

Approche géochimique de la vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan (Tunisie)

S. Ben Ammar^{1,2}, G. Favreau³, K. Zouari², C. Leduc³, R. Beji⁴ & J. M'barek⁵

¹ Centre National des Sciences et Technologies Nucléaires, 2020 Sidi Thabet - Tunisie
safouan_ammam@yahoo.fr

² Laboratoire de Radio-Analyses et Environnement, E.N.I Sfax, BP W 38 Sfax - Tunisie

³ IRD, Université de Montpellier 2, CC MSE, 34095 Montpellier cedex 5 - France

⁴ Commissariat Régional du Développement Agricole de Kairouan, Kairouan - Tunisie

⁵ Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux, 23 rue J. Nehru, Montfleury, 1008 Tunis - Tunisie

Résumé - En zone semi-aride du centre tunisien, la nappe phréatique de la plaine de Kairouan est fortement sollicitée pour l'irrigation ainsi que pour l'alimentation en eau potable. Ce réservoir aquifère d'importance régionale subit une pression anthropique accrue par une surexploitation des ressources (baisse accélérée du niveau de la nappe de plus de 20 m sur les dernières décennies) et par la construction d'un barrage en son amont le privant de sa principale source d'alimentation : les crues de l'oued Merguellil.

Les analyses chimiques (éléments majeurs et traces) et isotopiques (isotopes de la molécule d'eau et du carbone inorganique dissous) des eaux indiquent que la recharge de cet aquifère est tributaire des crues historiques de l'oued Merguellil. Les activités ¹⁴C et les âges corrigés des eaux de la nappe indiquent également la présence d'eaux plus anciennes datant d'environ 30.000 ans dans le NE du bassin, témoignant du faible taux de renouvellement de l'aquifère. A partir de la distribution spatiale des âges ¹⁴C, il est possible de présenter un modèle d'évolution de la vitesse d'écoulement en bonne concordance avec le schéma de sédimentation dans la plaine alluviale de Kairouan.

Les eaux souterraines et de surface montrent une bonne homogénéité de faciès chimique, généralement explicable par des processus d'interaction eau - roche plus ou moins aboutis. Cependant, des teneurs élevées en nitrates, localement supérieures aux normes OMS (45 mg.l⁻¹) sont courantes dans l'aquifère. Une approche par analyse isotopique des ions nitrates (N-15 / O-18, NO₃), a permis d'identifier différentes sources potentielles de contamination : engrais minéraux, engrais organiques, lessivage de l'azote minéral des sols (après déboisement et mise en culture). Du fait de l'intensification des pratiques, cette pollution azotée est susceptible d'avoir, à long terme, un impact croissant sur la ressource.

Contexte Général

La région d'étude représente la moitié nord de la plaine de Kairouan, traversée par l'oued Merguellil. Dans cette vaste plaine alluviale règne un climat semi-aride caractérisé par d'importantes irrégularités pluviométriques et de grandes amplitudes thermiques. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 300 mm.a⁻¹ en et l'évapotranspiration potentielle est proche de 1500 mm.a⁻¹.

La plaine de Kairouan correspond à une cuvette effondrée remplie de sédiments détritiques d'âge plio-quadernaire. Ces dépôts détritiques fluviaux s'organisent en couches lenticulaires plus au moins étendues. Les alluvions grossières (sables et graviers) sont concentrées aux débouchés de l'oued dans la plaine; les alluvions de texture moyenne et fine étant entraînées vers l'aval, mais lors des crues violentes, les alluvions sableuses peuvent être transportées plus loin dans la plaine ce qui explique l'existence de couches de sables alternant avec des niveaux argileux à proximité de la ville de Kairouan, située à l'aval du bassin (Fig. 1).

