

Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc)

Hydrodynamical, hydrochemical and isotopic characterization of the Kourimat aquifer system (Essaouira basin, Morocco)

M. Bahir¹, P. Carreira², M. Oliveira da Silva³, P. Fernandes²

RÉSUMÉ

La cuvette synclinale de Kourimat comprenant deux sous bassins celui de Zeltène et d'Igrounzar, est située dans la partie orientale du bassin d'Essaouira, abrite un système aquifère carbonaté, représenté par les calcaires du Cénomaniens et les calcaires dolomitiques du Turonien. Les eaux de cet aquifère constituent l'unique ressource pour la région tant pour l'alimentation en eau potable que pour l'irrigation.

Le Jurassique plus prépondérant dans le sous bassin du Zeltène est caractérisé par une dominance des formations plutôt étanches (marnes argiles rouges, etc.). Les formations carbonatées du Crétacé, d'extension spatiale fort dominante, représentent à peu près de 50% de la superficie du Zeltène et presque 85% de celle d'Igrounzar. Il s'agit de calcaires dolomitiques, calcaires marneux et de marno-calcaires et marnes calcaires très fracturés à karstiques. L'occupation des sols est assez sommaire. Elle se résume en gros à trois types de couverts: 1) des cultures (céréaliculture) sur les terrains marneux d'âge crétacé, sur le Plio-Quaternaire et l'Eocène; 2) des terrains nus correspondant aux affleurements des dalles calcaires fissurées et karstiques du Crétacé et aux formations jurassiques, et 3) des forêts (résineux) dans la partie aval du bassin versant sur les terrains d'âge plio-quaternaire et sur les renforts montagneux du Haut Atlas Occidental. A l'instar de toutes les régions défavorisées du Royaume, le bassin du Qsob est lui aussi soumis à un déboisement intensif (bois de chauffe et de cuisson).

L'apport de cet article a permis de caractériser l'aquifère Cénomano-turonien du point de vue hydrodynamique, hydrogéologique et hydrogéochimique. La carte piézométrique représentant deux niveaux aquifères regroupés montre un sens d'écoulement des eaux souterraines du sud-est vers le nord-ouest. Le gradient hydraulique varie de l'amont vers l'aval; il est faible dans la zone centrale en relation avec de meilleures caractéristiques hydrodynamiques. L'évolution de la piézométrie dans le temps montre des fluctuations interannuelles et saisonnières en relation avec les variations pluviométriques. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été calculées par le biais de l'interprétation des données des pompages d'essais, réalisés dans la région par l'Agence Générale de l'Hydraulique.

Sur le plan hydrochimique, les résultats des analyses physico-chimiques ont permis de déterminer les faciès chimiques des eaux des deux nappes, leur interaction et leur qualité pour la consommation humaine et l'utilisation en agriculture.

Pour mieux comprendre les modalités de fonctionnement du système aquifère de Meskala-Kourimat, l'étude isotopique entreprise a montré la variation des teneurs en O^{18} des points d'eau avec l'altitude des zones de recharge des différents exutoires. Le gradient altitudinal en O^{18} , estimé à 0,25‰ par 100 m confirme par ailleurs la validité régionale de celui-ci par d'autres auteurs. La relation oxygène-18/deutérium $\delta^2H = 7,74*(\delta^{18}O) + 10,83$ traduit un régime atlantique des précipitation sans évaporation qui suggère une infiltration rapide, confirmée également par l'importante fracturation des calcaires et calcaires dolomitiques de l'aquifère cénomano-turonien de Meskala-Kourimat.

Mots clés: Essaouira, Kourimat, Aquifère, calcaires dolomitiques, Pompages d'essai, Transmissivité, Piézométrie, Hydrochimie, Isotopie.

¹ Laboratoire d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences Semlalia, Bd Prince My Abdellah, BP; 2390, Marrakech, Maroc. Email: bahir@ucam.ac.ma

² Instituto Tecnológico e Nuclear, Sector de Química, Estrada Nacional 10, 2686-953 Sacavém, Lisboa, Portugal.

³ Centro de Geologia, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Ed. C2, 5.º piso, Campo Grande, 1749-016, Lisboa, Portugal.

