

# Évolution de la recharge de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale) déduite de l'analyse géochimique

Safouan Ben Ammar<sup>1,3</sup>  
 Leila Jeribi<sup>1</sup>  
 Guillaume Favreau<sup>2</sup>  
 Kamel Zouari<sup>1</sup>  
 Christian Leduc<sup>2</sup>  
 Monique Oi<sup>2</sup>  
 Jemaiel M'barek<sup>4</sup>  
 Ridha Beji<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de radio-analyses et environnement  
 ENI Sfax  
 BP W 38  
 Sfax

Tunisie  
 <jeribi\_leila@yahoo.fr>  
 <kamel.zouari@enis.rnu.tn>  
<sup>2</sup> IRD, UMR HSM et UMR G-EAU  
 Université Montpellier-II  
 CC MSE  
 34095 Montpellier cedex  
 France  
 <favreau@msem.univ-montp2.fr>  
 <christian.leduc@ird.fr>  
 <monique.oi@ird.fr>

<sup>3</sup> Centre national des sciences et technologies nucléaires,  
 2020 Sidi-Thabet,  
 Tunisie

<safouan\_ammam@yahoo.fr>  
<sup>4</sup> Société nationale d'exploitation et de distribution des eaux  
 Montfleury  
 1008 Tunis  
 Tunisie

<mbarek\_jemaiel@yahoo.fr>  
<sup>5</sup> Direction générale des ressources en eau  
 Rue de la Manoubia  
 Tunis  
 Tunisie  
 <ridhabeji@hotmail.com>

Tirés à part : S. Ben Ammar

## Résumé

La nappe phréatique de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale semi-aride, 3 000 km<sup>2</sup>) est comprise dans les formations détritiques alluviales du Plio-quadernaire. Cet aquifère d'une grande importance régionale pour l'agriculture irriguée (céréales, cucurbitacées) subit, depuis plusieurs décennies, une forte pression anthropique due à une surexploitation locale des ressources, et à la construction de barrages de protection contre les crues à son amont dans les années 1980. Les analyses chimiques et isotopiques indiquent que la recharge naturelle de cet aquifère était tributaire des anciennes crues des oueds Zeroud et Merguellil en période anté-barrages. Les eaux souterraines montrent une bonne homogénéité de faciès chimique, généralement explicable par des processus d'interaction eau-roches sédimentaires. Une approche isotopique basée sur des analyses des isotopes de la molécule d'eau (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H) et ceux du CITD (<sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C) a permis d'identifier des processus de recharge localisés de l'aquifère à partir des fuites non maîtrisées du barrage El Haouareb et des lâchers occasionnels du barrage de Sidi Saad.

**Mots clés :** barrage, hydrogéochimie, isotopes, recharge naturelle, Tunisie.

## Abstract

**Past and present groundwater recharge processes in the Kairouan plain aquifer (Central Tunisia) inferred from geochemical analyses**

The phreatic aquifer of the Kairouan plain (semiarid, central Tunisia, 3000 km<sup>2</sup>) is made up of thick alluvial sedimentary formations of Plio-Quaternary origin. This aquifer represents a key resource for regional development and irrigated agriculture (e.g., watermelon, cereals). For the past few decades, over-exploitation of groundwater resources and building of dams located in the upstream part of the plain to prevent flash floods have led to dramatic changes in recharge processes and the water balance of the aquifer. Water chemistry and isotopic data (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C) confirm that groundwater recharge previously depended mainly on wadi floods. Chemical data suggests that water-rock interaction is the main process contributing to groundwater salinity. The isotopic approach reveals that a significant part of recent recharge comes from uncontrolled dam leakage (El Haouareb dam) or from surface water stored in dams and released during high stages (Sidi Saad dam).

**Key words:** dam, hydrogeochemistry, isotopes, natural recharge, Tunisia.

L'Afrique du Nord est une région typiquement semi-aride où les ressources en eau sont susceptibles d'évoluer spectaculairement sous l'influence de fluctuations climatiques ou d'actions humaines [1]. Ces changements peuvent affecter les stocks d'eau souterraine, rarement en augmentation [2], souvent en diminution importante [3], mais aussi leur qualité [3, 4]. En dehors des flux passant d'un système aquifère à un autre, la recharge naturelle des nappes phréatiques provient essentiellement de l'infiltration des eaux des oueds, lors de leurs crues les plus fortes. En région méditerranéenne, un tel phénomène est souvent très variable dans le temps et dans l'espace [5]. Au cours des dernières décennies, de multiples aménagements (par exemple les barrages, grands et petits) ont été réalisés au Maghreb, avec comme objectif premier une plus forte mobilisation des ressources en eau. Tous ces travaux, tendant à domestiquer une ressource très irrégulière, modifient parfois très profondément le cycle de l'eau, tant dans les flux que dans les processus. La nappe phréatique de la plaine de Kairouan étudiée ici illustre une telle évolution.

Par son extension (3 000 km<sup>2</sup>) et l'importance de ses réserves (épaisseur saturée parfois supérieure à 600 m), cet aquifère est le plus important de la Tunisie centrale, une région où le développement rural est totalement tributaire de l'eau. Il est soumis depuis plus de 40 ans à une forte anthropisation. Celle-ci est d'abord une exploitation toujours accrue pour satisfaire l'irrigation et l'alimentation en eau potable. L'intervention de l'homme s'est manifestée aussi par la création de très nombreux lacs et retenues collinaires, et la construction de grands barrages sur les deux principaux oueds de la région (en 1982, sur le Zeroud et, en 1989, sur le Merguellil ; figure 1). Le bilan hydrique largement déficitaire de la nappe de la plaine de Kairouan se manifeste par une forte baisse de la piézométrie depuis les années 1980 (0,25 à 1 m/an) [6].

Du fait de son importance à l'échelle nationale, l'aquifère de la plaine de Kairouan a fait l'objet de multiples études, souvent focalisées sur l'aspect hydrodynamique [7-9]. La géochimie des eaux souterraines de la plaine n'a été abordée que plus récemment [10-12]. Le croisement de ces deux approches permet un saut important dans la connaissance, en contraignant mutuellement les hypothèses tirées des analyses géochimiques et les propositions de bilan basées sur l'analyse hydrodynamique. Des résultats nouveaux ont ainsi été obtenus, en particulier dans l'étude de l'évolution des processus de la recharge de l'aquifère phréatique de la plaine de Kairouan depuis la construction des barrages.

## Aperçu géologique et hydrogéologique

La plaine de Kairouan est une vaste et profonde cuvette d'effondrement remplie de plus de 700 m de sédiments détritiques plio-quatennaires apportés depuis la dorsale tunisienne par de nombreux oueds, les oueds Zeroud et Merguellil étant les plus importants. Ces dépôts s'organisent en couches lenticulaires plus au moins étendues ; les alluvions grossières (sables et graviers) sont plus fréquentes aux débouchés des oueds dans la plaine,

alors que les alluvions moyennes et fines ont souvent été entraînées plus à l'aval. La plaine est limitée à l'ouest et au nord par une série de jebels où affleurent diverses formations sédimentaires du secondaire et du tertiaire (figure 1). La profondeur du niveau de la nappe phréatique était, avant surexploitation, de l'ordre de 15 à 65 m mais atteint désormais localement plus de 80 m. Vers l'aval, la nappe phréatique est subaffleurante (< 1 m) sous les sebkhias à proximité de Kairouan.