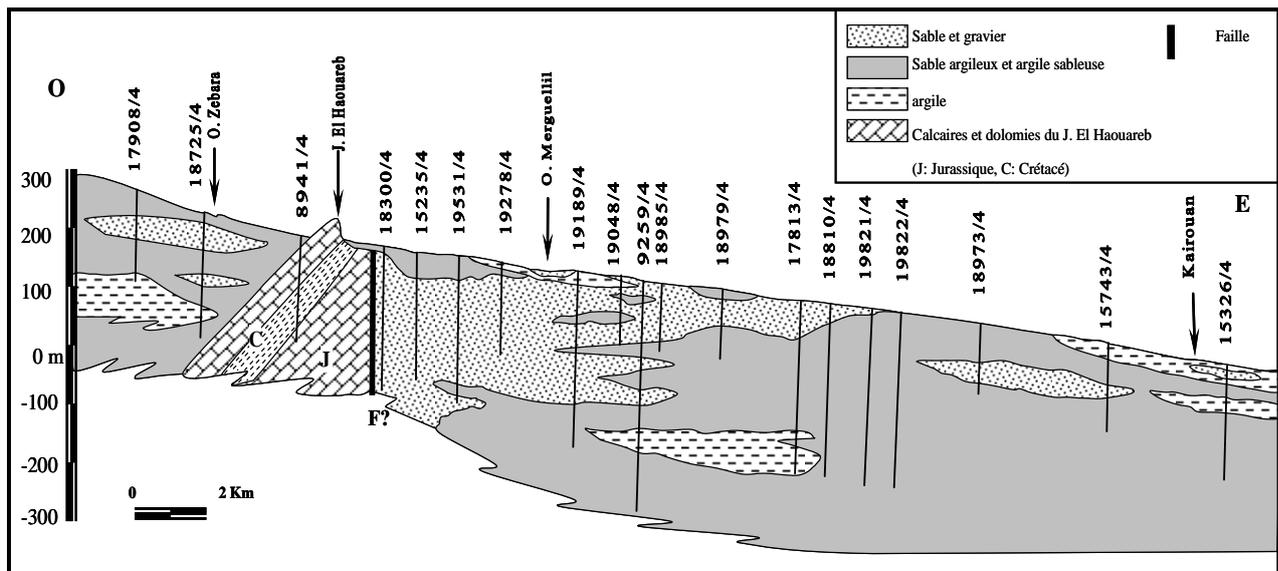


Fig. 1 : Corrélation hydrogéologique dans la plaine de Kairouan le long de l'oued Merguellil (Ben Ammar, 2007).

En régime naturel, l'alimentation de cette nappe phréatique provenait des crues de Merguellil, dont la dernière date de 1969. La forte anthropisation de la région (exploitation de plus en plus accrue de la ressource, construction du barrage El Haouareb à l'amont de la plaine) a largement modifié le fonctionnement hydrodynamique naturel de la nappe qui se trouve privée de sa principale source d'alimentation (Leduc et al., 2007). Depuis plusieurs années la nappe se trouve en état de surexploitation avancé, matérialisé par une forte baisse de la piézométrie dépassant dans certaines zones 1 m.a^{-1} . En régime artificialisé, l'unique source de recharge de la nappe se limitait aux débits de fuites actuelles du barrage El Haouareb, dont l'effet s'étend sur environ 7 km à son aval (Ben Ammar et al., 2006)..

Géochimie des eaux souterraines de la plaine de Kairouan

La nappe phréatique de la plaine de Kairouan a fait l'objet d'une multitude d'études hydrogéologiques dont la plupart se sont intéressées à la composante quantité : estimation de ressources, évolution piézométrique, modélisation hydrodynamique. L'étude de la qualité de et la caractérisation géochimique et isotopique des eau souterraines n'a été tentée que récemment par différentes équipes de recherche dont principalement le Laboratoire de Radio-Analyses et Environnement de l'ENI de Sfax et de l'IRD.

Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les missions d'échantillonnage et de mesures in situ de paramètres physico-chimiques ont été réalisées au début de l'année 2000. Elles ont intéressé des puits de surface et des forages avec différentes profondeurs de captage. Les températures mesurées sur le terrain oscillent entre $19,7 \text{ °C}$ et $26,8 \text{ °C}$. Les plus faibles valeurs caractérisent les puits de surface et les forages peu profonds (de 20 à 22 °C). Les pH sont légèrement basiques et oscillent entre 7 et 7,8. De larges variations de valeurs de conductivité et de minéralisation totale caractérisent les eaux souterraines de la plaine de Kairouan. Leur répartition spatiale (fig. 2) montre que la minéralisation totale évolue grossièrement suivant la ligne d'écoulement des eaux souterraines. Les plus faibles valeurs de résidu sec des eaux souterraines sont enregistrées au niveau des points d'eau les plus proches du lit de l'oued Merguellil dans la partie amont et médiane de la plaine. Dans la zone aval et en s'approchant de la sebkha d'El Kalbia qui constitue l'exutoire naturel des eaux souterraines, la minéralisation des niveaux superficiels

