

Relation entre aquifère profond, nappes superficielles et intrusion marine dans le Bassin de Sfax (Tunisie)

MOUNA TAKROUNI, JEAN-LUC MICHELOT

FRE CNRS-UPS "OrsayTerre", Université de Paris-Sud, Bât. 504, F-91405 Orsay, France

AHMED MALIKI & KAMEL ZOUARI

Laboratoire de Radio-analyses et Environnement, ENIS, BP W, 3038 Sfax, Tunisie

Résumé Le bassin de Sfax (Tunisie) comporte des nappes de surface contenues dans les formations sableuses du Quaternaire et une nappe profonde logée dans les sables du Miocène supérieur. Les datations par ^{14}C sur la nappe profonde montrent que ces eaux sont anciennes, et leurs teneurs en isotopes stables (^{18}O et ^2H) reflètent une recharge sous des conditions paléoclimatiques plus froides que l'actuel. Les analyses isotopiques (^{34}S et ^{18}O) des sulfates dissous suggèrent que l'exploitation de la nappe profonde pour des besoins industriels au Sud du bassin pourrait induire un début de contamination des eaux profondes par l'eau de mer. Une drainance ascendante est possible depuis la nappe profonde, en charge, vers les nappes superficielles; cette drainance est confirmée par l'examen des teneurs isotopiques (^{18}O et ^2H) des eaux de quatre aquifères superficiels (Djebeniana, Hencha, Skhira et Chaffar).

Mots clefs aquifères; drainance; intrusion marine; isotopes; Sfax (Tunisie)

Key words groundwater; leakage; sea water intrusion; isotopes; Sfax (Tunisia)

INTRODUCTION

Largement sollicités, les aquifères phréatiques côtiers de la région du sahel de Sfax (Tunisie) sont menacés, ou même déjà contaminés, par l'intrusion marine. L'exploitation de la nappe profonde, qui contient des réserves considérables, semble indispensable pour répondre à des besoins industriels, agricoles et domestiques continuellement croissants.

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

Le bassin de Sfax occupe une large partie de la Tunisie orientale. Il est limité par les reliefs de "l'axe nord-sud" à l'ouest, la région de Mahdia au nord, Skhira au sud et se prolonge en mer Méditerranée à l'est jusqu'aux îles Kerkennah (Fig. 1). Cette région est caractérisée par une topographie de plaine, parsemée de collines dont l'altitude ne dépasse pas 200 m et de vastes cuvettes subsidentes occupées par des sebkhas.

Les affleurements répertoriés dans le secteur sont d'âges mio-pliocène et quaternaire. Ces derniers couvrent la quasi-totalité du bassin, alors que les terrains mio-pliocènes affleurent surtout au niveau de l'axe nord-sud, ainsi qu'à la limite sud-ouest et au nord du bassin.