Des aquifères limitrophes peuvent alimenter, dans une faible mesure, la nappe de la plaine de Kairouan. La contribution de ce

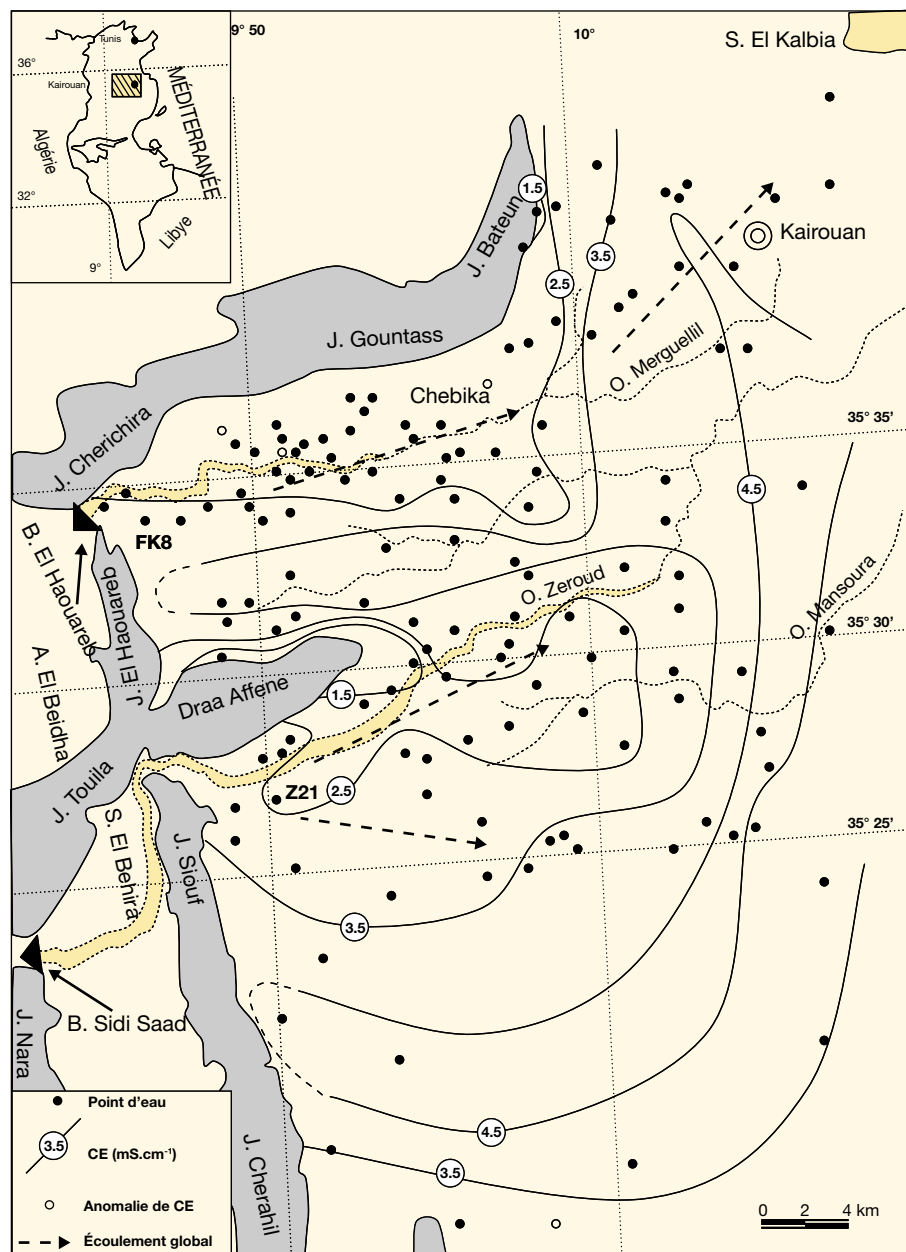


Figure 1. Carte de situation des points d'eau échantillonnés et de conductivité des eaux souterraines de la plaine de Kairouan.

type la mieux identifiée provient de la nappe de Ain El Beidha au travers du seuil karstique d'El Haouareb (figure 1). Cependant, en régime naturel, l'essentiel de la recharge de la nappe phréatique provenait des crues des deux grands oueds Merguellil et Zeroud. La dernière crue catastrophique, en 1969, est à l'origine de la création des barrages El Haouareb, sur le Merguellil (stockage moyen annuel de 19,6 Mm<sup>3</sup> sur la période 1989-2007) et Sidi Saad, sur le Zeroud (stockage moyen annuel de 100 Mm<sup>3</sup> sur la période 1982-2007), qui ont privé la nappe de la plaine d'une grande part de son alimentation naturelle, la quasi-totalité dans le cas du Merguellil [6].

## Prélèvements et analyses

Depuis une dizaine d'années (1997-2007), environ 140 points ont été échantillonnés par le laboratoire de radio-analyses et environnement (LRAE) de l'École nationale d'ingénieurs de Sfax et l'Institut de recherche pour le développement (IRD), avec le soutien actif des différents services régionaux du ministère tunisien de l'Agriculture (figure 1). Ce sont des eaux souterraines (puits, forages) et des eaux de surface (retenues des deux barrages, émergences karstiques au pied du barrage El Haouareb). Les paramètres physicochimiques (pH, conductivité électrique et température) ont été mesurés *in situ*. Les éléments majeurs ont été analysés après filtration *in situ* à 0,45 µm par chromatographie ionique (Na, Ca, Mg, K, Cl, SO<sub>4</sub>) et titration (HCO<sub>3</sub>) par les laboratoires de la Société nationale d'exploitation et de distribution des eaux (SONEDE) à Tunis et de la Maison des sciences de l'eau à Montpellier pour les échantillons du Merguellil et par le LRAE pour les échantillons du Zeroud. Les analyses isotopiques (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H et <sup>13</sup>C) ont été réalisées par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) à Vienne et le laboratoire d'hydrologie et géochimie isotopique de l'université Paris-XI-Orsay. Les activités <sup>14</sup>C ont été mesurées par scintillation liquide au LRAE sur des précipités de carbonate de baryum. Les teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau (<sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H) ont été déterminées par spectrométrie de masse et sont exprimées en pour mille par rapport au standard international V-SMOW. Les incertitudes analytiques sur les mesures isotopiques sont de 0,2 ‰ pour δ<sup>18</sup>O, de 2 ‰ pour δ<sup>2</sup>H et de 0,1 ‰ pour δ<sup>13</sup>C. Les teneurs en tritium sont exprimées en unités tritium (UT), avec une incertitude de l'ordre de 0,8 UT. L'incertitude estimée sur les activités <sup>14</sup>C est de l'ordre de 0,2 à 1,7 pCm.

## Résultats

### Caractérisation physico-chimique des eaux

Les températures des eaux souterraines de la plaine de Kairouan sont comprises entre 19 et 28 °C (21 °C en médiane). Les températures les plus basses (19 à 23 °C) caractérisent les puits de surface et les forages peu profonds (0 à -100 m). Les plus élevées (26 à 28 °C) sont mesurées au niveau des forages profonds qui dépassent généralement 200 m. La majorité des échantillons présentent un pH variant entre 7 et 8.