captés par puits de surface, augmente considérablement et dépasse 4 g.l^{-1} . Cette augmentation est due au double effet de la forte évaporation qui affecte les eaux situées à faibles profondeurs et au changement du faciès lithologique de l'encaissant matérialisé par un passage progressif de sables francs à des argiles gypseuses. Dans cette même zone aval, aux alentours de la ville de Kairouan, les eaux issues des forages profonds sont moins chargées (environ 2 g.l^{-1}). Ils captent des formations sableuses plus profondes et captives, isolées des niveaux superficiels salés par une couche argileuse imperméable d'environ 50 m d'épaisseur. De fortes valeurs de résidu sec (environ 3 g.l^{-1}) sont aussi mesurées au niveau des points d'eau situés aux piedmonts nord de Drâa Affène; structure anticlinale séparant le bassin de Merguellil et celui du Zeroud situé au Sud de la plaine. Un changement de faciès de la formation aquifère, couplé à un contact prolongé avec l'encaissant par suite d'un temps de séjour assez important des eaux (eaux plus vieilles) seraient à l'origine de telle anomalie de salinité.

Dans la région d'El Grine et Chebika, située autour et à l'Est du point de rencontre d'oued Chrichira et Merguellil, les isocônes font ressortir l'effet de la surexploitation causée par une batterie de forages destinés pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Dans cette zone est d'une grande productivité et de meilleure qualité des eaux souterraines on trouve la plus grande densité des forages et puits de surface. Le pompage intensif engendre un appel d'eau à plus forte salinité à partir de niveaux profonds et plus chargés.

