

ORIGINE ET DATATION DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN HYDROLOGIQUE DE LA LAGUNE D'OUALIDIA

K. Kaid Rassou*, Y. Fakir*, M. Bahir*, K. Zouari**, M. Marah***

RÉSUMÉ

Le Sahel d'Oualidia fait partie du littoral atlantique. Il borde la lagune d'Oualidia, avec un climat dominant de type semi-aride.

Dans cette zone, les aquifères carbonatés de grès calcaire plio-quadernaire et du calcaire de Dridrate (Hauterivien supérieur), sont en relation directe avec l'océan atlantique.

Ces aquifères subissent des prélèvements par pompage destinés à l'irrigation de cultures maraichères et à l'alimentation de la population rurale. Par conséquent, ils sont menacés par des problèmes de surexploitation et de salinisation par intrusion marine.

De nombreuses questions sont actuellement posées sur l'importance des ressources souterraines exploitées et sur leur état de salinité. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation des isotopes stables ^{18}O et ^2H , a permis de mettre en évidence la recharge des aquifères qui se fait par des pluies d'origine atlantique. Les eaux souterraines sont localement affectées par des intrusions d'eau océanique. La datation de certains échantillons par le ^{14}C a permis de révéler des âges anciens. D'autres analyses seront réalisées pour vérifier ces hypothèses.

Mots clés : Isotopie, Aquifère, Sahel Oualidia, Zone côtière.

RESUMEN

El Sahel de Oualidia se encuentra en el litoral atlántico. Está en el borde de la laguna de Oualidia con un clima predominantemente de tipo semi-árido.

En esta zona, los acuíferos carbonatados de las areniscas calcáreas plio-cuaternarias y de la caliza de Dridrate (Hauteriviense superior) están relacionados directamente con el Océano Atlántico.

Estos acuíferos están sometidos a descarga por bombeos utilizados para el riego de los cultivos de las marismas y para el abastecimiento de la población rural. Por ello, están amenazados por problemas de sobreexplotación y de salinización por intrusión marina.

Se plantean actualmente numerosas cuestiones sobre la importancia de los recursos subterráneos explotados y sobre su estado de salinización. Dentro del marco de este estudio, la utilización de isótopos estables de ^{18}O y ^2H permite poner en evidencia la recarga de los acuíferos que se efectúa por las lluvias de origen atlántico. Las aguas subterráneas se ven localmente afectadas por intrusiones de agua oceánica. La datación de algunas muestras por el ^{14}C demuestra la existencia de edades antiguas. Se realizarán otros análisis para verificar estas hipótesis.

Palabras clave: isótopos, acuífero, Sahel Oualidia, zona costera.

Introduction

Sur le plan des ressources en eaux, le contexte marocain est caractérisé par la rareté des ressources en eau, la forte irrégularité aussi bien spatiale, que temporelle et la dégradation des eaux qui subissent

différentes formes de pollution notamment d'intrusion marine touchant entre autre le bassin hydrologique de la lagune d'Oualidia. (Bahir, 2002).

Le Sahel Oualidia, situé sur le littoral atlantique marocain sous un climat semi-aride, comporte un système aquifère à dominance carbonatée et en con-

* Laboratoire de géologie appliquée, département de géologie, Faculté des Sciences Sémlalia BP 2390, Marrakech, Maroc
k.kaidrassou@ucam.ac.ma

** Laboratoire de Radio-Analyse et Environnement, Ecole Nationale des Ingénieurs de Sfax. Tunisie (ENIS).

*** Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN), Maroc.

tact direct avec l'océan atlantique. Il comporte plusieurs aquifères : le Plio-Quaternaire gréso-calcaire constituant l'aquifère supérieur le plus exploité, le calcaire de Dridrate constituant l'aquifère inférieur le plus productif mais le moins exploité et des aquifères profonds notamment celui du Jurassique non sollicité à cause de sa minéralisation élevée (Fakir 2001).

