

Apport de la géochimie isotopique à l'étude d'un système aquifère soumis à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : cas du système aquifère de Sfax (Tunisie).

Kamel Zouari et Zohra Hchaichi

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

I. INTRODUCTION

Dans les zones côtières, la demande importante et sans cesse croissante des eaux présente une pression sur les ressources hydriques puisque plus de 50% de la population mondiale vit dans des zones côtières. Cette situation est encore aggravée dans les zones arides et semi- arides où les eaux souterraines constituent souvent les seules ressources en eaux. En conséquence, le stress appliqué sur cette ressource souterraine conduit parfois à des changements irréversibles, dont la dégradation de la qualité et la contamination par les polluants constitue les principales menaces. C'est le cas des eaux souterraines du bassin de Sfax, qui occupe une large partie de la Tunisie orientale. En effet, largement sollicitées, les nappes du système aquifère de Sfax sont menacées, ou même déjà contaminées (surtout la nappe de surface), par l'intrusion des eaux marines.

Les ressources en eau du bassin de Sfax ont fait l'objet de nombreuses études pluridisciplinaires (hydrogéologiques, hydrochimiques et isotopiques) depuis plus de trois décennies [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Ces différentes études ont permis de distinguer trois principales formations aquifères : la première correspond à la nappe phréatique, elle représente le réservoir d'eau le plus accessible du bassin, mais elle est vulnérable à la pollution et à la surexploitation, la deuxième correspond à la nappe profonde du Miocène supérieur, la troisième récemment mise en évidence dans les niveaux intermédiaires, offre également d'importantes potentialités. Ces investigations hydrogéologiques ont été largement soutenues et complétées par des études combinées entre l'hydrochimie (éléments majeurs et quelques traces) et les isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{13}C , ^{14}C), en réponse à des contraintes naturelles et anthropiques sévères.

II. CADRE GENERAL

La zone d'étude fait partie de la Tunisie orientale. Elle est limitée à l'ouest par "l'axe Nord- Sud", la région de Mahdia au Nord, la région de Skhira au Sud et par la mer méditerranée, qui dessine sa façade maritime, à l'Est (fig. 1). La région est située entre les parallèles Nord $34^{\circ} 12'$ et $35^{\circ} 12'$ et les méridiennes $9^{\circ} 42'$ et $10^{\circ} 54'$ et elle forme une bande côtière qui s'étend sur environ 200 Km et un arrière-pays distant de 110 Km.

La pluviométrie dans la région de Sfax se caractérise par un régime complexe. En effet, les pluies présentent une importante variabilité et irrégularité dans le temps et dans l'espace. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 220 mm. La région d'étude est caractérisée par un régime thermique de type méditerranéen avec une température annuelle de l'air de l'ordre de 19°C . L'évapotranspiration est forte, elle est de l'ordre de 1200 mm/an.

III. APERCU GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIE

Le bassin de Sfax fait partie de la plateforme tunisienne, il est constitué surtout de sédiments tertiaires et quaternaires. Les études hydrogéologiques ont permis d'identifier trois nappes (Fig.2).

La nappe profonde, d'âge Miocène supérieur, a une puissance moyenne de l'ordre de 200 m. Elle est constituée essentiellement de sables et d'argiles et captée à des profondeurs allant de 220 à 700 m et

s'étend sur une superficie de l'ordre de 15000 km². Les écoulements se font généralement du NE, depuis les reliefs de l'axe nord-sud, vers le SW (région de Skhira). Le suivi de la piézométrie (de 1987 à 2011) a révélé une baisse moyenne annuelle acceptable, de l'ordre de 0,3m, malgré une exploitation sans cesse croissante. En effet, Les volumes exploités sont passés de 18 Mm³ en 1988 à environ 25 Mm³ en 2008.

Cette exploitation se fait par des forages (artésiens le long de la côte et captifs au centre du bassin), de plus en plus nombreux (30 en 1998 à 60 en 2008), destinés pour divers usages : agriculture (31%), industrie (55%) et domestique (14%).