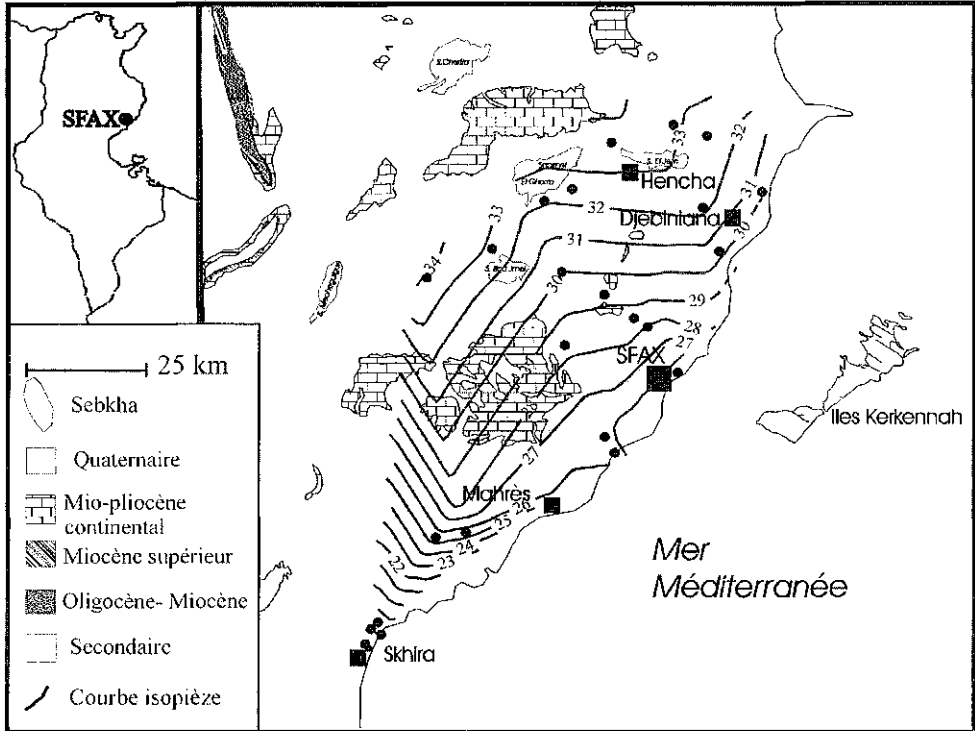


Fig. 1 Carte géologique simplifiée du bassin de Sfax et piézométrie de la nappe profonde de Sfax.

La nappe profonde de Sfax est logée dans ces niveaux mio-pliocènes constitués de séries sableuses de 50 à 100 m d'épaisseur. Elle est située à une profondeur comprise entre 250 et 600 m et s'étend sur une superficie estimée à 15 000 km². Les écoulements se font globalement du NE vers le SW depuis la zone de recharge, au niveau des reliefs de l'axe nord-sud vers la mer Méditerranée (région de Skhira). Le long du littoral ainsi qu'aux îles Kerkennah, la nappe est jaillissante; cet artésianisme a favorisé la mise en place de nombreux forages dans cette zone.

Le Sahel de Sfax comporte, en plus de la nappe profonde, 16 nappes superficielles recensées contenues dans les assises sableuses du Quaternaire ancien. Il s'agit d'aquifères multicouches, dont les horizons productifs sont séparés par des couches semi-perméables argilo-sableuses. Ces réservoirs présentent souvent des variations latérales de faciès et d'épaisseur (2 à 5 m) qui se manifestent par une irrégularité des paramètres hydrodynamiques. L'écoulement des eaux dans les nappes côtières se fait généralement du nord-ouest vers le sud-est, en direction de la Méditerranée. En revanche, dans certaines nappes situées à l'intérieur des terres, l'écoulement est endoréique, vers une sebkha. L'ensemble de ces aquifères superficiels fait l'objet de suivis piézométriques continus, qui révèlent des baisses du niveau piézométrique avec le temps pour la majorité des nappes. En raison de la position côtière de certaines des nappes (neuf), ces baisses piézométriques peuvent engendrer des intrusions marines. C'est en particulier le cas des nappes surexploitées pour les besoins de l'agriculture

locale, comme celle de Djebeniana. Pour cette étude, quatre nappes superficielles ont été sélectionnées : la nappe de Djebeniana au nord du bassin, deux autres nappes côtières moins exploitées (Chaffar au centre et Skhira au sud) et la nappe de Hencha, qui se situe au nord du sahel de Sfax, à l'intérieur des terres, et se déverse dans la sebkha d'El Jem.

TENEURS EN ISOTOPES STABLES DES EAUX DE LA NAPPE PROFONDE

Les eaux de la nappe profonde ont fait l'objet d'un suivi d'analyses isotopiques (^{18}O et ^2H) depuis 1994. Pour la dernière campagne d'échantillonnage (2000), les teneurs isotopiques de la majorité des eaux des forages sont comprises entre -6.5 et -5.5‰ vs SMOW pour ^{18}O et entre -43 et -38‰ vs SMOW pour ^2H . Pour l'ensemble des campagnes, les teneurs en ^{18}O varient entre -7.8 à -5.2‰ vs SMOW avec une moyenne proche de -6.2 , et les teneurs en ^2H entre -46 et -36.3‰ vs SMOW avec une moyenne de -44.8 . Dans un diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 2), les eaux de la nappe profonde forment donc un groupe très homogène, dont les points sont, pour la plupart, au dessous de la droite météorique mondiale (DMM, $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961) et à plus forte raison sous la droite des précipitations actuelles à Sfax (droite météorique locale DML, $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 13.5$; Maliki, 1999). D'autre part, les teneurs isotopiques moyennes de la nappe sont inférieures aux teneurs moyennes des précipitations actuelles (-4.4‰ vs SMOW pour ^{18}O et -24.7‰ vs SMOW pour ^2H ; Celle-Jeanton *et al.*, 2001). L'appauvrissement en isotopes lourds des eaux de la nappe profonde par rapport aux pluies actuelles pourrait être expliqué par un effet d'altitude (infiltration à une altitude plus élevée que l'altitude moyenne du bassin). Cependant, il n'existe pas, en bordure du bassin, de reliefs assez élevés pour engendrer un tel appauvrissement. En outre, cette hypothèse ne rendrait pas compte de la position des points dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (sous la droite météorique). Il est donc vraisemblable que les basses teneurs en isotopes lourds des eaux de la nappe profonde résultent d'un effet paléoclimatique (Maliki *et al.*, 2000): ces eaux se sont infiltrées sous un climat différent, plus frais que l'actuel.