La région est à vocation agricole et pastorale. Une importante activité maraîchère utilisant uniquement l'eau souterraine s'est développée depuis plusieurs dizaines d'années et constitue la principale source des revenus des habitants. Une activité touristique se développe également autour de la lagune de Oualidia qui borde la zone d'étude du côté de l'océan.

De nombreuses questions sont actuellement posées sur l'importance des ressources souterraines exploitées et sur leur état de salinité. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation des isotopes stables ^{18}O et ^2H et radioactif ^{14}C , permettra de reconnaître l'origine et l'âge des eaux, de définir d'éventuels mélanges entre les eaux et de souligner les principales indéterminations qui émergent de cette identification et qui vont être abordées dans la suite de ce travail.

Contexte géologique et hydrogéologique

La région étudiée fait partie d'une vaste zone appelée Sahel qui est un bassin endoréique côtier.

La lagune Oualidia est située dans la région des Abda Doukkala, avec $32^{\circ} 44' 2''$ de latitude Nord et $09^{\circ} 02' 50''$ de longitude Ouest. Elle s'inscrit dans un rectangle de 7 Km de long sur 0,4 Km de large. Elle s'étend sur une superficie totale d'environ 3 Km² (figure 1).

Le sol est formé par de dunes consolidées d'âge plio-quaternaire et de nature gréso-calcaire. Elles sont allongées en longues crêtes d'orientation SW-NE parallèles au rivage.

En dessous, les formations géologiques rencontrées dans les forages sont :

- Les couches des argiles rouges (AR), d'âge Hauterivien supérieur. Ce sont des argiles rouges qui forment la base du plio-quaternaire. Leur épaisseur est variable selon la position par rapport au rivage.

- Le calcaire de Dridrate (CD), d'âge Hauterivien supérieur. Il est formé de calcaire gréseux plus au moins dolomitique très dur, d'environ 30 m d'épaisseur.

- Les argiles brunes (AB), d'âge Valanginien supérieur basal-Hauterivien inférieur. Elles sont for-

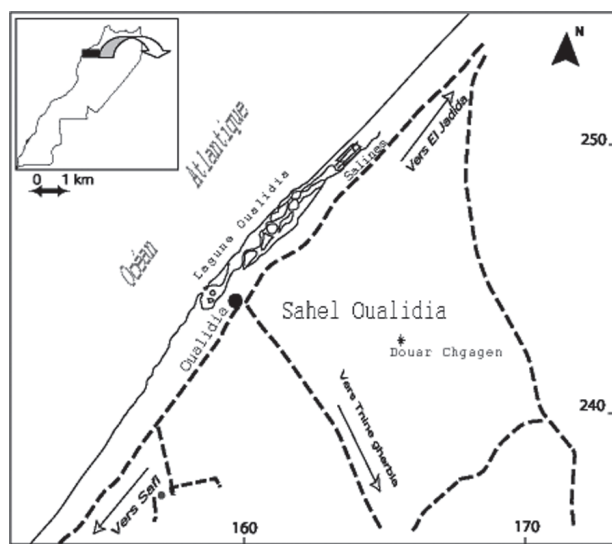


Fig. 1.— Situation géographique de la lagune d'Oualidia.

mées par des marnes grises constituant le substratum du calcaire de Dridrate.

- Les calcaires inférieurs d'âge Berriasien terminal-Valanginien basal.

- Dolomies jaunes d'âge Jurassique terminal. Ils sont bréchiques et gypseuses.

L'analyse de deux coupes géologiques réalisées perpendiculairement à la côte montre la succession stratigraphique des terrains traversés par les forages et conduit à l'interprétation de la structure des différentes formations :

- La série stratigraphique du bassin de Sahel d'Oualidia comporte des dépôts à faciès calcaire dominant. Les principales formations aquifères sont constituées par le calcaire de Dridrate de l'Hauterivien supérieur et les calcaires détritiques du Plio-quaternaire.

- Les formations plio-quaternaires diminuent de puissance de l'océan vers l'intérieur du Sahel.

- Les calcaires de Dridrate sont bien individualisés dans le Sahel.