Le système aquifère superficiel du bassin de Sfax est constitué de seize nappes superficielles, logées dans des assises sablo-argileuses du Quaternaire ancien et du Mio-Pliocène. Le réservoir est composé de plus d'un niveau productif, séparés entre eux par des niveaux semi-perméables, argilo-sableux, permettant leurs communications. Les formations ont un caractère alluvionnaire et possèdent une géométrie lenticulaire. Ce système aquifère représente des réserves très importantes, de l'ordre de 40 Mm³ en 2008, facilement accessibles mais très vulnérable à la pollution et à la surexploitation. En effet, l'exploitation actuelle a largement dépassée les réserves disponibles, environ 48,5 Mm³ (de l'ordre de 122 %)

L'écoulement des eaux se fait en général du Nord-Ouest vers le Sud-Est (mer Méditerranée) pour les nappes côtières, et devient endoréique (vers des sebkhas) pour certaines nappes à l'intérieur du bassin.

Les suivis piézométriques dévoilent des baisses continues des niveaux. Ces baisses sont très importantes pour certaines nappes, très sollicitées pour l'irrigation, et qui se trouvent à un stade très avancé de surexploitation. C'est le cas en particulier des nappes littorales de Djebéniana, de Chaffar et de Skhira. Cette situation a conduit à des intrusions marines, en particulier pour la nappe Djebéniana, située au nord du bassin. En effet, l'évolution piézométrique entre 1970 et 2002 [2, 10] montre clairement que, l'écoulement de la nappe qui s'effectuait suivant une direction WNW-ESE (avec des courbes isopièzes parallèles à la côte), subit un changement lié à la baisse piézométrique, témoignant ainsi des perturbations significatives des écoulements. Ces perturbations sont due à une recharge nettement inférieure aux volumes prélevés par pompage, conduisant à la mise en places de dépressions (jusqu'à -5m) et à une augmentation de la salinité des eaux de la nappe (valeurs pouvant atteindre 10 g/l, par endroit) (Fig. 3).

La nappe intermédiaire, récemment mise en évidence [9], est logée dans les formations sablo- argileuses et argilo-sableuses du Mio-Plio-Quaternaire. Elle se distingue par une lithologie hétérogène composée essentiellement par des sables argileux avec des intercalations de sables et de sables grossiers. Ceci constitue un système aquifère multicouche avec plusieurs niveaux de captage, séparés par des assises semi-perméables, permettant une éventuelle communication.

Cette nappe est captée à une profondeur se situant entre 80 m et le toit de la nappe profonde. La séparation entre les deux systèmes aquifères superficiels et semi profond se fait par des assises semi-perméables permettant une communication plus au moins importante entre eux.

Les ressources de cette nappe ont été estimées à 12 Mm³/an. L'écoulement des eaux souterraines s'effectue depuis les reliefs de l'axe Nord-Sud à l'Ouest et Nord Ouest (en particulier la région de Bled Regueb) vers la mer méditerranée qui représente l'exutoire naturel de la nappe.

IV. APPORT DE LA GEOCHIMIE ISOTOPIQUE ET DE L'HYDROCHIMIE

Les discussions des teneurs isotopiques de cet article se basent essentiellement sur de nombreux résultats obtenus dans le cadre de différentes études réalisées sur les eaux souterraines du système aquifère du bassin de Sfax depuis plus d'une décennie [8, 9, 11, 12, 13, 14, 15]. Les analyses isotopiques et hydrochimiques ont été réalisées au laboratoire de géochimie isotopique de l'Université Paris Sud, à Orsay, en France, au laboratoire d'hydrogéologie et de géochimie appliquée de l'Université de Turin, en Italie, et au laboratoire de Radio-Analyses et Environnement de l'Université de Sfax, en Tunisie.

L'interprétation de ces divers résultats isotopiques a permis, entre autres, de comprendre le régime des écoulements et des mécanismes de recharges des eaux des différentes nappes, de déceler les éventuelles relations et mélanges entre les nappes et d'appréhender les mécanismes de l'acquisition de la charge saline des eaux, et notamment celles logées dans les nappes superficielles côtières.

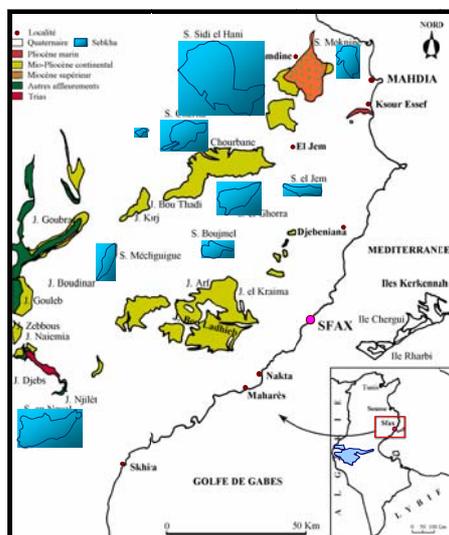


Figure 1.-Carte localisation de la zone d'étude.