Les conductivités électriques varient de 1,5 mS/cm à plus de 5 mS/cm. Les plus faibles valeurs (~1,5 mS/cm) sont mesurées au pied du jebel Bateun et du bombement anticlinal du Draa Affene (figure 1), où affleurent des formations sablo-gréseuses d'âge miocène et pliocène. De relativement faibles conductivités, inférieures à 2,5 mS/cm, sont mesurées à proximité des lits des oueds. De plus fortes valeurs, parfois supérieures à 4,5 mS/cm, caractérisent la partie aval de la plaine. D'une manière générale, les eaux souterraines de la plaine du Merguellil sont moins chargées que celles de la plaine du Zeroud, reflétant la différence de

qualité des eaux de surface des deux oueds. En effet, la conductivité moyenne des eaux de la retenue d'El Haouareb est de 2,1 mS/cm (gamme mesurée : 1,5-2,65 mS/cm), celle des émergences d'El Haouareb est de 2,4 mS/cm (mélange d'eau du barrage et d'eau de la nappe de Ain El Beidha) et celle de Sidi Saad est largement supérieure (4,6 mS/cm, mesurée en septembre 1998). Les eaux des retenues subissent une reprise évaporatoire de l'ordre de 30 % du volume arrivant aux barrages mais d'intensité plus ou moins forte selon la saison et la durée du stockage dans le lac [13] ; ces eaux sont donc proportionnellement plus minéralisées que les eaux des oueds s'écoulant librement.

Les concentrations relatives en éléments majeurs sont reportées sur le diagramme de Piper (figure 2). Le faciès dominant est de type Na-Ca-SO<sub>4</sub> évoluant par endroits à Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub>. Le bicarbonate domine dans les faibles minéralisations des formations miopliocènes du jebel Bateun et du Draa Affene. Un faciès particulier Na-Mg-SO<sub>4</sub> caractérise les points d'eau situés au nord du Draa Affene. Les teneurs en SO<sub>4</sub> varient entre 2 et 45 méq/L, les teneurs en Cl entre 2,5 et 40 méq/L. Les teneurs en Ca et Mg varient respective-

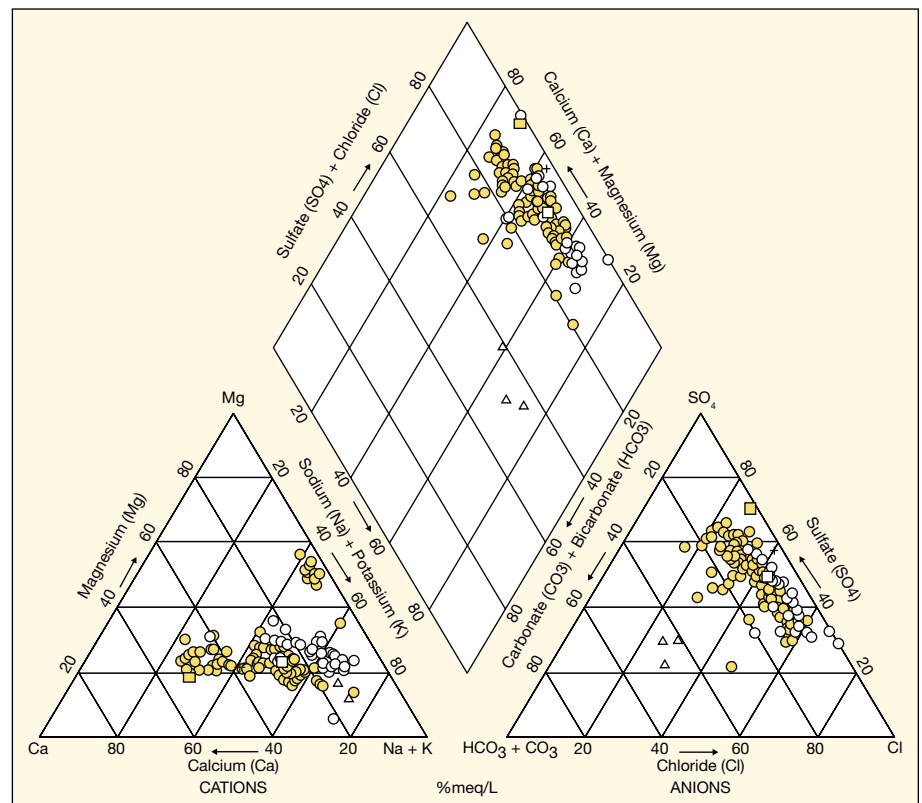


Figure 2. Diagramme de Piper des eaux de la plaine de Kairouan.

● : Merguellil ; ○ : Zeroud ; △ : Mio-Pliocène ; □ : émergences El Haouareb ; ■ : retenue El Haouareb ; + : Sidi Saad.

ment entre 1 et 18 méq/L et entre 1 et 21 méq/L.

## Caractérisation isotopique

Les teneurs en isotopes stables des eaux souterraines sont comprises entre  $-6,4$  et  $-1,2$  ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$  et entre  $-43,9$  et  $-10,6$  ‰ pour  $\delta^2\text{H}$ , avec des moyennes respectives de  $-5,3$  et  $-33,7$  ‰. Les valeurs les plus enrichies proviennent de l'amont de la plaine ; ailleurs, la composition isotopique des eaux de la nappe est plus homogène ( $\delta^{18}\text{O}$  généralement compris entre  $-6$  et  $-5$  ‰). Comme la minéralisation totale, la composition isotopique des eaux des barrages varie fortement en fonction du remplissage des retenues et de l'intensité de l'évaporation [10, 12].

Les teneurs en tritium de la nappe présentent une grande variabilité spatiale. Les valeurs les plus fortes (5 à 32 UT) sont mesurées près des lits des oueds, indiquant une recharge relativement récente (1950-1970). Ailleurs, les teneurs en tritium sont généralement inférieures au seuil de détection, indiquant une recharge plus ancienne ( $< 1950$ ). Les teneurs en tritium des eaux de barrages (5,3 UT en septembre 1998 et 5,5 UT en octobre 1999 pour El Haouareb et 5,6 UT en novembre 1997 pour Sidi Saad) sont proches des valeurs actuelles des précipitations mesurées à Kairouan (6,9 UT en septembre 1998).

Les activités  $^{14}\text{C}$  des eaux souterraines et des émergences d'El Haouareb varient d'environ 72 pcm à l'amont du bassin à des valeurs inférieures au seuil de détection dans la zone aval, au nord-est de Kairouan. Les valeurs les plus élevées se trouvent à proximité des oueds dans les zones amont et médiane du bassin. Dans cette partie de la plaine, les activités  $^{14}\text{C}$  sont supérieures à 30 pcm. En corrigeant les valeurs brutes grâce aux teneurs en  $^{13}\text{C}$  du CITD (entre  $-13,4$  et  $-4,6$  ‰ vs PDB), les âges corrigés des eaux selon plusieurs modèles (Pearson, Fontes et Garnier, Evans et Eichinger [14]), et qui prennent en considération les mélanges chimique et isotopique avec échange isotopique entre le  $\text{CO}_2$  du sol et les carbonates, sont inférieurs à 1 000 ans BP.