- Les couches perméables sont séparées par des formations à dominante argileuse ou marneuse pouvant constituer un écran imperméable ou semi-imperméable :

- L'épaisseur des argiles de l'Hauterivien supérieur varie en fonction de la position par rapport à l'océan. Dans la partie côtière, ces argiles sont partiellement ou complètement érodées. Dans ce cas, les grès calcaires plio-quaternaires et le calcaire de Dridrate sont en contact direct.

- Les marnes du Valanginien supérieur Hauterivien inférieur forment le plancher général isolant les aquifères Hauterivien et Plio-Quaternaire des forma-

tions Jurassiques gypsifères. Leur épaisseur est faible (< 10m) dans la partie aval de la coupe C-D.

Le système aquifère est à dominance carbonatée, le plio-quadernaire constitue l'aquifère supérieur le plus exploité, il renferme une nappe libre avec une piézométrie monotone et des écoulements SE-NW dirigés vers l'océan (Fakir 2001). Il comporte une forte porosité d'interstice qui a été évalué à un minimum de 15% selon des mesures de diagraphie (DRHT-FAO 1994). Aussi renferme-t-il des formes karstiques de surface et des cavités souterraines sèches rencontrées au niveau de certains puits.

Le calcaire de Dridrate forme l'aquifère inférieur, nettement plus productif mais beaucoup moins exploité directement à cause de sa profondeur. En général il est en charge sous les argiles rouges. Les relevées piézométriques réalisées en 1999 (Fakir 2001) montre que la surface de la nappe est très poche du niveau 0 jusqu'à 5 Km du littoral, avec des gradients hydrauliques très faibles. Sur la frange côtière, son niveau coïncide pratiquement avec celui de l'aquifère plio-quadernaire.

Sous les argiles brunes, les formations géologiques potentiellement aquifère, ne constituent pas un objectif à cause de leur composante gypseuse très importante, engendrant une forte minéralisation (Fakir 2001).

Les aquifères plio-quadernaires et Hauterivien sont en relation directe avec l'océan atlantique et la lagune de Oualidia. En absence des écoulements de surface les eaux souterraines constituent la seule ressource en eau douce disponible. Ils assurent à la fois de l'alimentation en eau des populations et l'irrigation par un nombre élevé de puits à pompe.

La carte de conductivité relative au mois de septembre 2003, montre qu'en dehors de la frange côtière, les eaux souterraines présentent des eaux à faible minéralisation, la conductivité électrique est de l'ordre de 0,5 mS/cm. A proximité de l'océan, on dénote une augmentation de la minéralisation de 1ms/cm à 10 mS/cm (figure 2).

Ceci suggère l'existence d'une intrusion marine responsable de la salinisation des eaux souterraines.

Relation ¹⁸O-²H dans les eaux souterraines de la zone de Sahel Oualidia

Afin d'étudier l'origine des eaux souterraines et leur minéralisation, 14 points d'eaux ont été échantillonnés dans la zone de Sahel de Oualidia pour des analyses isotopiques, au mois de septembre 2003 (figure 3).

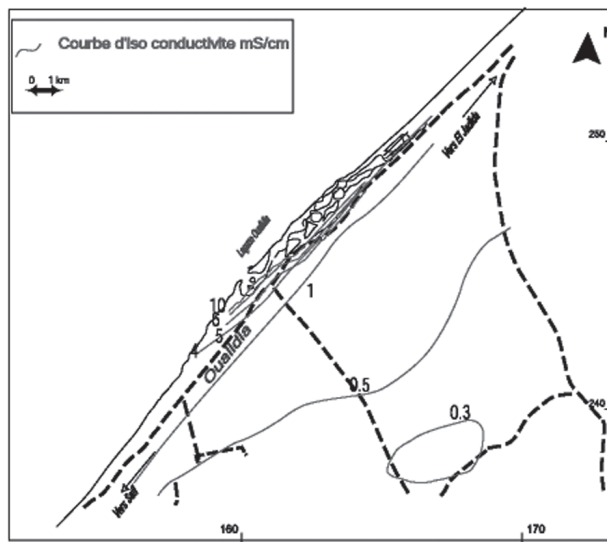


Fig. 2.—Conductivité électrique des aquifères de Sahel d'Oualidia, septembre 2003.