TENEURS EN ^{14}C DES EAUX DE LA NAPPE PROFONDE

Les eaux de la nappe profonde de Sfax étant exemptes de tritium, l'étude des temps de séjour a été effectuée grâce au ^{14}C (Maliki, 1999) sur une quarantaine de forages: 20 échantillons présentent des activités en ^{14}C inférieures à 5 pmC (% de carbone moderne), 14 ont des teneurs comprises entre 5 et 10 pmC et seulement 7 affichent des teneurs entre 10 et 20 pmC. Ces basses valeurs d'activité correspondent à des âges apparents s'échelonnant entre 14 et 38 ka BP. Après application des modèles de correction des phénomènes d'échanges chimiques et isotopiques entre la phase liquide et la matrice (Ingerson & Pearson, 1964; Tamers, 1975; Evans *et al.*, 1979; Fontes & Garnier, 1979; Eichinger, 1983; Fontes, 1992), les "ages" obtenus sont systématiquement supérieurs à 10 ka BP, et atteignent 32 ka BP pour certains forages. Ceci confirme le caractère ancien des eaux de la nappe profonde de Sfax: l'essentiel de cette réserve s'est constitué avant l'Holocène.

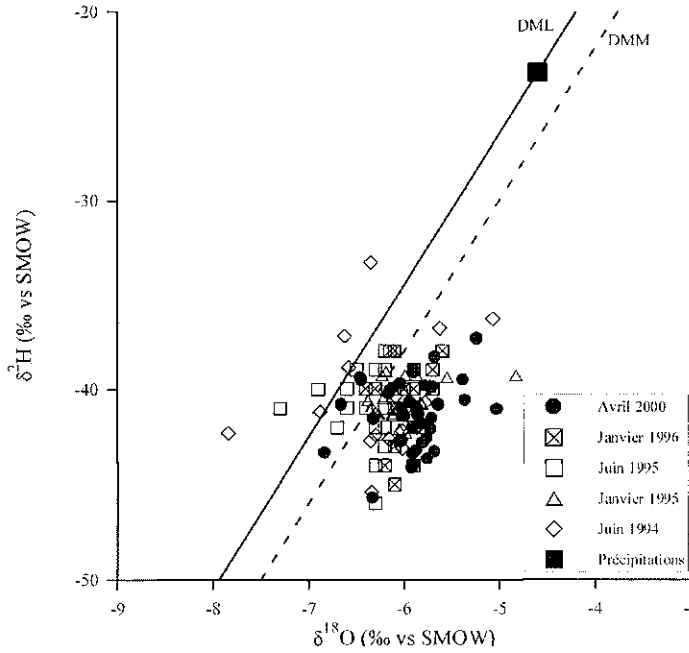


Fig. 2 Diagramme δ²H vs δ¹⁸O pour les eaux de la nappe profonde de Sfax.

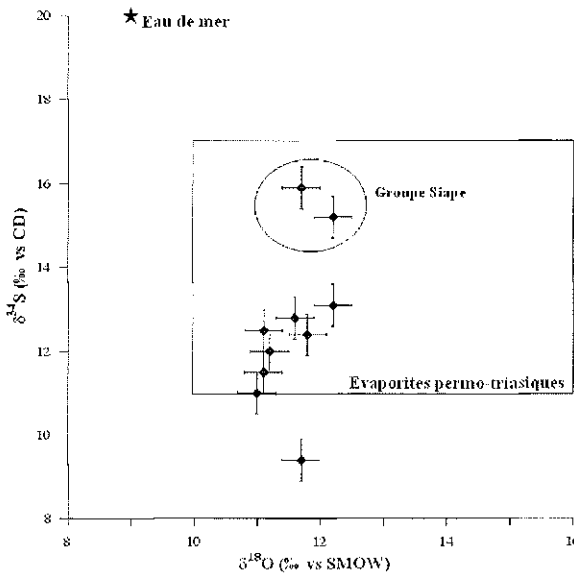


Fig. 3 Diagramme δ³⁴S vs δ¹⁸O pour les sulfates aqueux de la nappe profonde de Sfax.