## Discussion

### Origine de la minéralisation

Les eaux souterraines de la plaine de Kairouan ont généralement un faciès chimique semblable à celui des eaux des oueds échantillonnées dans les retenues des barrages. Considérés individuellement, les ions

majeurs ne tracent donc pas une rupture dans les processus de recharge de la nappe. Les différents rapports ioniques, classiquement utilisés pour identifier l'origine de la minéralisation des eaux souterraines, n'apportent pas d'information déterminante dans le cas de la plaine de Kairouan. En effet, les eaux des oueds dont dépend la recharge de la nappe présentent le même faciès chimique, et ce, malgré qu'ils drainent des bassins assez différents par leur extension (8 650 km<sup>2</sup> pour le Zeroud, 1 200 km<sup>2</sup> pour le Merguellil), par leur couverture végétale et par la nature des formations géologiques qu'ils traversent (le bassin du Merguellil est montagneux et assez boisé, nettement marqué par des affleurements carbonatés de l'Éocène et gréseux de l'Oligocène ; celui du Zeroud est plus homogène, avec dans la majeure partie des reliefs de plus faible pente). Les variations des concentrations en éléments chimiques et de salinité entre les eaux de ruissellement des deux oueds seraient probablement les seuls facteurs responsables de la différence de salinité des eaux souterraines entre les deux moitiés nord et sud de la plaine (figure 1). Les valeurs élevées de salinité qui caractérisent les eaux du Zeroud sont en relation avec la nature des terrains qu'il traverse avant de se jeter dans la plaine de Kairouan, notamment les affleurements évaporitiques du Trias et les sols de sebkha situés plus à l'ouest.

L'augmentation des valeurs de conductivité, d'amont en aval, dans le sens de

l'écoulement est supposée due principalement au changement de faciès lithologique de l'aquifère, de sables grossiers et graviers en amont à des argiles sableuses en aval, induisant un temps de transit et de contact eau-matrice croissants vers l'aval. Dans la zone saturée, la dissolution de certains minéraux carbonatés ou gypseux, généralement rencontrés dans les sédiments d'origine fluviale, pourrait également être à l'origine d'augmentation locale de la salinité. L'échange cationique avec les minéraux argileux est un autre processus probable, notamment pour Na, Ca et Mg (figure 3). Cet échange implique une augmentation des Na dans la solution contre une diminution du Ca et du Mg [15], cela devant affecter la saturation vis-à-vis du gypse, d'une part, et vis-à-vis des carbonates, d'autre part [16]. L'hypothèse d'un échange de base avec les minéraux argileux dans les eaux de la plaine de Kairouan est accréditée par la relation

$$\frac{([\text{Na} + \text{K}] - \text{Cl})}{([\text{Ca} + \text{Mg}] - [\text{SO}_4 + \text{HCO}_3])}$$

qui montre une bonne corrélation entre l'excès en sodium et le déficit en calcium et magnésium (figure 3).

En zone semi-aride, comme la Tunisie centrale, le phénomène d'évaporation affecte les eaux de ruissellement, les eaux de pluies tombant directement sur les sols et encore les eaux d'irrigation bien avant

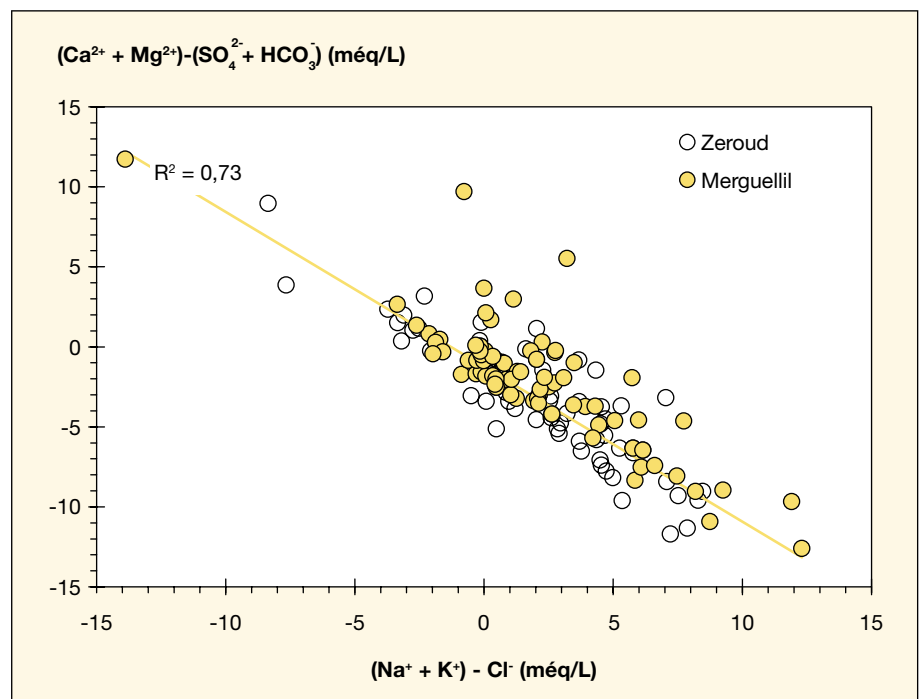


Figure 3. Relation  $\frac{([\text{Na} + \text{K}] - \text{Cl})}{([\text{Ca} + \text{Mg}] - [\text{SO}_4 + \text{HCO}_3])}$  pour les eaux de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan.

qu'elles atteignent l'aquifère, et par conséquent, favorise le dépôt de sels ou d'accumulation de solutés en surface ou subsurface [17]. À l'aval de la plaine, le recyclage des sels sous les sebkhas, exutoire naturel de la nappe par évaporation (périodes sèches) mais aussi périodiquement inondées par les crues des oueds (période de lessivage vers la zone saturée), pourrait en partie être responsable d'une partie de l'augmentation de la salinité des eaux de l'aquifère (figure 1).

## Recharge naturelle de la nappe et influence des barrages

Les études hydrogéologiques antérieures de la plaine de Kairouan [7-9, 18] ont considéré qu'en période antébarrages, les crues du Zeroud et 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 considérés comme faibles ou nuls. Depuis la construction des barrages Sidi Saad et El Haouareb, les eaux des crues de ces deux oueds n'atteignent plus la plaine, et la nappe se trouve privée de ces apports. Les apports à la nappe se limitent actuellement aux débits des fuites du barrage El Haouareb, au transfert souterrain à partir de la nappe de Ain El Beidha à travers la formation karstique sur laquelle est construit le barrage et aux très faibles débits lâchés pendant les années à pluviométrie excédentaire (années 1993, 1994, 1996, 1997, 2003 et 2005 pour Sidi

Saad ; années 1991, 1993, 1996 et 2006 pour El Haouareb).

Le recours aux méthodes isotopiques (isotopes de la molécule d'eau et du ClTD) permet une meilleure compréhension des mécanismes de la recharge naturelle de la nappe et permet d'en préciser de manière indépendante à l'hydrodynamique les différents flux.

### • Recharge actuelle induite par les barrages

Dans la zone amont de la plaine en aval des barrages, de fortes variabilités isotopiques caractérisent les eaux souterraines à cause de la recharge récente induite par des eaux à faciès isotopique plus enrichi en période postérieure à la construction des barrages (figure 4) :

- dans la moitié nord de la plaine, dominée par le Merguellil, ces eaux proviennent des fuites à partir du barrage El Haouareb et leur mélange avec le flux en provenance du bassin amont de Ain El Beidha par déversement latéral à travers le seuil d'El Haouareb. À l'aval du barrage, la tendance à l'enrichissement en isotopes lourds décroît vers l'intérieur du bassin en fonction de la distance au barrage, et les points d'eau situés jusqu'à ~7 km à l'aval se distinguent par un cachet isotopique plus enrichi, suggérant une alimentation induite par les eaux de fuites du barrage [11] ;
- dans la partie sud de la plaine, le faciès le plus évaporé caractérise les eaux du piézomètre Z21 (-1,2 et -10,6 ‰ en  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  respectivement), en rive droite de

l'oued Zeroud à son débouché dans la plaine. Cet enrichissement en isotopes stables est interprété comme le reflet d'une infiltration récente d'eaux à partir de lâchers du barrage de Sidi Saad durant les campagnes de recharge artificielle.

