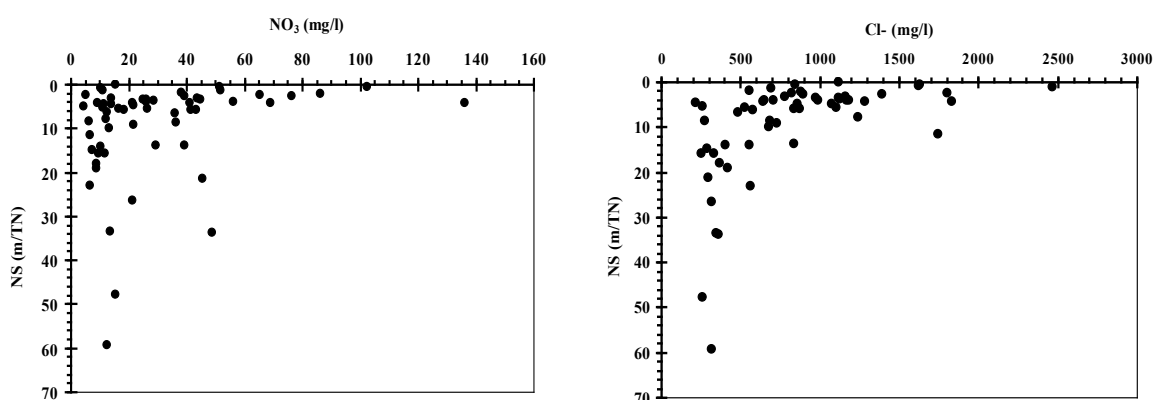


Fig. 4 Evolution des nitrates et chlorures en fonction de la profondeur du niveau de la nappe.

Dans les zones proches de la mer (Est de Ghar el Melah) et de la lagune, une grande quantité de sels riches en Na/Cl est déposée à la surface du sol sous forme d'embruns marins, voire de dépôts secs. En plus des autres processus décrits précédemment, ces dépôts peuvent être entraînés vers la nappe par lessivage, d'autant plus facilement en raison de la faible profondeur de la nappe et de la nature sablo-argileuse des sols favorisant une circulation rapide. L'origine marine des sels est confirmée par le rapport Br/Cl ( $22 \times 10^{-3}$ ), mesuré dans l'eau des puits proches de la côte et de la lagune en zone basse de la plaine (Freeman, 2007).

### Etude isotopique

Les données d'analyses isotopiques stables  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  (erreur d'estimation 0,05 et 0,8‰), issues de 31 points d'eau et analysés au Lama de Montpellier à l'UMR Hydrosociétés, montrent une large gamme de teneurs en isotopes stables variant entre  $-5.66$  et  $-2.97$ ‰ pour  $^{18}\text{O}$  et  $-32.3$  et  $-19.1$ ‰ pour  $^2\text{H}$ . Les teneurs moyennes sont de  $-4.63$  et  $-27.9$ ‰ pour  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  respectivement. L'excès en deutérium "d" est compris entre 2.1 et 13.2. Le tritium ( $^3\text{H}$ ) analysé au LRAE de Sfax, en complément, permet par sa présence d'identifier les eaux récentes à très récentes par rapport à son niveau atmosphérique naturel (station de Tunis, entre 5 et 10 UT - web GNIP) et par rapport au pic anthropique atmosphérique issu des essais nucléaires à l'air libre entre 1950 et 1963, localisés principalement dans l'hémisphère Nord, Etats Unis, Russie et Algérie.

Dans le détail, la composition isotopique des eaux de la nappe permet de distinguer trois types de réservoir d'origines différentes (Fig. 5):

- Une eau issue d'une infiltration directe des eaux pluviales (groupe G1) dont la composition isotopique varie entre  $-5.66$  et  $-5.15$ ‰ pour  $^{18}\text{O}$  et  $-32.3$  et  $-28.9$ ‰ pour  $^2\text{H}$ . Sur le diagramme  $^{18}\text{O}$  vs  $^2\text{H}$  les points représentatifs de ce type d'eau se placent sur et autour de la droite météorique locale ( $d = 11$ ) ne montrant pas d'évaporation significative avec un excès en deutérium en général supérieur à 10 (Celle-Jeanton *et al.*, 2001). Ces eaux caractérisent les échantillons issus des puits situés dans la zone aval de la plaine à l'Est de la ville de Oussja. Les faibles valeurs de tritium (inférieures à 1 UT) observées pour ces eaux indiquent, suivant

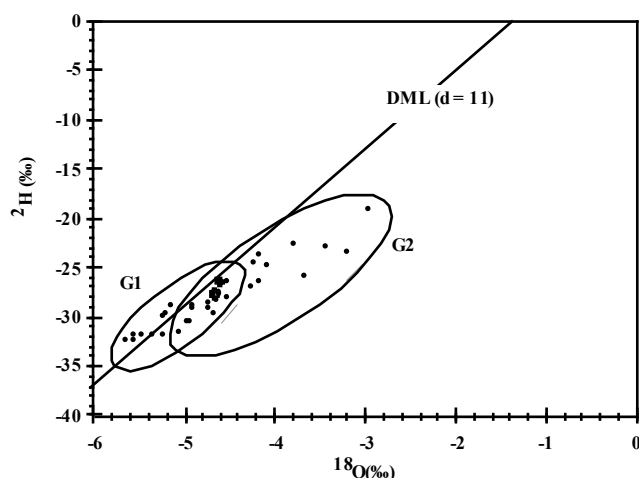


Fig. 5  $^{18}\text{O}$  vs  $^2\text{H}$  des eaux de la nappe de OGM.

le modèle d'âge utilisé, qu'elles sont issues d'une recharge aux alentours de 1950 (modèle piston flow) ou plus ancienne (modèle de mélange). En complément, des datations au carbone 14 seraient nécessaires pour confirmer la meilleure des deux hypothèses sur l'âge de ces eaux.