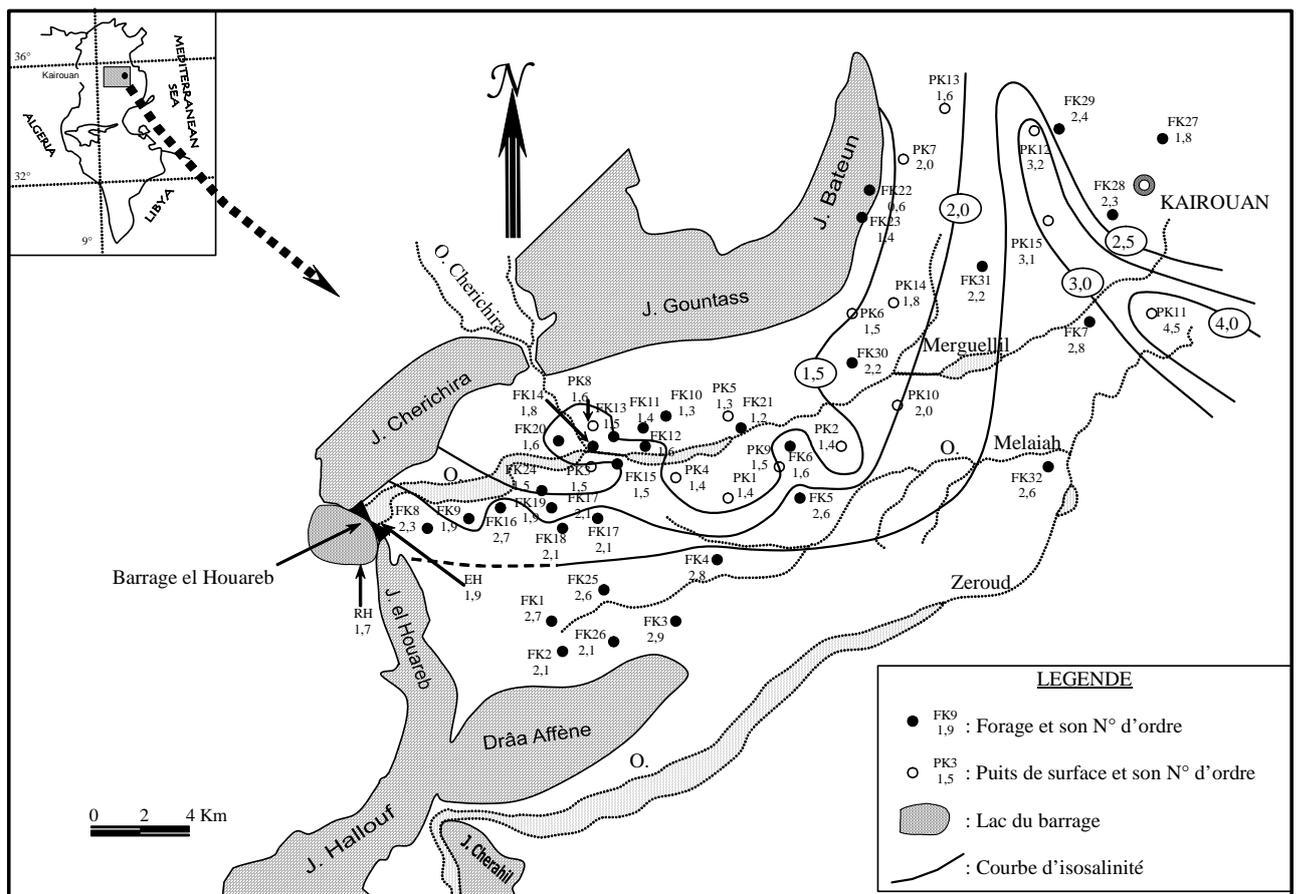


Fig. 2 : Situation des points de prélèvement et évolution spatiale de la salinité (RS en mg.l^{-1}) dans la plaine de Kairouan

Les eaux souterraines et de surface (retenue du barrage et émergences) se caractérisent par une bonne homogénéité de faciès chimiques (fig. 3). Dans l'ensemble il s'agit d'un faciès de type Na-Ca-Cl-SO₄. Cette parenté chimique entre les eaux actuelle de l'oued (barrage El Haouareb) et les eaux souterraines indique que les crues historique du Merguellil constituaient la principale source de recharge de la nappe.

Les sulfates représentent l'élément le plus abondant dans la minéralisation des eaux souterraines. Les valeurs de SO₄²⁻ varient de 3 méq.l⁻¹ à 27,1 méq.l⁻¹. Les valeurs des indices de saturation vis-à-vis des minéraux sulfatés (gypse et anhydrite) indiquent une sous-saturation vis-à-vis de ces deux minéraux, suggérant leur dissolution lors de l'infiltration comme origine des sulfates dans les eaux souterraines.

Les chlorures constituent un deuxième pôle dominant dans la composition anionique des eaux souterraines du bassin de Merguellil. Leurs concentrations varient de 2,5 méq.l⁻¹ à 40 méq.l⁻¹. La bonne corrélation entre les ions Na⁺ et Cl⁻ témoigne d'une même origine des ces deux éléments qui serait la dissolution de la halite (NaCl) au cours de la circulation des eaux en surface dans le lit de l'oued Merguellil et encore en transitant dans la formation aquifère. Il s'agit probablement d'un lessivage des sels accumulés en surface issus d'une évaporation des eaux de ruissellement ou d'irrigation. Le sodium est l'élément dominant du côté des cations avec des concentrations variant entre 4,65 et 26,1 méq.l⁻¹.

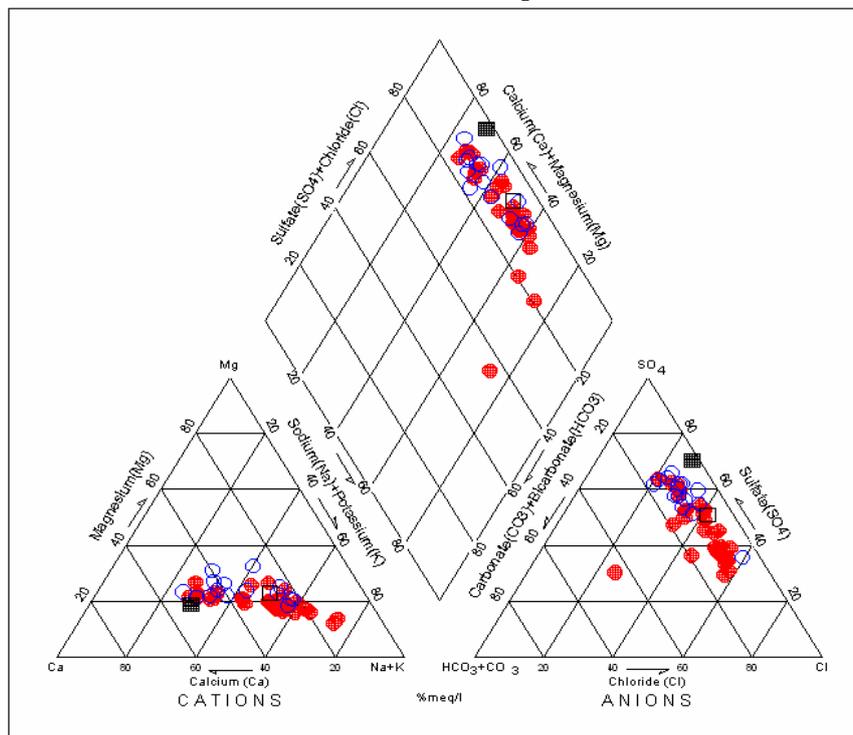


Fig. 3 : Diagramme Piper des eaux souterraine et de surface (barrage).