Les points d'eau situés dans l'extrême amont de la plaine, et dont le cachet isotopique est à caractère évaporé, présentent des teneurs en tritium proches des celles des eaux de surface et des précipitations actuelles à Kairouan, c'est-à-dire 5 à 6 UT (en 1998). C'est le cas du piézomètre Z21 dans le bassin du Zeroud et du forage FK8 situé à environ 3 km en aval du barrage El Haouareb (groupe G2 de la figure 5). Cela confirme encore l'effet de la recharge actuelle à partir des eaux des barrages : à partir des fuites de la retenue d'El Haouareb au nord de la plaine et l'infiltration des eaux lâchées lors des essais de recharge artificielle dans le bassin du Zeroud.

### • Recharge naturelle par les oueds

Les teneurs moyennes en isotopes stables ( $\delta^{18}\text{O} = -5,3$  ‰ et  $\delta^2\text{H} = -33,7$  ‰) diffèrent de celles des précipitations à Kairouan (-4,2/-24,1 ‰) [10, 12] mais rappellent les précipitations des bassins amont du Zeroud et du Merguellil, dont la valeur calculée pour l'oxygène-18 se situe entre -5,5 et -5 ‰ [11]. Cette différence est due à l'effet d'altitude (dénivelé amont-aval : 1 100 m) qui caractérise les eaux des pluies formées à l'amont montagneux des bassins des oueds. Les caractéristiques physiques des bassins du Zeroud et Merguellil favorisent le transfert rapide (temps de montée de 1 à 2 heures) des eaux précipitées à l'amont vers la plaine. Les eaux de ruissellement s'infiltrent aux débouchés des oueds sur la plaine.

Les eaux de surface (retenues des deux barrages et émergence El Haouareb) montrent des faciès isotopiques plus enrichis en isotopes stables dont la grande variabilité, selon les périodes d'échantillonnage, traduit l'état de remplissage des retenues de barrages et l'effet de l'évaporation des eaux de surface (DEES) intersecte la droite météorologique locale (DML) [19] en un point de coordonnées (-5,4/-32,4). Ces valeurs sont proches des valeurs moyennes des eaux souterraines, en accord avec l'hypothèse d'une importance prépondérante des crues historiques des oueds pour la recharge de l'aquifère.

Les teneurs en tritium mesurées au niveau des points d'eau échantillonnés indiquent la présence d'une composante récente (5 à 32 UT) traduisant une recharge datant de la période postnucléaire des années 1950 et antébarrages (groupe G1 de la figure 5). Ces eaux tritiées et qui présentent de faibles teneurs en isotopes lourds

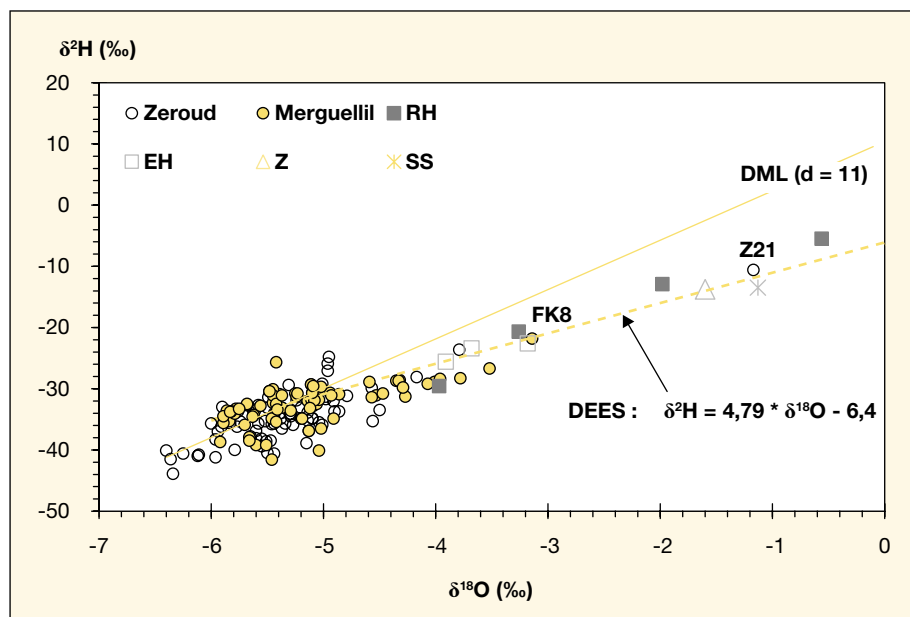


Figure 4. Diagramme  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  des eaux de la plaine de Kairouan.

RH : retenue El Haouareb ; EH : émergences El Haouareb ; SS : retenue Sidi Saad ; Z : Oued Zeroud ; DML : droite météorologique locale [18] ; DEES : droite d'évaporation des eaux de surface.

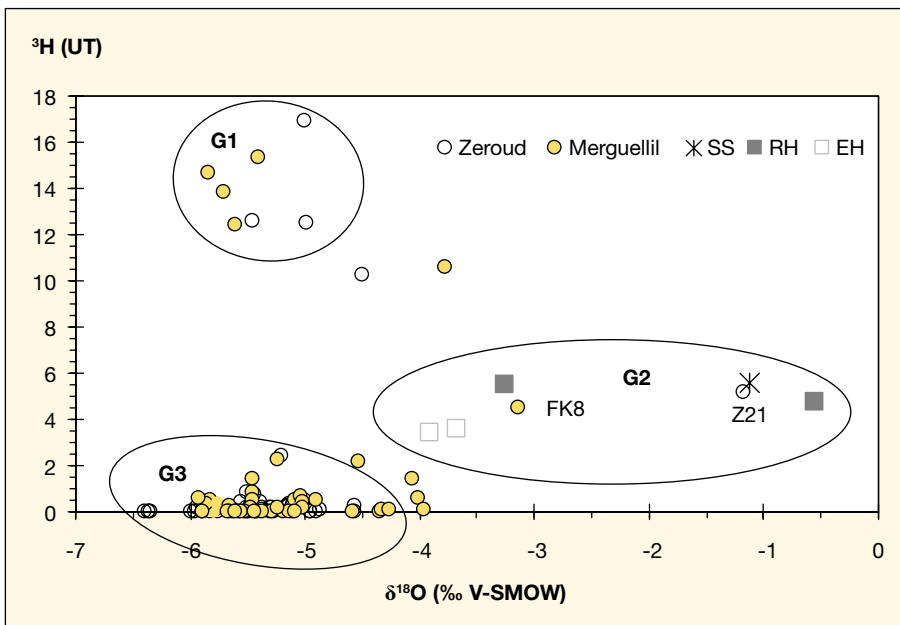


Figure 5. Diagramme  $^3\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ .