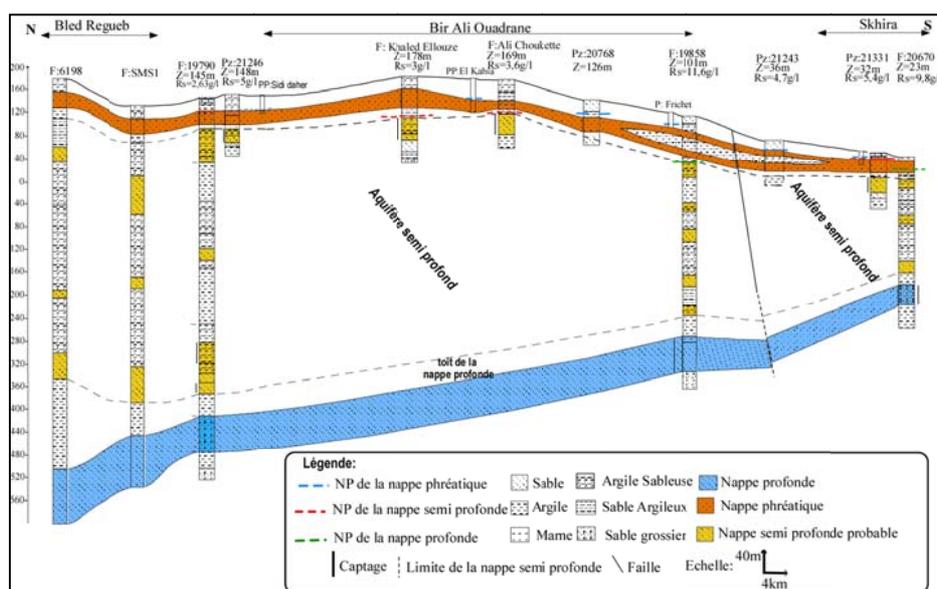


Figure 2- Coupe hydrogéologique Nord-Sud du bassin de Sfax

(a)

(b)

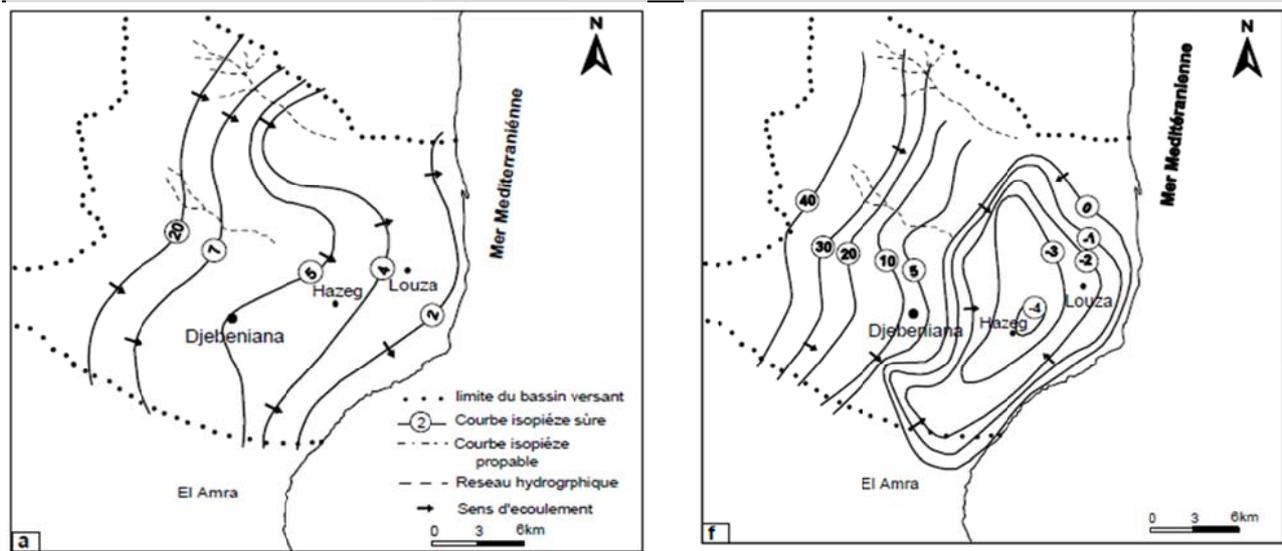


Figure 3 - Cartes piézométriques de la nappe de Djebeniana pour les années 1970 (a) et 2002 (b).