TENEURS ISOTOPIQUES DES SULFATES DANS LA NAPPE PROFONDE

Les teneurs en ³⁴S et ¹⁸O des sulfates dissous ont été déterminées pour 11 échantillons. Le diagramme δ³⁴S vs δ¹⁸O (Fig. 3) met en évidence l'homogénéité des teneurs en ¹⁸O,

pour la plupart comprises entre 11 et 12‰ vs SMOW, alors que les teneurs en ^{34}S sont plus variables, de 9 à 16‰ vs CD. Les teneurs en isotopes lourds des sulfates de la plupart des prélèvements correspondent d'après la compilation de Claypool *et al.* (1980) à celles des sulfates des évaporites permo-triasiques. Les sulfates présents dans les eaux de la nappe pourraient donc avoir pour origine la dissolution d'évaporites d'âge permo-triasique, remaniées dans les dépôts continentaux du Miocène supérieur qui contiennent la nappe profonde de Sfax.

Les eaux des forages du groupe Siape (situés à Skhira), les plus minéralisées, se distinguent des autres par des teneurs en ^{34}S élevées (voisines de 15.5‰). Leur position dans le diagramme $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ suggère la contribution d'une source de sulfates à teneurs en ^{34}S plus élevées que les évaporites du Permo-Trias: il pourrait s'agir de l'eau de mer. Les diagrammes $\delta^{34}\text{S}$ vs $[\text{Cl}^-]$ et $\delta^{34}\text{S}$ vs $[\text{SO}_4^{2-}]$ (Fig. 4) vont dans le sens de cette hypothèse. Les eaux des forages Siape s'y inscrivent sur une tendance de mélange entre l'eau de mer et les autres eaux de la nappe et pourraient donc contenir pour partie une salinité d'origine marine.

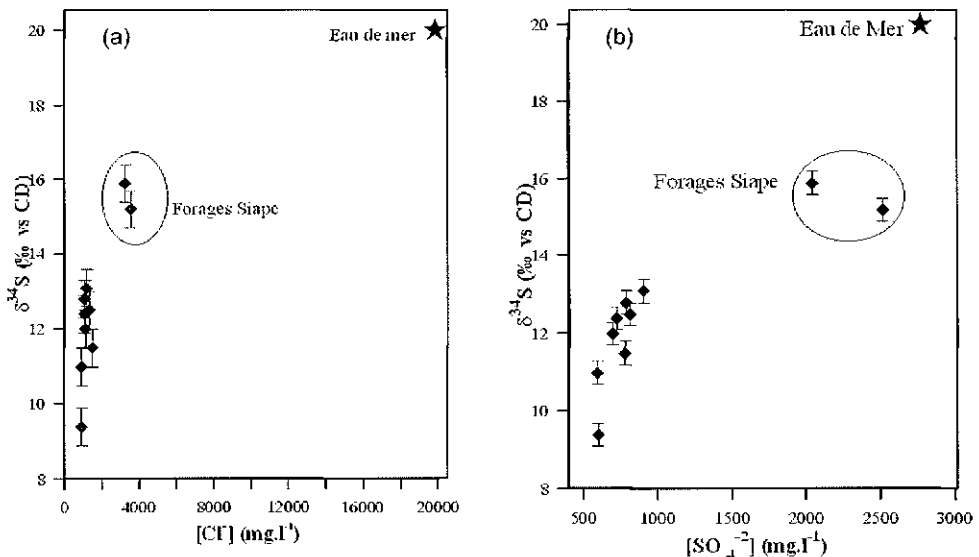


Fig. 4 (a) Diagramme $\delta^{34}\text{S}$ vs $[\text{Cl}^-]$ de la nappe profonde de Sfax; (b) Diagramme $\delta^{34}\text{S}$ vs $[\text{SO}_4^{2-}]$ de la nappe profonde de Sfax.