ABSTRACT

The synclinal basin of Kourimat, subdivided in two sub-basins (Igounzar in the North, and Zeltene in the South), is situated in the oriental part of Essaouira basin shelters a carbonate aquifer system contained in the limestones and dolomitic limestones of the Cenomanian and the Turonian. These ground waters represent the only drinking water and irrigation resource for the region.

The geological formations outcropping in the studied area, start with the clay and marly formations of the terminal Jurassic in the south of Zeltene watershed, and end with the sandy and loamy Quaternary formations in coastal areas in the Low Qsob watershed. The Middle and Upper Cretaceous (marl, fractured limestone, and dolomites) represent the rest of the stratigraphic series especially in the areas of the Igounzar watershed (up to 85% of the outcrops) and in Zeltene (up to 50%).

The field occupation is not very significant. It basically consists of three types: 1) cultures (essentially cereals) where it is possible (on the marly soils of the Cretaceous, the Quaternary and the Eocene); 2) uncovered areas corresponding to the fissured and karstic limestone outcrops of the Cretaceous and the Jurassic formations, and 3) forests (coniferous trees) in the downstream part of the catchments area (Plio-quaternary soils and mountainous reinforcements of the Western High Atlas). Like for other undeveloped areas of Morocco, the Meskala basin is also subjected to an intensive deforestation (wood for heating and cooking).

The study undertaken on the Cenomano-turonian aquifer has allowed us to characterize it from the hydrodynamical, hydrogeological and hydrogeochemical point of view. The piezometric map of the two regrouped aquifer levels shows water flow senses from the SE to the NW. The hydraulic gradient varies from upstream to downstream, being weak in the central zone relative to the best hydrodynamic characteristics. The time evolution of the piezometry shows annual and seasonal fluctuations in connection with the variations of precipitations. Hydrodynamic characteristics have been calculated by means of the interpretation of data of pumping tests, performed in the region by the General Hydraulic Administration of Morocco.

On the hydrochemical point of view, results of chemical analyses have allowed us to determine the chemical facies of waters of the two aquifers, their interaction and their quality for the human consumption and their use in agriculture.

To better understand the functioning modalities of the Meskala-Kourimat aquifer system, an isotopic study has been performed that showed the variations relative to the altitude of the recharge zones of the different channels. The altitudinal gradient in ^{18}O , estimated to 0,25‰ every 100 m confirms the validity of this result at a regional scale. The oxygène-18/deutérium relationship ($\delta^2\text{H} = 7,74 * (\delta^{18}\text{O}) + 10,83$) indicates an Atlantic system of the precipitation without evaporation. This suggests a quick infiltration, also confirmed by the importance of the fracturation developed in limestones and dolomitic limestones of the Cenomano-turonian aquifer of Meskala-Kourimat.

Key words: Essaouira, Kourimat, Aquifer, dolomitic limestones, Pumping tests, Transmissivity, Piezometry, Isotopic hydrochemistry.

Introduction

Le Maroc, pays à climat semi-aride, où plus de 70% des ressources en eau sont renfermées dans les aquifères karstiques et fissurés (Aboufirassi *et al.*, 1991), se trouve depuis toujours confronté aux problèmes liés à la définition des réserves en eau, leur exploitation, leur préservation et leur gestion. Le bassin d'Essaouira connaît actuellement une importante croissance démographique associée à un large développement socio-économique qui nécessitent la mise en valeur de ses potentialités hydrogéologiques. Cependant, la grande hétérogénéité des formations aquifères, leur mauvaise répartition sur l'ensemble du bassin, la profondeur parfois très importante du niveau statique et la mauvaise qualité des eaux liée surtout aux teneurs

en chlorure et sulfate, sont des handicaps pour cette mise en valeur.

Le synclinal de Kourimat abrite une nappe turonienne offrant d'énormes quantités d'eaux d'une meilleure qualité (voir Bahir *et al.*, 2001). De ce fait, il est de loin l'aquifère le plus important par ses caractéristiques lithologiques (calcaires et dolomies) et structurales (intense fracturation et/ou karstification). Mais son extension est limitée, et il faut envisager l'utilisation des eaux de la nappe cenomanienne sous-jacente qui se caractérise par sa grande extension géographique et son importante puissance. Cet aquifère Cenomano-Turonien est la seule ressource dont dispose la population dans cette région, exploitée par des puits traditionnels à des fins d'alimentation d'eau potable. La ressource qu'abrite l'aquifère Sémonien est insignifiante.