IV.1. Teneurs en isotopes stables des eaux du système aquifère de Sfax

Dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$, les points représentatifs des eaux du système aquifère de Sfax montrent trois groupes (Fig. 4):

- Le premier groupe correspond aux eaux du système aquifère phréatique qui affichent des teneurs en ^{18}O qui varient de -5,43 ‰ à -1,88 ‰ vs V-SMOW avec une moyenne de -4,3 ‰. Quant au deutérium, la valeur moyenne est de l'ordre de -30,2 ‰ vs V-SMOW avec une valeur maximale de -17,4 ‰ et une valeur minimale de -37,5 ‰ vs V-SMOW. Cependant, quelques points d'eaux affichent des teneurs plus appauvries en ^{18}O et en ^2H , très proches des teneurs isotopiques des nappes profonde et semi-profonde. Cette disposition des points pourrait être expliquée par deux pôles de recharge pour la nappe superficielle : le premier est assuré par les précipitations actuelles et le second par un apport par "drainance" ascendante des eaux des aquifères les plus profonds, qui se trouvent en charge par rapport aux niveaux superficiels. Cette différence de charge, en grande partie naturelle, mais encore aggravée par l'exploitation intensive de la nappe superficielle, favorise cet apport profond.

Cette "drainance" a été estimée, en se basant sur un bilan isotopique en ^{18}O et ^2H : $\delta^{18}\text{O}_{\text{ns}} = X \delta^{18}\text{O}_{\text{np}} + (1-X) \delta^{18}\text{O}_{\text{pr}}$, prenant en compte la composition isotopique des eaux de la nappe superficielle ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ns}}$), de la nappe profonde ($\delta^{18}\text{O}_{\text{np}}$) et des précipitations au niveau de la station de Sfax ($\delta^{18}\text{O}_{\text{pr}}$). Les résultats de ce bilan montrent que cette contribution profonde à la recharge de la nappe phréatique est variable, mais se montre importante par endroits, et peut atteindre jusqu'à 70%.

Cependant, il faut noter les différences enregistrées entre le bilan fait à partir des teneurs en ^{18}O et des teneurs en ^2H . Ceci peut être expliqué que, cette double contribution à la recharge n'est pas la seule à gérer les teneurs en isotopes stables de la nappe superficielle. Deux autres phénomènes sont à prendre en considération : l'évaporation et une contribution d'eau de mer. D'ailleurs, cette intrusion marine est mise en évidence surtout dans la nappe de Djebeniana dans le nord du bassin (voir plus loin).

- Le deuxième groupe concerne la nappe profonde. Les teneurs en ^{18}O varient de -6,8 ‰ à -5,09 ‰ vs V-SMOW avec une moyenne de l'ordre de -6,2 ‰ vs V-SMOW. Les teneurs en ^2H varient entre -43,9 ‰ et -38,05 ‰ vs V-SMOW, avec une moyenne de -40,5 ‰.

La comparaison des teneurs isotopiques moyennes des eaux de la nappe profonde avec les teneurs moyennes pondérées des précipitations (-4,7 ‰ en ^{18}O et -31 ‰ en ^2H vs V-SMOW) montre un écart significatif (proche de 1,5 ‰). Cet appauvrissement des teneurs de la nappe profonde, témoigne de la différence entre la température de formation des eaux de pluie actuelle à Sfax et celle des précipitations qui ont assuré la mise en eau de la nappe profonde [11]. Cette différence pourrait être expliquée par un effet paléoclimatique, suggérant que la recharge serait effectuée, en grande partie, sous un climat plus

froid que celui qui règne actuellement sur la région. Cette hypothèse de recharge ancienne est par ailleurs confirmée par l'absence de tritium dans les eaux, d'une part, et par les basses activités ^{14}C mesurées (correspondant à des âges supérieurs à 10 ka B.P), d'autre part.

- Le troisième groupe correspond au système aquifère semi profond. Les premières mesures effectuées [9] montrent des teneurs isotopiques s'échelonnant entre -6,04 ‰ et -4,22‰ vs V-SMOW pour ^{18}O et entre -37,8 ‰ et -29,96 ‰ vs V-SMOW pour ^2H , avec des teneurs moyennes de l'ordre de -5 ‰ pour ^{18}O et de -40 ‰ vs V-SMOW pour ^2H .