Les eaux du bassin de Merguellil sont saturées vis-à-vis des principaux minéraux carbonatés notamment la calcite et la dolomite. Il est donc probable qu'ils soient à l'origine des bicarbonates contenus dans les eaux souterraines.

Les teneurs en calcium et en magnésium varient respectivement de 1,35 à 18 méq.l⁻¹ et de 1,15 à 21,5 méq.l⁻¹. Ces deux éléments interviennent dans plusieurs processus géochimiques tels que la dissolution et la précipitation secondaire des carbonates, l'échange cationique avec les minéraux argileux et la dissolution des minéraux gypseux (Edmunds et al., 2003).

Les nitrates

Les nitrates (NO_3) sont présents partout dans la plaine de Kairouan avec des teneurs variant de 2 à plus de 100 mg.l^{-1} . Les plus faibles valeurs caractérisent les forages profonds situés dans l'extrême aval de la plaine, là où le niveau de la nappe est le plus profond (60-70 m). De plus fortes concentrations en NO_3 sont enregistrées dans les points d'eau de moindre profondeur de captage, situés dans la partie centrale de la plaine, où les cultures irriguées sont bien développées avec une forte densité de points d'exploitation et aussi où le niveau de la nappe devient de mois en mois plus profond.

La forte anthropisation de la plaine induisant une sollicitation intense de la nappe devait aggraver l'augmentation de la minéralisation des eaux suite à l'accroissement de l'exploitation et le développement des terres cultivées. L'utilisation abondante de fertilisants azotés conduit aussi au dépassement des teneurs en nitrates autorisées par les normes de l'OMS; ceci tend à limiter par la suite l'utilisation des eaux souterraines dans le domaine domestique et/ou touristique, une grande partie des eaux de la plaine de Kairouan étant destinées à l'alimentation en eau potable de Kairouan et des grandes villes côtières (Sousse, Monastir et Mahdia).

Une approche par analyse isotopique des ions nitrates ($^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$ et $^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$), s'est révélée utile pour identifier les différentes sources potentielles de contamination azotée et déterminer l'origine de la pollution des eaux. Les 9 analyses isotopiques des ions nitrates effectuées (équipe IRD) suggèrent une origine complexe, en partie seulement liée aux intrants agricoles. Une pollution provenant de fèces organiques du bétail, fortement utilisés par les agriculteurs locaux ainsi que de déchets domestiques semble également significative dans quelques échantillons (fig. 4). En l'absence de réseau d'assainissement, les habitants de la plaine (agriculteurs) ont en outre largement recours aux fosses septiques individuelles.

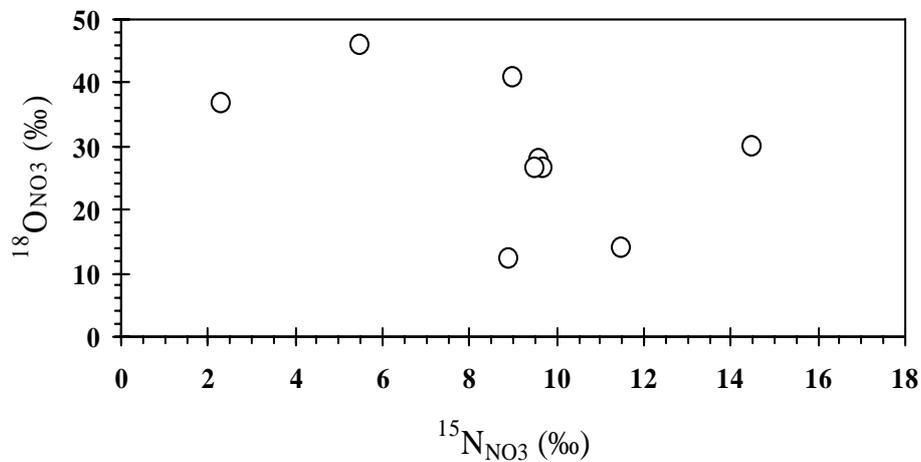


Fig. 4 : Relation $^{15}\text{N}/^{18}\text{O}$ des nitrates (NO_3) dans les eaux de la plaine de Kairouan.