- Une eau à caractère évaporé issue d'une recharge par retour d'eau d'irrigation (groupe G2). Ce type d'eau dont la composition isotopique varie entre  $-4.26$  et  $-2.97$  pour  $^{18}\text{O}$  et  $-26.9$  et  $-19.1$ ‰ pour  $^2\text{H}$ , et dont l'excès en deutérium est inférieur à 10 caractérise les points d'eau situés en zone aval de la plaine où le niveau de la nappe est très proche du sol. Les teneurs en tritium de ce type d'eau varient entre 1.43 et 3.81 UT. Cette composition témoigne d'une eau à composante plus récente que la précédente (infiltration probablement entre 1950 et 1980).
- Une eau de composition isotopique, en oxygène 18 et deutérium, intermédiaire entre celles des deux groupes précédents. Ce type d'eau caractérise la partie médiane de la plaine entre Oussja et Gournata, ainsi que sa partie sud autour de l'oued Tlil. Les valeurs sont comprises entre  $-5.00$  et  $-4.00$ ‰ pour  $^{18}\text{O}$  et  $-32.0$  et  $-27.0$ ‰ pour  $^2\text{H}$ , alors que les teneurs en Tritium affichent des valeurs allant de 1.6UT à plus de 5UT. Les quatre points d'eau échantillonnés au centre de la plaine entre Oussja et Gournata (38, 50, 51, et 57) affichent les teneurs en tritium les plus fortes (entre 4 et 5UT), témoignant d'une composante récente (postérieure à 1980) et indiquant une recharge actuelle à partir des eaux pluviales au niveau des zones hautes de la plaine dans sa partie centrale.

## CONCLUSION

L'étude géochimique et isotopique des eaux phréatiques de la plaine de Oussja Ghar el Melah ont permis d'identifier les différentes origines possibles des eaux alimentant la nappe et d'expliquer l'effet de la forte anthropisation observée dans la zone d'étude. On a pu ainsi montrer que la dégradation de la qualité de l'eau souterraine est la conséquence directe d'une contamination engendrée par une activité agricole intense fortement consommatrice d'eau. Le retour d'eau d'irrigation dans la nappe engendre une salinisation des eaux par les fertilisants chimiques et organiques utilisés par les agriculteurs locaux, marquée par de fortes teneurs en nitrates notamment dans la partie centrale de la plaine très exploitée. Une autre fraction des sels mesurés dans les eaux de la nappe serait issue du lessivage des aérosols marins par les eaux pluviales. L'étude isotopique a permis en complément d'identifier les aires de recharge actuelle de l'aquifère et de distinguer entre différents types d'eau à transfert récent et plus ancien. Pour améliorer la compréhension des mécanismes de salinisation, les réguler et quantifier les origines des sels, des éléments traces spécifiques pourraient être utilisés, et pour une datation plus précise des eaux, l'usage de marqueurs anthropiques CFC ou SF6 voire  $^{85}\text{K}$ , permettraient un usage plus rationnel de la ressource en eau souterraine.

**REFERENCES**

- Bouzourra, H. (2009) Dédution des sources de salinité et modélisation de l'aquifère côtier de Ghar el Melah Oussja Kalaat Landlous. Mastère, ENIT.
- Burrolet, P. F. (1951) Etude géologique des bassins Mio-Pliocènes du Nord-est de la Tunisie (région de Mateur, Ferry Ville et Porto Farina). *Ann. Min. et Géol. (Tunis), 1ere série Geol. Gén. 7*, 1–91.
- Celle-Jeanton H., Zouari, K., Travi, Y. & Daoud, A. (2001) Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax. *C. R. Acad. Sci.* 333, 625–631.
- Custodio, E. & Bruggeman, G. A. (1987) *Groundwater problems in coastal areas (Studies and Reports in Hydrology)*, ed. UNESCO.
- Freeman, J. T. (2007) The use of bromide and chloride mass ratios to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwaters of the western Canadian sedimentary basin. *Hydrogeol. J.* 15, 1377–1385.
- Kouzana, L., Ben Mammou, A. & Sfar Felfoul, M. (2009) Seawater intrusion and associated processes: Case of the Korba aquifer (Cap-Bon, Tunisia). *CR Acad. Sci.* 341, 21–35.
- Oueslati, A., Charfi, F. & Bacchar, F. (2006) Presentation of the tunisian site: la basse vallée de oued Mejerda et la lagune de Ghar el Melah. In: *Fifth International Meeting INCO-CT-2005-015226*, Tunis.
- Trabelsi, R., Zairi, M. & Ben Dhia, H. (2007) Groundwater salinization of the Sfax superficial aquifer, Tunisia. *Hydrogeol. J.* 15, 1341–1355.