Dans le diagramme $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ la majorité des points représentatifs de la nappe semi profonde forment un groupe grossièrement homogène. Cependant, certains échantillons s'écartent de ce groupe en s'alignant sur la DMM, alors que d'autres se rapprochent davantage du groupe relatif à la nappe superficielle, avec des teneurs plus enrichies en isotopes stables. Ceci pourrait être expliqué par une meilleure perméabilité des formations au Nord du bassin, favorisant la communication entre la nappe intermédiaire et les niveaux de la nappe superficielle.

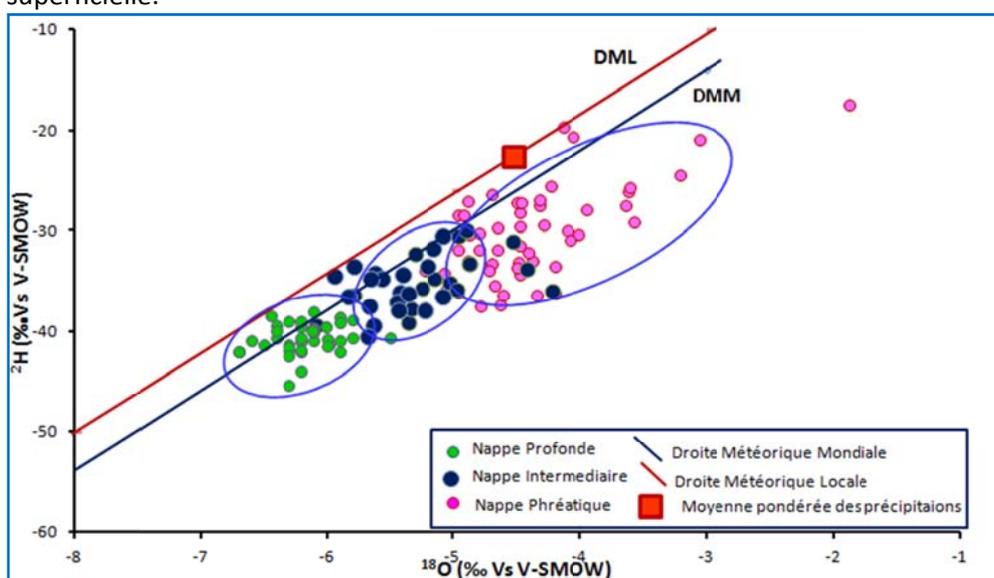


Figure 4: Diagramme $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ des eaux souterraines du système aquifère de Sfax.

VI.2. Détermination de l'origine de la minéralisation dans les eaux du bassin de Sfax

La détermination de l'origine de la minéralisation dans les aquifères côtiers, et notamment ceux soumis à des contraintes naturelles (climat aride à semi-aride et variabilité importante des hauteurs de pluie) et anthropiques (exploitation largement supérieur à la recharge), sollicite l'utilisation conjointe de la chimie (éléments majeurs et Bromure) des eaux et de l'oxygène 18. Cette approche a été appliquée sur les eaux superficielles côtières de la nappe de Djebeniana qui affichent des salinités beaucoup plus élevées par rapport aux autres nappes superficielles.

Les analyses hydrochimiques de la nappe de Djebéniana montrent des salinités allant de 2 à 10 g/l. Le calcul des indices de saturation des eaux vis-à-vis des espèces les plus communes dans ces régions, montre une saturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et du gypse et une sous saturation par rapport à l'halite. Le faciès chimique est chloruré sodique pour les eaux assez salées et sulfaté calcique pour les eaux les moins minéralisées. Ceci dénote de la complexité des processus hydrogéochimiques qui contrôlent l'acquisition de la charge saline de cette nappe.

L'utilisation combinée des rapports Br^-/Cl^- et des teneurs en oxygène 18 est un outil approprié permettant d'identifier et de quantifier les mélanges d'eau de différentes minéralisations. Cette combinaison appliquée sur les eaux de la nappe de Djebeniana a permis de mettre en évidence un mélange tripolaire : (i) pôle

relatif à la recharge actuelle par les eaux de pluie ; (ii) pôle correspondant à un apport ascendant à partir de la nappe profonde ; (iii) pôle lié à un apport latéral de l'eau de mer (Fig. 5).

Les pourcentages d'eau marine et d'eau profonde ainsi déterminés sont schématisés respectivement dans la figure 6 (A et B). Ils confirment que la contribution d'eau marine est plus élevée du côté de la mer, alors que le maximum de participation d'eau en provenance de la nappe profonde se range au centre du bassin [12]. Ce mélange avec l'eau de mer est en très bon accord avec les suivis piézométriques depuis plus de 30 ans.