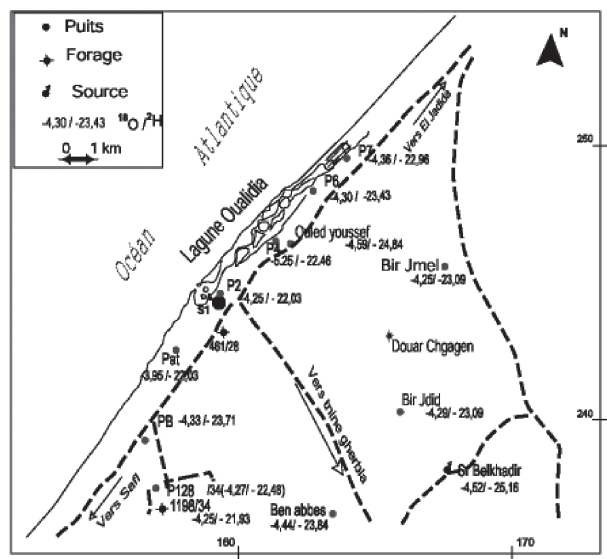


Fig. 3.—Répartition des points d'eau ayant connu des analyses isotopiques dans le secteur d'étude.

Les eaux souterraines affichent des teneurs en oxygène-18 qui varient entre -4,6 ‰ vs SMOW et -3,3 ‰ vs SMOW. Sur l'ensemble des échantillons, la teneur moyenne en ¹⁸O est de -4,24 ‰ vs SMOW. Les teneurs en deutérium oscillent entre -20,27 et -24,84 avec une moyenne de -22,95.

Sur le diagramme δ ¹⁸O vs δ ²H, deux principaux groupes d'eaux sont distingués (figure 4) :

— Un premier groupe, constitué par des eaux se plaçant proche de la droite des eaux météoriques.

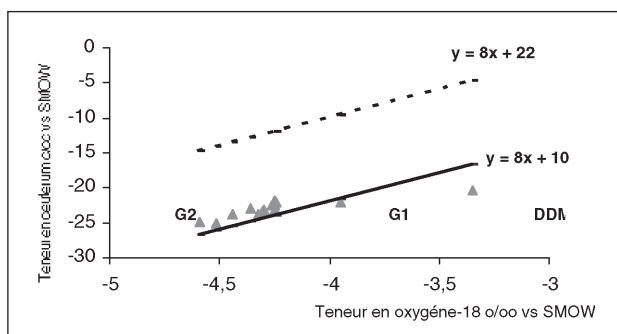


Fig. 4.—Relation ^{18}O - ^2H dans les eaux souterraines du Sahel Oualidia (Présentation des deux groupes G1 et G2).

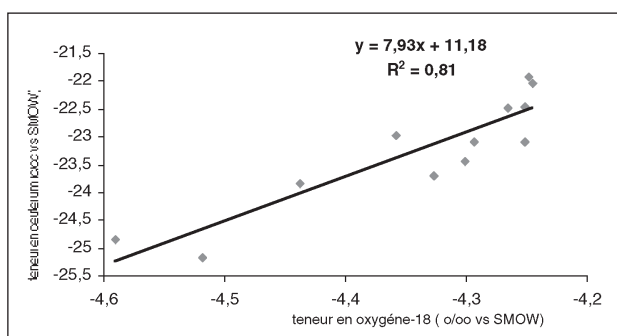


Fig. 5.—Relation ^{18}O - ^2H des eaux souterraines du Sahel Oualidia (Élimination de Pat et S1).