RH : retenue El Haouareb ; EH : émergences El Haouareb ; SS : retenue Sidi Saad ; G1 : recharge récente postnucléaire et antébarrages ; G2 : recharge actuelle par les eaux des barrages ; G3 : paléorecharge.

( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) sont prélevées à proximité des lits des oueds Zeroud et Merguellil dans la partie amont et médiane de la plaine. À l'intérieur de la plaine, les eaux échantillonnées à distance des lits des oueds sont faiblement tritiées et présentent des valeurs appauvries en  $^{18}\text{O}$  (groupe G3). Il s'agit d'eaux à forte composante ancienne provenant de paléorecharge de la nappe. Entre ces différents groupes, des situations intermédiaires de mélange sont identifiées (figure 5).

Les plus fortes valeurs des activités  $^{14}\text{C}$  (> 30 pcm) caractérisent les eaux issues

des points d'eau les plus proches des lits des oueds dans la zone amont et médiane de la plaine. Ces activités témoignent d'une contribution d'eau récente à la recharge de l'aquifère, et la répartition spatiale des âges corrigés selon le modèle de Pearson indique des âges inférieurs à 1 000 ans. Cette recharge serait due principalement à l'infiltration des anciennes crues des oueds. Cependant, des forages plus profonds dont les niveaux crépinés avoisinent les 200 m de profondeur présentent des activités comprises entre 13,5 et 23 pcm, témoignant d'une eau plus

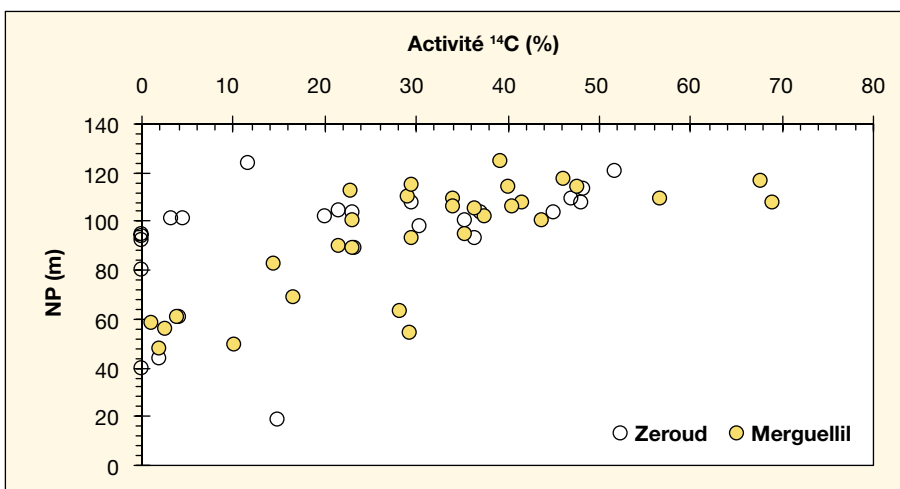


Figure 6. Activité  $^{14}\text{C}$  en fonction du niveau piézométrique (NP) de la nappe dans la partie amont et médiane de la plaine de Kairouan.

Pour la commodité de l'interprétation, les points d'eau représentant l'aval de la plaine ont été supprimés : activités inférieures à 30 pcm et NP inférieur à 20 m.

ancienne provenant d'une paléorecharge (figure 6). Cela indique l'existence dans la plaine de Kairouan d'une stratification d'eaux d'âges différents provenant de différentes phases de recharge.

En s'éloignant des lits du Merguellil et du Zeroud 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 à cause d'un changement latéral de faciès lithologique de l'aquifère, d'une part, et à un effet de plus en plus faible des crues des oueds 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 10 000 et 30 000 ans BP), alors que les eaux issues des puits de surface très peu profonds sont plus jeunes (0 à 4 500 ans BP). 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 et du Zeroud lors des grands événements durant lesquels les eaux de ruissellement des oueds peuvent atteindre les environs de la ville de Kairouan, voire même se déverser dans la Sebkhia El Kalbia située plus au nord-est, 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 (drainance ascendante). Cela se justifie par le caractère artésien des forages implantés au nord-est de Kairouan [12].

Les vitesses apparentes d'écoulement calculées à partir des âges  $^{14}\text{C}$  corrigés semblent être en bonne concordance avec le modèle conceptuel de sédimentation 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.

Dans la moitié nord de la plaine (bassin du Merguellil) et suivant la direction d'ensemble de l'écoulement, la vitesse apparente d'écoulement (calculée tout en supposant un écoulement de type piston-flow) est de l'ordre de 3,3 m/an 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 m/an dans la partie centrale et puis à 0,4 m/an aux environs de Kairouan. Cette diminution s'accompagne d'une augmentation du gradient hydraulique et doit correspondre à un changement latéral de lithologie induisant des caractéristiques hydrodynamiques plus médiocres.

## Implications pour la gestion

Dans les dernières années, le développement des cultures irriguées consommatrices d'eau a engendré une forte pression sur la ressource dans la plaine de Kairouan : environ 80 % des eaux pompées de la nappe phréatique sont utilisées pour l'irrigation. L'extension des terres cultivées et l'intensification de l'irrigation ont eu pour conséquence une surexploitation des ressources, amenant à une baisse généralisée de la piézométrie atteignant localement 1 m/an. Actuellement, cette baisse de la piézométrie ne semble pas affecter la qualité des eaux, et de rares et faibles augmentations de la salinité ont été observées [12]. Cela peut s'expliquer par l'importance des réserves de la nappe et par l'absence de stratification verticale de la salinité (figure 7), testée par des profils de conductivités sur plusieurs piézomètres [20]. Théoriquement, en l'absence du risque de pomper des eaux de plus en plus salées, il serait possible de continuer à exploiter l'aquifère. Cependant, cette option est confrontée au coût croissant de pompage dû à l'augmentation de la profondeur du niveau de la nappe.

La qualité des eaux d'irrigation est un paramètre important à considérer, non seulement dans l'étude de l'impact direct sur les produits agricoles, mais aussi dans celle de l'impact indirect sur les sols par modification de leurs propriétés physiques et chimiques [21]. Dans le cas des nappes phréatiques, ces modifications sont généralement attribuées aux échanges de bases dans la zone non saturée [22]. Ces processus sont principalement contrôlés par le rapport entre l'adsorption du sodium (*sodium adsorption ratio*, SAR) de l'eau d'irrigation et sa minéralisation totale. En effet, l'échange ionique entre le sodium de l'eau et le calcium et magnésium des argiles implique un appauvrissement de l'eau d'irrigation en Na, contre un enrichissement en Ca et Mg. L'enrichissement des sols en Na peut avoir une incidence négative sur leur stabilité et leur productivité. La méthode la plus utilisée pour qualifier les eaux d'irrigation est une représentation graphique de la conductivité électrique en fonction du SAR (figure 8). Les eaux de la plaine de Kairouan présentent des valeurs de SAR faibles à fortes, évoluant d'amont en aval avec la conductivité. Seuls les points d'eau de la zone amont, notamment du côté du Merguellil, présentent des valeurs de SAR et des conductivités faibles. Des valeurs de SAR moyennes à fortes caractérisent le reste des points d'eau échantillonnés (environ 85 %), ce qui doit limiter leur utilisation dans le domaine agricole. L'utilisation de ces eaux pour l'irrigation sur de longues périodes peut avoir des conséquences