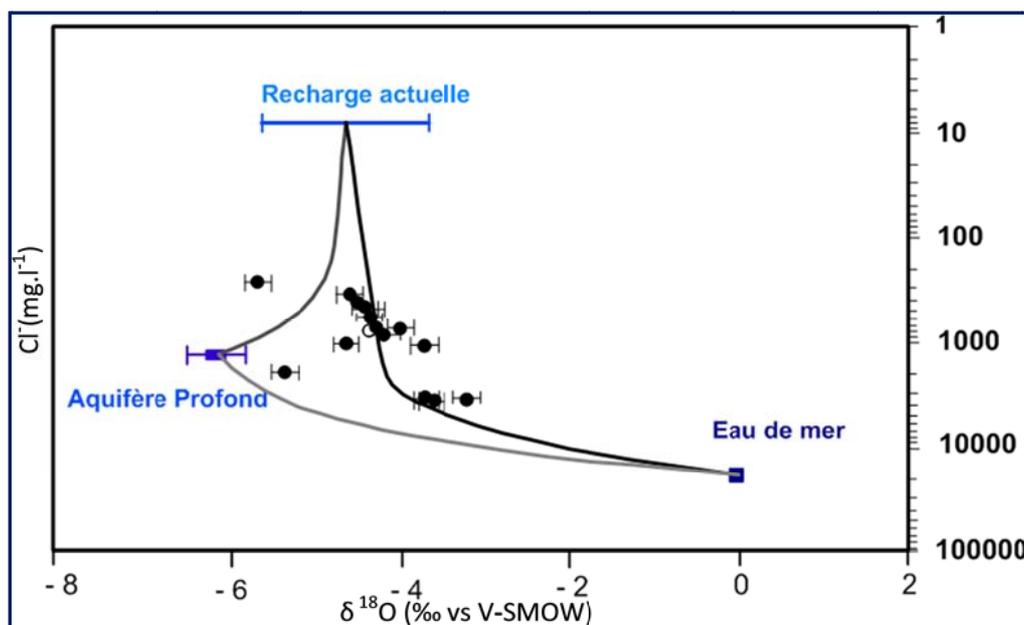


Figure 5- Relation $^{18}\text{O}/\text{Cl}^-$ des eaux de la nappe phréatique de Djebeniana, [12].

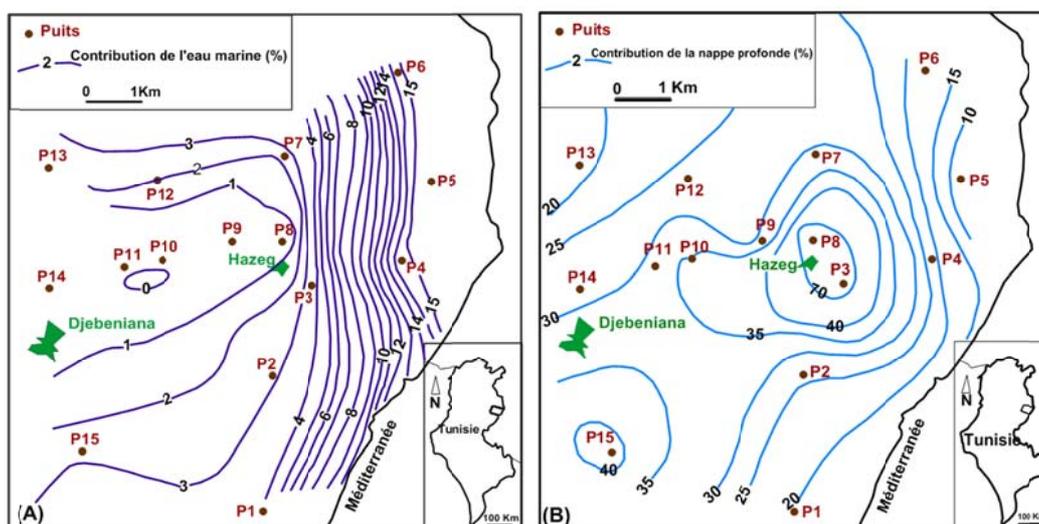


Figure 6. Contribution de l'eau de mer (%) (A) et de l'eau profonde (%) (B), [12].