TENEURS EN ISOTOPES STABLES DES EAUX DES NAPPES SUPERFICIELLES

Les teneurs en ^{18}O et ^2H ont été déterminées pour 77 puits (25 puits à Djebeniana, 12 à Chaffar, 20 à Skhira et 20 à Hencha). Il s'agit pour la majorité de puits forés exploitant un ou plusieurs niveaux productifs des aquifères concernés.

Pour la nappe de Chaffar, les points sont situés sur le diagramme ^2H vs ^{18}O (Fig. 5) entre les teneurs des eaux de la nappe profonde et les teneurs moyennes des précipitations actuelles. Cette configuration peut être expliquée par l'existence de deux

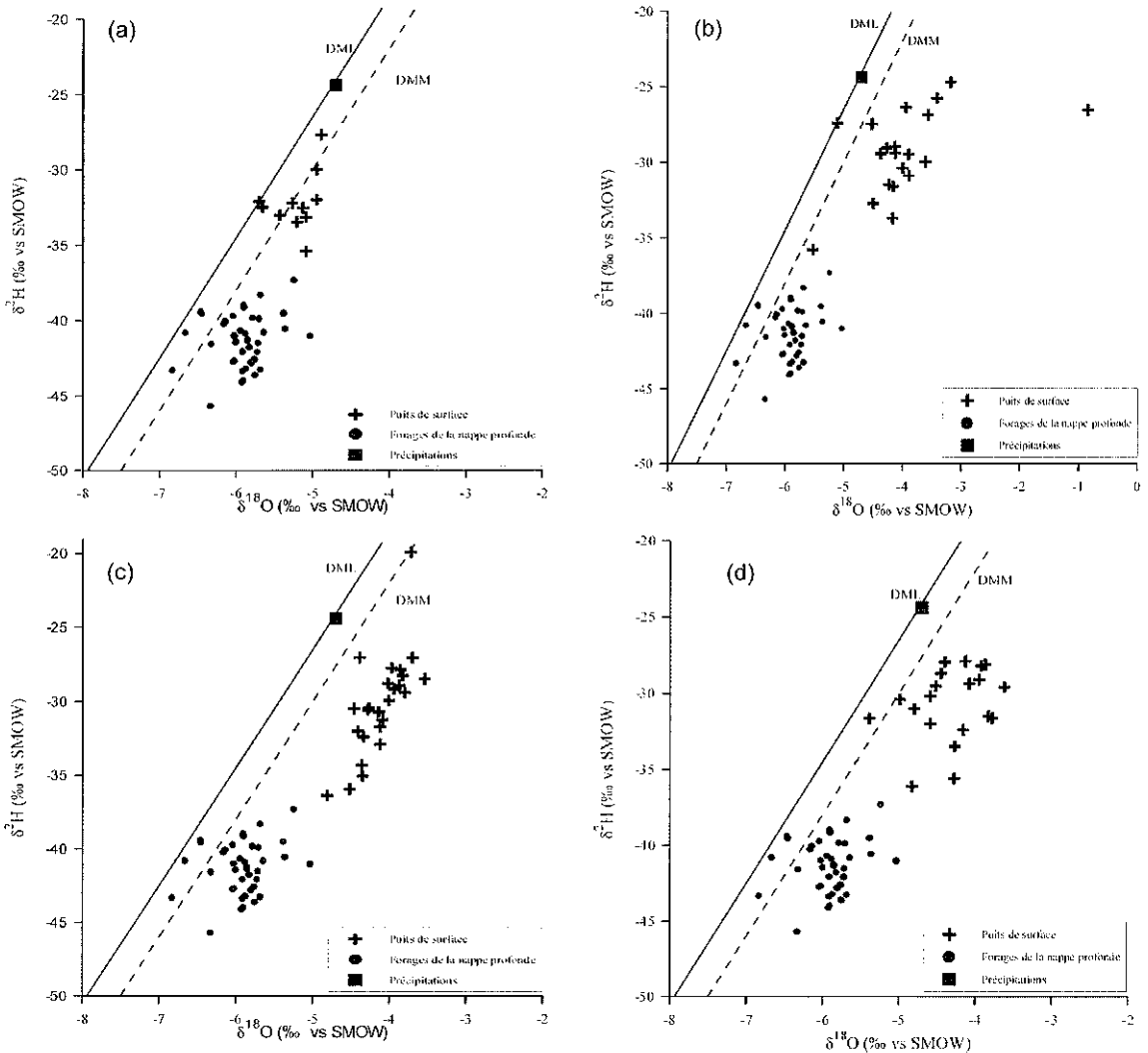


Fig. 5 Diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ des nappes superficielles du bassin de Sfax. (a) Nappe Chaffar; (b) Nappe Hencha; (c) Nappe Djebeniana; (d) Nappe Skhira.