Caractérisation par les isotopes de l'eau et du carbone inorganique dissous

Les études hydrogéologiques antérieures de la plaine de Kairouan (Besbes, 1975 ; Chaieb, 1988 ; Nazoumou, 2002) ont considéré que les crues du Merguellil représentaient l'essentiel de la recharge de la nappe ; l'infiltration des eaux pluviales tombant sur la plaine et les apports des reliefs bordiers étant faibles ou nuls. Depuis la construction du barrage El Haouareb en 1989, les eaux du Merguellil n'atteignent plus la plaine de Kairouan et la nappe se trouve ainsi privée de ses apports majeurs. La formation karstique sur laquelle est construit le barrage joue actuellement le rôle d'intermédiaire du transfert d'eau souterraine à partir de la nappe de Ain El Beidha et de l'eau de fuite de la retenue du barrage.

L'étude de l'ensemble barrage-nappe et l'impact des eaux d'infiltration de la retenue du barrage El Haouareb sur la recharge de la plaine de Kairouan a fait l'objet d'étude isotopique (^{18}O , ^2H et ^3H) constituant une première ébauche de l'évaluation de l'impact des fuites du barrage sur la recharge de la nappe (Ben Ammar et al., 2006).

Les isotopes stables (^{18}O et ^2H)

Dans la plaine de Kairouan, les teneurs en isotopes stables des eaux souterraines s'étalent entre -5,92 et -3,14 ‰ pour ^{18}O et -41,60 et -21,80 ‰ pour ^2H , avec des moyennes respectives de -5,13 ‰ et -32,60 ‰ (fig. 5). Les plus fortes valeurs proviennent de la partie amont de la plaine, près du barrage El Haouareb (FK8 et F1), zone caractérisée par une forte variabilité des teneurs isotopiques à cause des apports d'eau à faciès isotopique plus enrichi par infiltration des eaux de fuites du barrage (Ben Ammar et al., 2006). La tendance à l'enrichissement en isotopes lourds décroît vers l'intérieur du bassin en fonction de la distance au barrage. Les premiers points d'eau situés jusqu'à environ 7 km à l'aval du barrage se distinguent par un cachet isotopique nettement plus enrichi par rapport au reste des eaux de la plaine, suggérant une alimentation induite par les eaux de fuites du barrage.

Ailleurs, la composition isotopique de la nappe est plus homogène. Cependant le cachet isotopique des eaux souterraines diffère de celui des précipitations de Kairouan ; mais rappelle les précipitations du bassin amont du Merguellil. Ceci confirme, d'une part, que l'essentiel des eaux infiltrées dans la plaine de Kairouan provenait des anciennes crues d'oued Merguellil formées à l'amont du bassin et, d'autre part, que les reliefs bordiers de la plaine ne contribuent que de manière très accessoire à l'alimentation de l'aquifère.