IV. 3. Activités en ^{14}C des eaux du bassin de Sfax

Les activités ^{14}C mesurées dans les eaux des différentes nappes de Sfax montre que (Fig. 7):

- Les eaux de la nappe profonde affichent les plus faibles activités, allant de 5 à 20% de carbone moderne. Les datations, faites sur plus de 40 forages, montrent qu'un peu plus de la moitié des échantillons présentent des activités ^{14}C inférieures à 5%. Le reste des échantillons ont des activités comprises entre 5 et 20%. Ces faibles activités correspondent à des âges apparents situés entre 14 et 38 ka B.P. La correction de ces âges, en utilisant les différents modèles [16, 17, 18, 19], en tenant compte des

échanges chimiques et isotopiques entre l'eau et la matrice, a conduit à des "âges corrigés" supérieurs à 10 ka et pouvant atteindre 32 ka B.P. Ceci montre clairement que les périodes majeures de recharges de cette nappe remontent à la fin de l'Holocène et surtout pendant le Pléistocène supérieur. Cette origine ancienne des eaux, est en bon accord avec les teneurs en isotopes stables, très appauvries, et de l'absence totale du tritium.

- Les eaux de la nappe phréatique se distinguent par les activités ^{14}C les plus importantes (entre 55 et 75 %), ce qui met en faveur l'origine récente de ces eaux, à l'exception des deux piézomètres Oued Essrouj et Zaibat qui affichent des activités beaucoup plus faibles. Ces dernières plaident en faveur d'un mélange entre les eaux récentes et les eaux anciennes en provenance des aquifères profonds.

- Les quelques datations ^{14}C sur les eaux de la nappe semi-profonde [9] présentent deux groupes : un premier groupe caractérisé par des activités importantes (38 à 50%), qui pourraient être expliquées par une communication avec les eaux de la nappe superficielle (déjà fortement suggérée par les teneurs en isotopes stables), un deuxième groupe avec des activités relativement faibles (12 à 22%) et qui se rapprochent des activités de la nappe profonde Miocène.

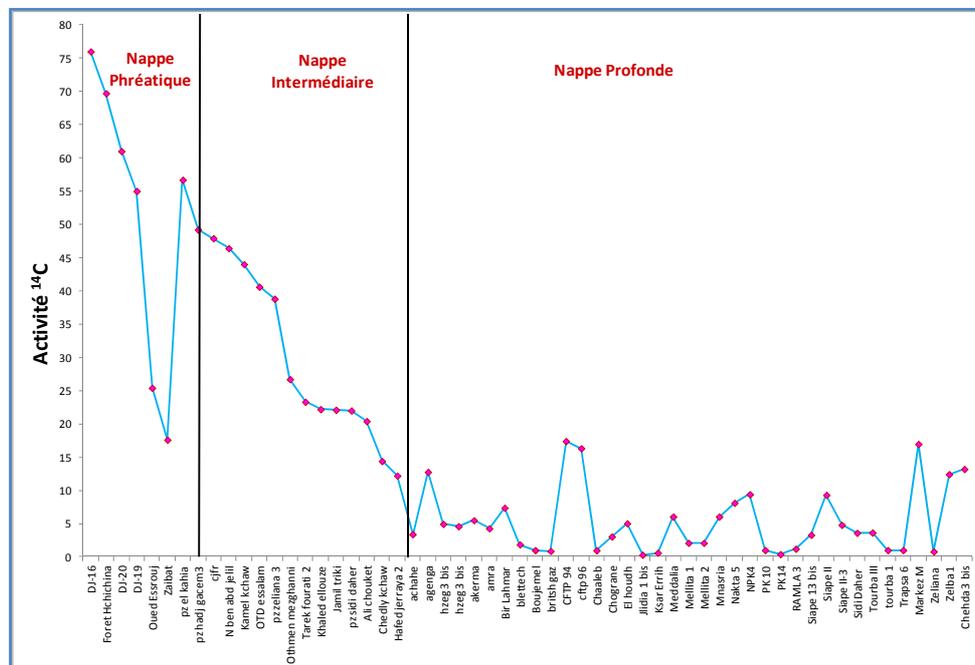


Figure 7. Activités ^{14}C des eaux du système aquifère de Sfax.