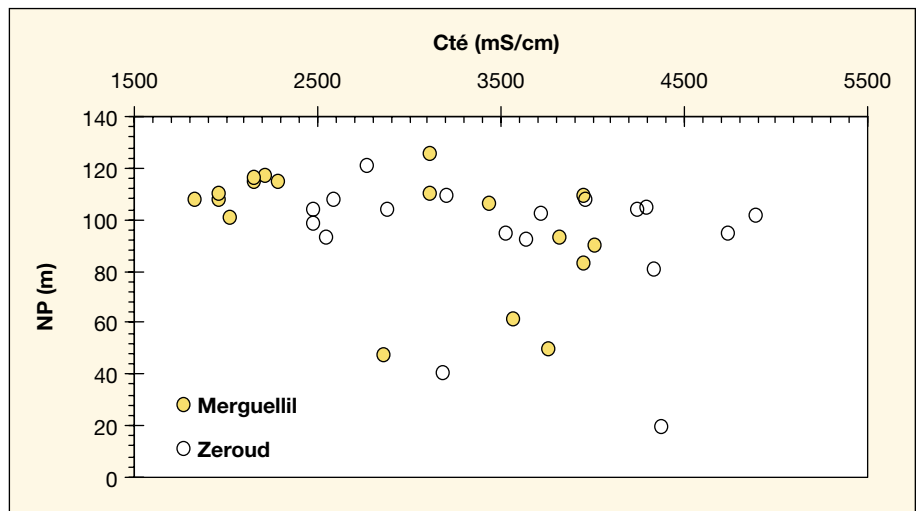


Figure 7. Relation conductivité/niveau piézométrique.

négatives non seulement sur les sols et leur productivité, mais aussi sur la qualité de l'eau de la nappe suite au recyclage des sels accumulés aux sols sous l'effet de forte évaporation par les eaux d'irrigation et par les eaux pluviales s'infiltrant pendant les grands événements pluvieux.

Le retour des eaux d'irrigation et l'infiltration des eaux de pluie tombant directement sur la plaine, même avec de faibles quantités, peuvent aussi entraîner jusqu'à la nappe les intrants agricoles épandus parfois en excès. Cela pourrait expliquer, pour certains sites, des teneurs élevées en

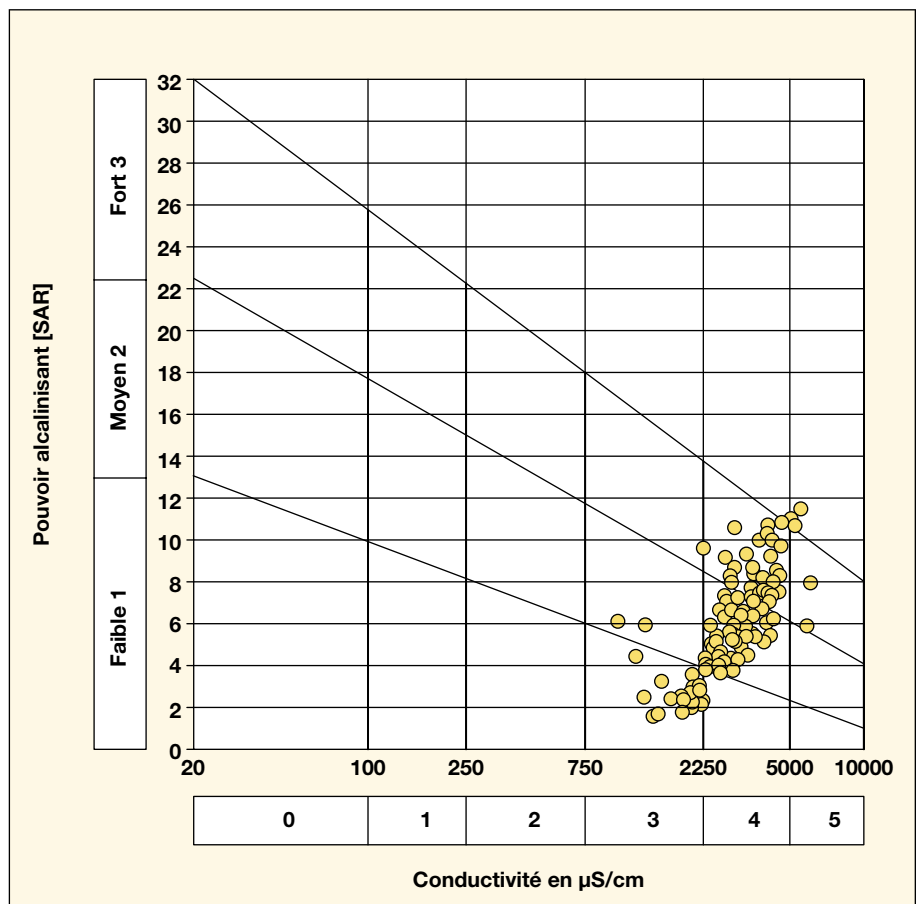


Figure 8. Évolution du SAR en fonction de la conductivité des eaux souterraines.

nitrate, pouvant parfois dépasser 100 mg/L.

Depuis la construction des barrages, la nappe se trouve privée de sa principale source d'alimentation, et la recharge est actuellement localisée dans l'extrême amont de la plaine. Contrairement à l'état naturel, cette recharge est actuellement induite par les fuites du barrage El Haouareb dans la partie nord-ouest de la plaine et par les lâchers du Sidi Saad dans sa moitié méridionale. Cette situation est problématique pour la gestion de la ressource, du fait que la recharge est localisée dans la partie en amont et que, plus à l'est, là où se situe l'essentiel des cultures, les pompes concernent des eaux plus profondes et plus anciennes (figure 6).

La pratique de la recharge artificielle à partir des eaux des barrages pour compenser le déficit hydrique dans la plaine et assurer la pérennité de la ressource pourrait être envisagée mais reste dépendante des fuites non maîtrisées dans le cas d'El Haouareb, de la variabilité interannuelle très importante du remplissage (figure 9), et pour le cas du barrage Sidi Saad, de la salinité importante de l'eau de la retenue.

## Conclusion et perspectives

L'approche géochimique et isotopique des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan a montré l'étroite relation nappe-oueds : les anciennes crues du Merguellil et du Zeroud constituaient la principale source d'alimentation de la nappe. La construction des barrages Sidi Saad et El Haouareb sur le Zeroud et le Merguellil au niveau de leurs embouchures sur la plaine a stoppé le processus de recharge naturelle de la nappe.

Les analyses chimiques ont montré que les eaux souterraines dans les deux parties

nord et sud de la plaine se caractérisent par des faciès géochimiques semblables, généralement de type Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub>. Les différences de caractéristiques (physiques et lithologiques) des bassins des deux oueds ne semblent pas affecter le type de la minéralisation des eaux souterraines qui serait liée aux interactions eau-sédiments au sein de la formation réservoir. Les différences de conductivité électrique dans l'aquifère entre les parties nord (Merguellil) et sud (Zeroud) sont liées aux différences de CE des eaux de surface alimentant la plaine.

L'étude isotopique a permis de conclure que la nappe garde encore des traces de son ancien mode de recharge par les oueds. Après la construction des deux barrages Sidi Saad (1982) et El Haouareb (1989), une contribution significative des lâchers et des fuites à partir des retenues des deux barrages a été mise en évidence. En aval des deux barrages, aux environs immédiats des lits des oueds, le cachet isotopique (isotopes stables de la molécule d'eau) des eaux souterraines démontre une alimentation à partir des eaux évaporées des retenues des barrages.