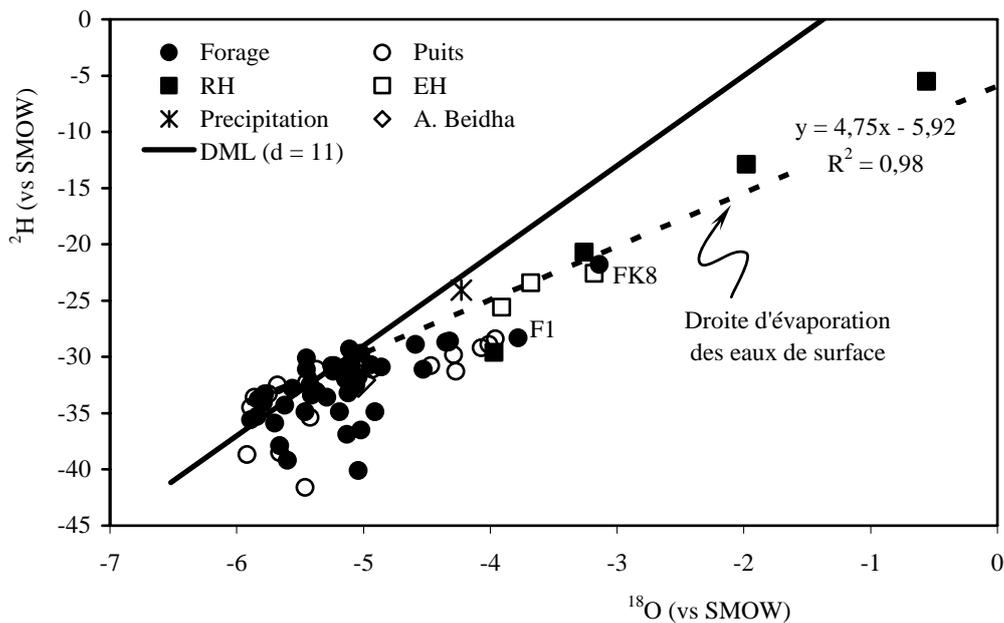


Fig. 5 : Diagramme $^{18}\text{O} / ^2\text{H}$ des eaux de la plaine de Kairouan.

Le tritium (^3H)

Les eaux du bassin du Merguellil se caractérisent par une large gamme de teneurs en tritium. Les concentrations mesurées varient entre un maximum de 32,6 UT au niveau du puits P4 et des valeurs nulles au niveau de 15 points d'eau.

La présence des eaux actuelles du barrage (mélange retenue - émergences) dans l'extrême aval de la plaine, avec des teneurs intermédiaires entre la valeur en ^3H de la retenue du barrage et celle des émergences, indique un apport significatif à partir des eaux d'El Haouareb. Plus à l'aval et jusqu'à la région d'El Grine (10 à 12 km), de plus fortes teneurs en

tritium sont enregistrées au niveau des points d'eau situés sur les berges du lit d'oued Merguellil. Ces teneurs qui dépassent les 10 UT et les faibles teneurs en ^{18}O témoignent d'une recharge récente post-nucléaire issue des crues de l'oued en période anté-barrage.

La partie aval du bassin du Merguellil renferme des eaux non tritiées et les valeurs obtenues sont toutes inférieures ou égales au seuil de détection, il s'agit d'eaux anciennes ayant rechargé la nappe avant les essais thermonucléaires des années 1950.

Le carbone-14 (^{14}C)

Les échantillons prélevés dans la plaine de Kairouan et au niveau des émergences du barrage El Haouareb présentent une large gamme de variation des activités ^{14}C . Elles varient d'environ 70 pcm à l'amont du bassin à 1 pcm dans la zone aval, au NE de Kairouan. Les valeurs les plus élevées caractérisent les points d'eau les plus proches du lit de l'oued Merguellil dans les zones amont et médiane du bassin. Dans cette partie de la plaine de Kairouan, les activités ^{14}C sont supérieures à 30 pcm. Ces activités témoignent d'une contribution d'eau récente à la recharge de l'aquifère. Cette recharge est due principalement à l'infiltration des crues du Merguellil. Cependant, des forages plus profonds dont les niveaux crépinés dépassent 180 m de profondeur présentent des activités comprises entre 13,5 et 23 pcm, témoignant d'une eau plus ancienne.

La répartition spatiale des âges corrigés selon le modèle de Pearson indique des âges inférieurs à 1000 ans caractérisant les eaux souterraines de la partie amont et médiane du bassin. En s'éloignant du lit du Merguellil vers le Sud et vers le NE dans le sens de l'écoulement les eaux souterraines sont de plus en plus anciennes. Ce vieillissement serait dû à une circulation plus lente des eaux souterraines d'une part et à un effet de plus en plus faible des crues du Merguellil sur la recharge de la nappe d'autre part.

Dans l'extrême aval du bassin, aux environs de la ville de Kairouan, les eaux issues des forages profonds se distinguent par leur caractère très ancien (entre 10000 et 30000 ans B.P., alors que les eaux issues des puits de surface très peu profonds sont plus jeunes (0 à 4500 ans B.P.). Ce rajeunissement peut être la conséquence soit d'une influence de la recharge récente à partir des eaux pluviales tombant directement sur la plaine et/ou à partir des eaux des crues du Merguellil lors des grands événements durant lesquels les eaux de ruissellement de l'oued peuvent atteindre les environs de la ville de Kairouan, voire même se déverser dans la Sebkhah El Kalbia, soit à un phénomène de mélange entre ces eaux de surface récemment infiltrées avec d'autres plus anciennes logées dans les niveaux profonds et percolant vers la surface (artésianisme).