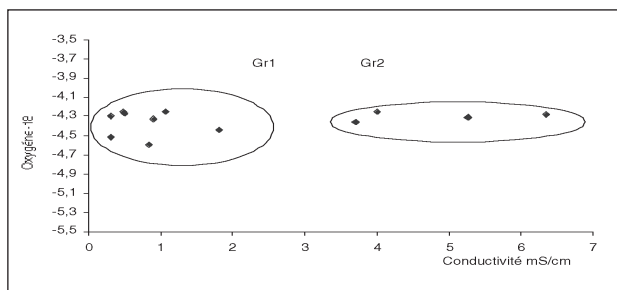
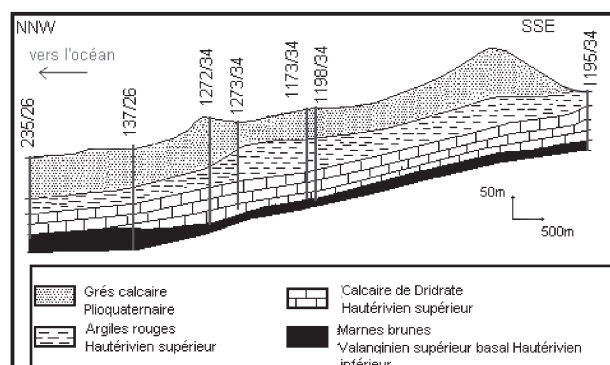


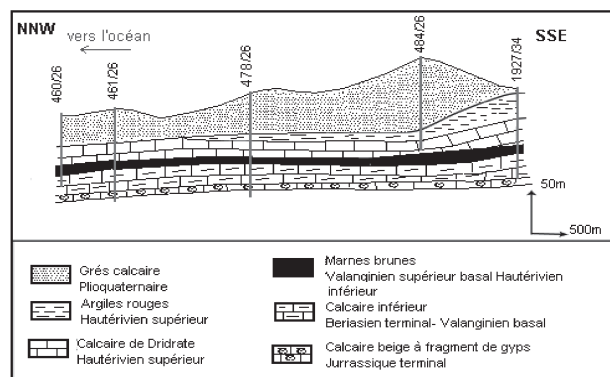
Fig. 6.—Relation oxygène-18/Conductivité des eaux.

L'examen de la relation $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ (figure 5), montre que ces eaux s'alignent sur une droite d'équation $^2\text{H} = 7,93^{18}\text{O} + 11,18$. Cette droite peu différente de celle des eaux météoriques mondiales (DDM) définie par Craig (1961), indique une origine météorique des eaux souterraines.

Les points analysés dénotent en moyenne un excès en deutérium de 11, plus proche de 10 qui caractérise l'atlantique que de 22 caractérisant la méditerranée. Ce qui renseigne sur la non influence méditerranéenne (Celle-Jeanton et al, 2001).



Coupe A-B



Coupe C-D

Fig. 7.—Coupes géologiques au niveau du Sahel de Oualidia (voir localisation sur la figure 2).

— Un deuxième groupe, enrichi en ^{18}O représenté essentiellement par le point S1 échantillonné d'une source se localisant dans la zone de rabattement des marées. Elle se place au-dessous de la DDM avec une concentration en ^{18}O de $-3,35$ ‰ vs SMOW. Son enrichissement isotopique explique sa contamination marine.

Sur le graphe représentant la variation des concentrations en ^{18}O en fonction de la conductivité (figure 6), après élimination du point S1 le plus enrichie, les puits localisés dans la frange côtière (Gr2) et le long de la lagune d'Oualidia ont des conductivités électriques plus élevées mais gardent le même niveau de concentration en ^{18}O que les eaux souterraines douces localisées loin de la côte (Gr1).

Par conséquent, la salinisation de ces eaux ne pourrait être expliquée par une contamination marine étant donnée qu'au niveau de la frange côtière les niveaux argileux séparant les aquifères entre eux ou les isolant des formations gypsifères sous jacentes, sont érodés ou peu épais (figure 7). Elle pourrait être le résultat d'un mélange entre les eaux profondes plus minéralisées et celle des aquifères supérieurs.