V. CONCLUSION

La combinaison des investigations hydrogéologiques et des traceurs isotopiques et chimiques sur les eaux du système aquifère du sahel de Sfax a permis d'apporter d'importantes informations, notamment la participation des eaux profondes aux nappes superficielles. La quantification de cet apport souterrain montre des valeurs variables, mais très importantes. En effet, cette contribution pourrait atteindre environ 70% dans la partie sud (Skhira et Chaffar) et environ 65% au Nord du bassin (Djebeniana et Hencha). Ces circulations verticales ascendantes sont favorisées par l'exploitation très avancée des nappes superficielles de ces régions, alors que les circulations horizontales dans la nappe profonde sont très lentes.

A cette contribution en provenance de la nappe profonde, prend place une participation latérale des eaux marines, identifiée surtout, dans la nappe de Djebeniana. En effet, la combinaison des éléments chimiques "conservés" et de l'oxygène-18 a permis de mettre en évidence cette contamination marine, qui contribue fortement à la minéralisation des eaux de la nappe (pouvant atteindre un maximum de 15%).

En outre, l'ensemble de ces résultats sont très utiles pour l'établissement des bilans hydrogéologiques des différents systèmes aquifères du bassin de Sfax et également pour être utilisés dans la modélisation des écoulements.

Références bibliographiques

- [1] El Batti J., et Andrieu, 1977- Etude hydrogéologique et géophysique du secteur Wadrane. *Rapport intern, DGRE.*
- [2] Hajjem A., 1980- Etude hydrogéologique de la région de Sidi Abid. *Rapport interne DRES, Tunis, n°8,632p.*
- [3] Hajjem A., 1985- Etude hydrogéologique préliminaire de la nappe de Chaffar. *Rapport interne C.R.D.A de Sfax, 33p.*
- [4] Gassara A., 1986 - Etude hydrogéologique du bassin de Bled Regueb. *Rapport interne C.R.D.A de Sfax, 101p.*
- [5] Zébid H., 1989 - Hydrogéologie de la nappe profonde de Sfax. *Rapport interne D.G.R.E. Tunis, 27p.*
- [6] Beni Akhy R., 1994 - Evolution et modélisation de la nappe phréatique urbaine de Sfax. *Mémoire de DEA, Faculté des Sciences de Tunis, 117 p*
- [7] Jeribi L., 1995 - Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe profonde de Sfax. *Projet fin d'étude. Ecole nationale d'ingénieurs. Sfax.*
- [8] Maliki A., 2000 - Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe profonde de Sfax (Tunisie). *Thèse Doctorat de l'Université de Tunis El Manar. 254 p.*
- [9] Hchaichi Z., 2008 - Etude hydrogéologique géochimique et isotopique du complexe intermédiaire de Sfax et sa relation avec le système phréatique du bassin Nord de Sfax. *Mastère, Ecole Nationale des Ingénieurs de Sfax, 116p.*
- [10] Trabelsi R., 2008 - Contribution à l'étude de la salinisation des nappes phréatiques côtières : cas du système de Sfax-Mahdia. *Thèse de doctorat. Faculté des sciences de Sfax. Tunisie, pp 170.*
- [11] Maliki A., Krimissa M., Michelot J.-L., Zouari K.,- Relation entre nappes superficielles et aquifère profond dans le bassin de Sfax (Tunisie), *C. R. Acad. Sci. Paris, série Ila 331 (2000) 1-6.*
- [12] 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), Earth and Planetary Sciences 332 (2001) 665-671.*
- [13] 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.*
- [14] Takrouni M., Michelot J L., Maliki A., Zouari K., 2003 - Relation entre aquifère profond, nappes superficielles et intrusion marine dans le Bassin de Sfax (Tunisie). *Proc.of Int.Symp.on hydrology of the Mediterranean and semiarid regions.IAHS publication 278.*
- [15] Takrouni M., 2003 - Origine de la salinité de la nappe côtière profonde de Sfax et sa relation avec l'intrusion marine. *Thèse de l'Université de Paris-Sud. Orsay.*
- [16] Eichinger L., 1983 - Contribution to the interpretation of ¹⁴C groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer. *Radiocarbon, ed. M. Stuiver & R. S. Kra, Proc. 10th Int. C Conf, 25(2),pp 347-356.*
- [17] Evans G. V., Otlet 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.*
- [18] Fontes J C., Garnier J M., 1979 - Determination of the initial ¹⁴C activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. *Water Resour. Res. 15(2), 399-413.*
- [19] Ingerson E., & Pearson F. J., 1964 - Estimation of age and rate of motion of groundwater by the ¹⁴C method. *In: Recent Researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry (ed. by Maruzen), 263-283. Maruzen, Tokyo, Japan*