Les eaux ayant des âges inférieurs à 10000 ans peuvent correspondre à une recharge durant les phases humides de l'Holocène déjà identifiées en Tunisie centrale. Celles plus anciennes d'âges compris entre 20000 et 30000 ans seront issues d'une recharge pendant une des phases humides du Pléistocène tardif (Ouda et al., 1998).

Les vitesses apparentes calculées semblent être en bonne concordance avec le modèle de sédimentation déjà avancé et les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Le ralentissement progressif dans la vitesse de transit des eaux souterraines est la conséquence d'un changement progressif de lithologie de la formation aquifère. Suivant la direction globale d'écoulement, la vitesse d'écoulement est de l'ordre de $3,3 \text{ m.a}^{-1}$ dans la zone amont et médiane de la plaine, c'est-à-dire jusqu'à la région de Chebika. Au-delà, la vitesse diminue brusquement pour passer à $0,8 \text{ m.a}^{-1}$ dans la partie centrale et puis à $0,4 \text{ m.a}^{-1}$ aux environs de Kairouan. Cette diminution s'accompagne d'une augmentation du gradient hydraulique, elle doit correspondre à un changement latéral de lithologie induisant des caractéristiques hydrodynamiques plus médiocres. L'aval du bassin correspond à l'individualisation de deux niveaux aquifères : un niveau profond et captif séparé d'un niveau phréatique libre. Cette évolution de la vitesse d'écoulement épouse le mode de sédimentation dans la plaine : les

alluvions grossières (sables et graviers) sont concentrées aux débouchés du Merguellil dans la plaine; les alluvions de texture moyenne et fine étant entraînées plus à l'aval du bassin.

Conclusion et perspectives

L'aquifère phréatique de la plaine de Kairouan est un cas typique de nappe soumise à des contraintes anthropiques assez sévères. La forte sollicitation d'une ressource tributaire d'aléas climatiques et la grande perturbation du fonctionnement hydrodynamique naturel par des pompages intensifs et des aménagements des eaux de surface conduit, à une dégradation de la qualité des eaux souterraines. Bien que cette dégradation soit un phénomène parfois irréversible à l'échelle humaine, il est possible d'y remédier par une limitation raisonnée de l'exploitation et de l'utilisation d'engrais chimiques, d'une part, et un encouragement des agriculteurs à une plus large utilisation des techniques nouvelles d'économie d'eau, d'autres part.

Bibliographie

- 1 - **Ben Ammar S., Zouari K., Leduc C. & M'barek J., 2006.** Caractérisation isotopique de la relation barrage-nappe dans le bassin du Merguellil (plaine de Kairouan, Tunisie Centrale). *Hydrol. Sci. J.*, 52, 2, 272-284.
- 2 - **Ben Ammar S., 2007.** Contribution à l'étude hydrogéologique, géochimique et isotopique des aquifères de Ain El Beidha et du bassin du Merguellil (plaine de Kairouan) : Implications pour l'étude de la relation barrage-nappes. Thèse de Doc. F.S Sfax, 200 p.
- 3 - **Besbes M., 1975.** Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques. Ecole Nationale des mines, Paris 121 p.
- 4 - **Chaieb H., 1988.** Contribution à la réactualisation des modèles hydrogéologiques de la plaine de Kairouan. Mémoire de DEA, Université de Tunis II, 77 p.
- 5 - **Edmunds W.M., Guendouz A.H., Mamou A., Moulla A., Shand P. & Zouari K., 2003.** Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicator. *Applied Geochemistry* 18. 805-822.
- 6 - **Leduc C., Ben Ammar S., Favreau G., Beji R., Virrion R., Lacombe G., Tarhouni J., Aouadi C., Zenati Chelli B., Jebnoun N., Oi M., Michelot J. L. & Zouari K., 2007.** "Impacts of hydrological changes in the Mediterranean zone: environmental modifications and rural development in the Merguellil catchment, central Tunisia". *Hydrol. Sci. J.*, 52, 6, 1162-1178.
- 7 - **Nazoumou Y., 2002.** Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone semi-aride : Etude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale). Thèse Doc., Université de Tunis el Manar, 221 p.
- 8 - **Ouda B., Zouari K., Ben Oueddou H., Chekir N. & Causse C., 1998.** New paleoenvironmental data for the late Quaternary of Maknassy basin (central Tunisia). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 326, 855-861.