Les datations au moyen du <sup>14</sup>C ont permis de confirmer les aires de recharge et d'estimer le temps de résidences des eaux souterraines. Les activités <sup>14</sup>C et les âges corrigés des eaux indiquent la présence d'eaux plus anciennes datant d'environ 30 000 ans dans la partie aval de la plaine du bassin, témoignant du faible taux de renouvellement de l'aquifère. La distribution spatiale des âges <sup>14</sup>C a permis de présenter un modèle de variation de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines en fonction du changement progressif de la lithologie de la formation aquifère d'amont en aval.

Cette étude réalisée à l'échelle de l'ensemble de l'aquifère confirme l'alimentation préférentielle de l'aquifère par les crues des oueds. Une contribution des dif-

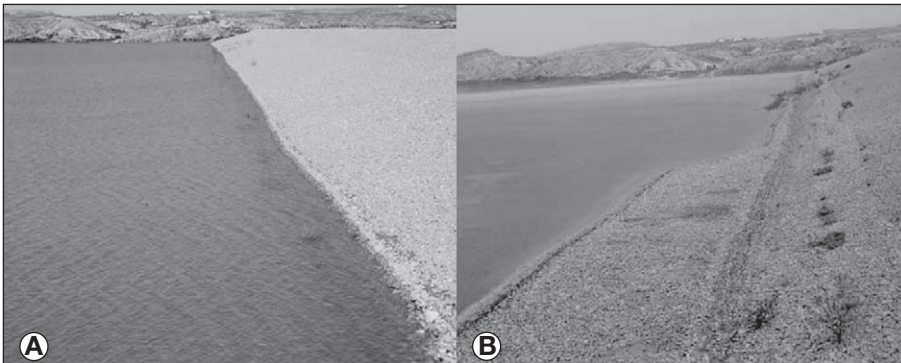
férents reliefs bordiers (jebels) aux limites de l'aquifère reste possible ; toutefois, celle-ci, pour être démontrée, nécessiterait des études spécifiques à pas d'échantillonnage plus fin. En termes de gestion de l'aquifère, la qualité des eaux pompées ne semble pas devoir se dégrader significativement en parallèle à l'abaissement de la nappe phréatique. ■

## Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien financier et analytique de l'AIEA, du projet européen AQUASTRESS et du projet Merguis (Merguellil : ressources, gestion et usages intégrés de l'eau) financé par l'IRD. Les auteurs remercient le laboratoire d'hydrologie et géochimie isotopique d'Orsay (J-L. Michelot) pour les analyses isotopiques, ainsi que les réviseurs anonymes de la revue pour leur contribution à l'amélioration du manuscrit.

## Références

1. Cudennec C, Leduc C, Koutsoyannis D. Dryland hydrology in Mediterranean regions-a review. *Hydrol Sci J Sci Hydrol* 2007 ; 52 : 1077-87.
2. Idder T. Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse* 2007 ; 18 : 161-7.
3. Karaouli F, Zammouri M, Tarhouni J, Hamed Y. Étude hydrogéologique et impact de l'intensification de l'exploitation sur la qualité des eaux souterraines du bassin de Moulares-Redeyef (sud-ouest tunisien). *Sécheresse* 2008 ; 19 : 61-5.
4. Bouhlassa S, Alechcheikh C, Kabiri L. Origine de la minéralisation et détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse* 2008 ; 19 : 67-75.
5. Lange J, Leibundgut C. A non-calibrated rainfall-runoff model for large, arid catchment. *Water Resour Res* 1999 ; 35 : 2161-72.
6. Leduc C, Ben Ammar S, Favreau G, et al. Impacts of hydrological changes in the Mediterranean zone: environmental modifications and rural development in the Merguellil catchment, central Tunisia. *Hydrol Sci J Sci Hydrol* 2007 ; 52 : 1162-78.
7. Besbes M, Delhomme JP, De Marsily G. Estimation recharge from ephemeral streams in arid regions: a case study at Kairouan, Tunisia. *Water Resour Res* 1978 ; 14 : 281-90.
8. Nazoumou Y, Besbes M. Estimation de la recharge et modélisation de nappe en zone aride : cas de la nappe de Kairouan, Tunisie. In : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), ed. *Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics*. Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht, (Pays-Bas), juillet 2001. IAHS Publ, Vol. 269. Wallingford (Royaume-Uni) : IAHS, 2001.



**Figure 9.** Barrage El Haouareb.  
A. Retenue pleine, 32 Mm<sup>3</sup> (mars 2006). B. Retenue totalement à sec (mars 2008).  
Photo : S. Ben Ammar.



9. Kingumbi A, Besbes M, Bourges J, Garetta P. Évaluation des transferts entre barrage et aquifères par la méthode de bilan d'une retenue en zone semi-aride. Cas d'El Haouareb en Tunisie centrale. *Rev Sci Eau* 2004 ; 17 : 213-25.
10. Jeribi L. *Caractérisation hydrochimique et isotopique des eaux du système aquifère du bassin de Zeroud (plaine de Kairouan, Tunisie centrale)*. Thèse doctorat, université de Tunis El Manar, 2004.
11. Ben Ammar S, Zouari K, Leduc C, M'barek J. Caractérisation isotopique de la relation barrage-nappe dans le bassin du Merguellil (plaine de Kairouan, Tunisie centrale). *Hydrol Sci J Sci Hydrol* 2006 ; 51 : 272-84.
12. Ben Ammar S. *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 doctorat, université de Sfax, 2007.
13. Virrion R. *Contribution à l'étude hydrogéologique du site d'El Haouareb-Merguellil, Tunisie centrale*. Mémoire de mastère, université d'Avignon, 2006.
14. Gallagher D, McGee EJ, Kalin RM, Mitchell PI. Performance of models for radiocarbon dating of groundwater: an appraisal using selected Irish aquifers. *Radiocarbon* 2000 ; 42 : 235-48.
15. Edmunds WM, Guendouz AH, Mamou A, Moulla A, Shand P, Zouari K. Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicator. *Appl Geochem* 2003 ; 18 : 805-22.
16. Sracek O, Hirata R. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani aquifer system in the state of Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology J* 2002 ; 10 : 643-55.
17. Elbaz-Poulichet F, Favreau G, Leduc C, Seidel JL. Major ion chemistry of groundwaters in the continental terminal water table of southern Niger (Africa). *Appl Geochem* 2002 ; 17 : 1343-9.
18. Nazoumou Y. *Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone semi-aride : étude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale)*. Thèse doctorat, université de Tunis El Manar, 2002.
19. Celle-Jeanton H, Zouari K, Travi Y, Daoud A. Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax. *CR Acad Sci Paris, série IIa* 2001 ; 333 : 625-31.
20. Jebnoun N. *Caractérisation physicochimique spatiotemporelle des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan*. Mémoire de mastère, université de Tunis El Manar, 2006.
21. Suarez DL, Wood JD, Lesch SM. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agric Water Manage* 2006 ; 86 : 150-64.
22. Kass A, Gavrieli I, Yechieli Y, Vengosh A, Starinsky A. The impact of freshwater irrigation on the chemistry of shallow groundwater: a case study from the Israeli coastal aquifer. *J Hydrol* 2005 ; 300 : 314-31.