pôles de recharge pour la nappe superficielle: les précipitations actuelles et une contribution de la nappe profonde. En effet, la différence de charge entre nappes superficielles et nappe profonde, accrue par l'exploitation des nappes superficielles, favorise une drainage ascendante. Un schéma identique peut s'appliquer aux autres nappes. Toutefois, soit les teneurs isotopiques des précipitations y sont modifiées par une évaporation lors de l'infiltration, soit un troisième pôle de mélange, l'eau de mer, intervient.

La participation des eaux profondes à la recharge des nappes superficielles peut être évaluée en établissant un bilan isotopique en ^{18}O et en ^2H , d'équation:

$$\delta_{\text{NS}} = x \delta_{\text{NP}} + (1 - x) \delta_{\text{P}}$$

ou x étant la fraction d'eau profonde, δNS , δNP et δP sont respectivement les teneurs isotopiques des puits des nappes superficielles, les teneurs moyennes de l'aquifère profond ($-5.9 \delta^{18}O$, $-41.3 \delta^2H$) et des précipitations ($-4.4 \delta^{18}O$, $-24.7 \delta^2H$). Après calcul, la nappe profonde participerait au maximum pour 69.5% dans l'alimentation de la nappe de Skhira, 70.5% pour celle de Djebeniana et 68% pour la nappe de Hencha. L'apport par la nappe profonde dans l'aquifère de Chaffar varierait entre 18.5 et 64.5%. Ce bilan doit être vérifié avec les résultats d'analyses chimiques (en cours), surtout pour les nappes côtières où l'on soupçonne une amorce d'intrusion marine. En combinant l'approche chimique et isotopique, il sera possible de définir plus finement les pôles de mélange participant à la recharge des nappes superficielles et de quantifier plus précisément leurs participations respectives.

REFERENCES

- 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. Paris* **333**, 625–631.
- Claypool, G. E., Hosler, W. T., Kaplan, I. R., Sakai, H. & Zak, I. (1980) The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulphates and their mutual interpretations. *Chem. Geol.* **28**, 199–260.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science* **133**, 1702–1703.
- Eichinger, L. (1983) A contribution to the interpretation of ^{14}C groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer. In: *Radiocarbon* (ed. by M. Stuiver & R. S. Kra) (Proc. 10th Int. ^{14}C Conf.), **25**(2), 347–356.
- Evans, G. V., Oplet, R. L., Downing, A. Monkhouse, R. A. & Rae, G. (1979) Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. In: *Isotope Hydrology II*, 6679–708. IAEA Publ., Vienna, Austria.
- Fontes, J.-C. & Garnier, J.-M. (1979) Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. *Water Resour. Res.* **15**(2), 399–413.
- Fontes, J.-C. (1992) Chemical and isotopic constraints on ^{14}C dating of groundwater. In: *Radiocarbon after Four Decades* (ed. by R. E. Taylor, A. Loug & R. S. Kra), 242–261. Springer Verlag, New York, USA.
- Ingerson, E. & Pearson, F. J. (1964) Estimation of age and rate of motion of groundwater by the ^{14}C method. In: *Recent Researches in the Fields of Hydrosphere. Atmosphere and Nuclear Geochemistry* (ed. by Maruzen), 263–283. Maruzen, Tokyo, Japan
- Tamers, M. A. (1975) Validity of radiocarbon dates on groundwater. *Geophysical Survey* **2**, 217–239.
- Maliki, A. (1999) Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique des eaux de la nappe profonde de Sfax. Thèse, université Tunis II, Faculté des sciences de Tunis, Tunisie.
- Maliki, A., Krimissa, M., Michelot, J.-L. & Zouari, K. (2000) Relation entre nappes superficielles et aquifère profond dans le bassin de Sfax. *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* **331**(6), 1–6.