Tableau 1.—Analyses hydrochimiques en (mg/l) de quelques points des eaux souterraines de la zone de Sahel d'Oualidia

Nom Ech	Cl	NO ₃	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	Na	K	Mg	Ca	Nature
P _B	144,4	33,8	89,1	12,0	160,3	80,5	3,8	14,6	108,4	Plio-quat.
P ₁₂₈	42,2	34,7	17,2	60	108,3	124	7,1	0	2,7	Plio-quat.
461/26	313,8	0	607,3	18	201,3	154	0	61,4	311,1	Plusieurs aquifères (Jurassique)

Tableau 2.—Paramètres physiques et analyses des isotopes radioactifs de quelques points des eaux souterraines de la zone de Sahel Oualidia

Point d'eau	Nature	Type	Prof. (m)	T°C	CE mS/cm	pH	¹⁴ C pcm	Age apparent en ans BP
461/26	Plusieurs aquifères (Jurassique)	Forage (AEP)	> 100	19,6	8,13	7,54	34,50 ± 0,9%	8.543 ± 213
P128/26	Aquifère supérieur plio-quat.	Puits	23,215	21,5	0,49	7,67	86,70 ± 1,3%	1.147 ± 122
P _B	Aquifère supérieur plio-quat.	Puits	52,58	22,5	1,03	7,49	72,50 ± 1,30	2.589 ± 154

La contamination de l'aquifère plio-quaternaire par les eaux profondes a été déjà signalée au sud de la zone d'étude (Fakir et al 2002), et corroborée ci-après l'analyse du carbone-14.

Éléments de datation radioactive par le carbone -14

Le carbone 14 ou radiocarbone est l'élément le plus utilisé pour dater les eaux anciennes à teneurs très faibles en tritium. La période de demi-vie du carbone 14 est de 5730 ± 40 (Gadwin, 1962) ans et sa vie moyenne est donc de $5730/Ln^2$, soit 8267 ans. Le radiocarbone entre dans les eaux souterraines par l'intermédiaire du CO₂ atmosphérique via le sol (Olive, 1999).

La datation est basée sur la décroissance radioactive de la teneur en ¹⁴C du carbone minéral total dissous (CMTD).

Le temps de séjour moyen (ts) de l'eau entre la zone de recharge et le lieu de prélèvement est donné par la formule :

$$Ts = 8267. Ln (A_0/A_t) \text{ en années.}$$

A₀ = l'activité initiale en ¹⁴C du carbone minéral total dissous (CMTD).

A_t = L'activité résiduelle en ¹⁴C de CMTD mesuré dans des échantillons d'eau de cette nappe.

A₀ et A_t sont exprimés en pour cent de carbone moderne (pcm), avec $100 \text{ pcm} = 13,56 \pm 0,07$ désintégration par minute et par gramme de carbone (Karlen *et al.*, 1964).

Trois échantillons de la zone de Sahel de Oualidia ont été dosés pour le carbone-14 et hydrochimie au Laboratoire de Radio-Analyse et Environnement (LRAE) de l'Institut National des Ingénieurs de Sfax (ENIS) en Tunisie.

Il s'agit de deux puits captant le plio-quaternaire (P_B et P₁₂₈) se situant loin de la côte vers l'intérieur du Sahel et un forage (461/26) plus profond (figure 7). Ce dernier traverse les différents réservoirs aquifères dont les formations gypsifères du Jurassique terminal (coupe CD, figure 8), il alimente le centre urbain d'Oualidia en eaux potables.

Les eaux plio-quaternaires échantillonnées des puits (P_B et P₁₂₈), présentent un faciès bicarbonaté calcique ou bicarbonaté sodique (tableau 1). Tandis que les eaux plus profondes (461/26) fortement minéralisées, montrent un faciès mixte à dominance chloruré-sodique. Ce qui suggère un mélange entre les eaux des différents aquifères.

Les résultats d'analyse radiocarbone sont résumés sur le tableau 2.

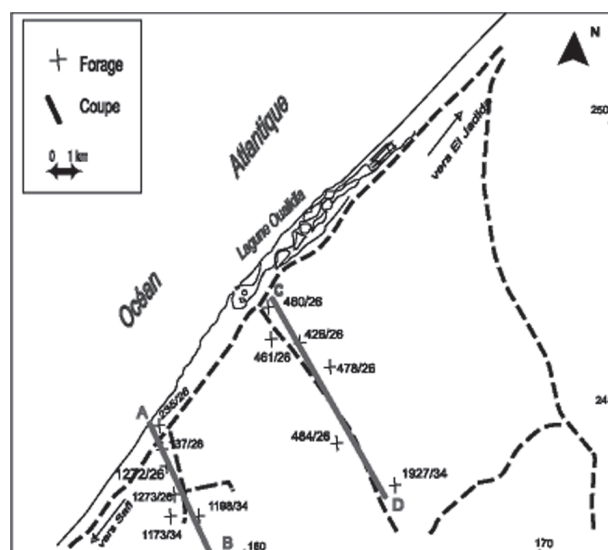


Fig. 8.—Localisation des coupes géologiques.

Le forage 461/26, fortement minéralisé, présente une activité de 34,5 et un âge de 8543 ans BP attestant d'un faible renouvellement des eaux profondes emmenant du Jurassique.

Concernant l'aquifère plio-quadernaire soumis directement à une recharge pluviale récente, les activités en carbone-14 sont nettement plus élevées. Le taux relativement plus faible présenté par le puits P_B témoigne d'un mélange entre les eaux récentes et celles plus anciennes provenant des formations jurassiques.

Conclusion

Les teneurs en isotopes stables (¹⁸O et ²H) des points échantillonnés de la zone de Sahel Oualidia s'alignent sur la droite météorique mondiale, indiquant une origine météorique des eaux souterraines, portant une nette signature atlantique.

L'activité agricole, l'intensité du pompage et le contact direct entre l'aquifère plio-quadernaire et la lagune de Oualidia, constituent autant de facteurs pouvant favoriser la salinisation des eaux souterraines par des intrusions marines.

L'examen de la relation $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$, montre que la contamination marine est très localisée.

La relation oxygène-18/conductivité montre une différente origine de la salinisation qui serait liée à un mélange avec des eaux profondes des formations gypsifères du Jurassique terminal.

L'isotope radioactif ¹⁴C a permis d'estimer l'âge de quelques points d'eaux échantillonnées du Sahel Oualidia. Cette datation a révélé un faible renouvellement des eaux profondes. Les eaux de la nappe plio-quadernaire à recharge récente sont affectées par

un mélange avec des eaux anciennes profondes. Ceci est confirmé par l'étude hydrochimique qui montre une nette concordance avec celle radiocarbone.

La présente étude apporte les premiers éléments de caractérisation isotopique des eaux souterraines d'Oualidia. D'autres analyses seront effectuées pour approfondir les connaissances géochimiques du système aquifère de la région.

Références

- Bahir M. et Mennani A. (2002). Problématique de la gestion des eaux souterraines au Maroc. *Estudios Geol.*, 58: 103-108.
- Celle-Jeanton H., Zouari K., Travi Y., Daoud A. (2001). Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie; Essai de typologie dans la région de Sfax. *Earth Planet. Sci. Letters*, 333: 625-631.
- Craig H. (1961). Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural water. *Science*, 133: 1833-1834.
- Fakir Y. (2002). *Contribution à l'étude des aquifères côtiers : cas du Sahel de oualidia (province de Safi, Maroc)*, Thèse de doctorat d'état.
- Fakir Y., El Mernissi M., Kreuser T., Berjami B. (2002). Natural tracer approach to characterize groundwater in the coastal Sahel of Oualidia (Morocco). *Environ. Geol.*, 43: 197-202.
- Gadwin H. (1962). Radiocarbon dating. *Nature*, 195: 943-945.
- Karlen I., Olsson I. U., Kallberg P., Et Kilicci S. (1964). Absolute determination of the activity of two ¹⁴C dating standards. *Archiv für Geophysik*, 4, 22: 465-471.
- Olive, 1999. Datation des eaux souterraines à long temps de résidence par le radiocarbone, mode d'emploi. *Hydrogéologie*, 1.

Recibido el 19 de julio de 2005
Aceptado el 24 de noviembre de 2005