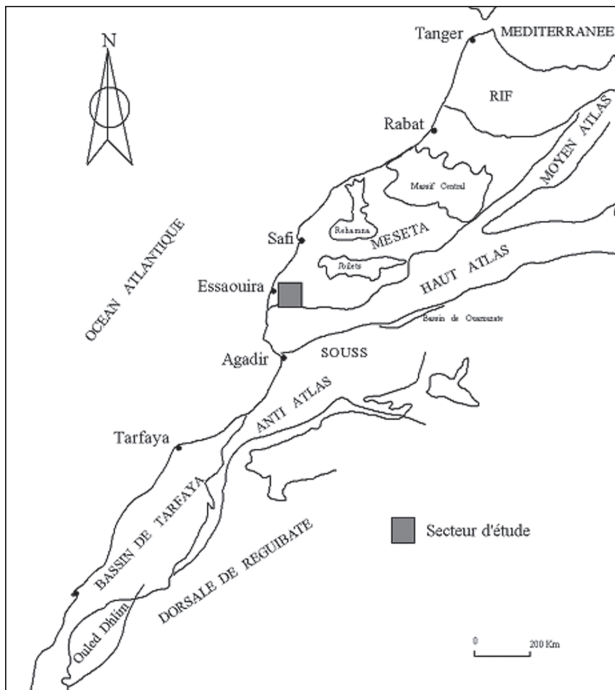


Fig. 1.—Secteur de l'étude sur la carte du Maroc.

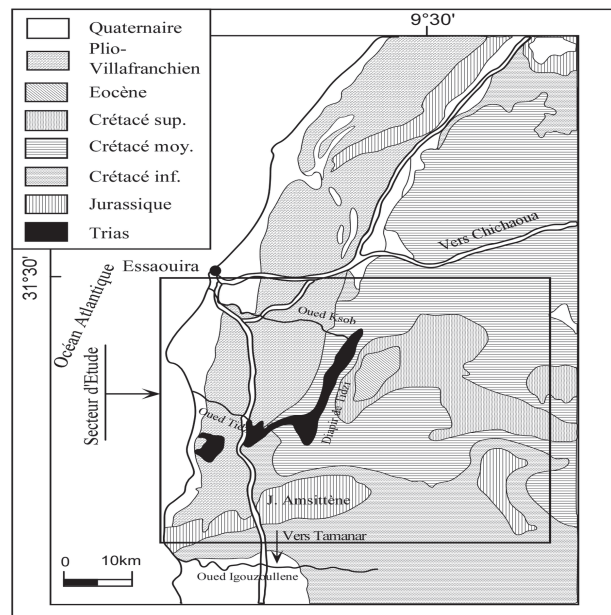


Fig. 2.—Carte du géologique du bassin d'Essaouira (d'après la carte géologique du Maroc au 1/500.000. Feuille de Marrakech): 1) Paléozoïque ; 2) Série rouge du Trias ; 3) Jurassique ; 4) Crétacé inférieur ; 5) Crétacé moyen ; 6) Crétacé supérieur ; 7) Eocène ; 8) Plio-Villafranchien ; 9) Quaternaire.

Caractéristiques de la région étudiée

La région étudiée correspond au synclinal de Kourimat, situé à environ 50 km à l'Est de la ville d'Essaouira (fig. 1). Elle fait partie du grand bassin du Sud Ouest Marocain (Duffaud, 1960 et Duffaud *et al.*, 1966) (fig. 2). C'est une zone à climat semi-aride où la moyenne des précipitations ne dépasse pas 300 mm/an, et varie fortement d'une année à

l'autre passant de moins de 150 mm (134 mm en 1992-93) à plus de 700 mm (708 mm en 1995-96). L'hiver est doux et humide, par contre l'été est chaud et sec. La température est modérée (18,6 °C en moyenne), avec un écart thermique important.

Le bassin des oueds Igrounzar-Zéltène constitue la terminaison du Haut Atlas Occidental. Il est représenté par des collines basses à tête arrondie, entaillées par un réseau hydrographique (figs. 3 et 4)

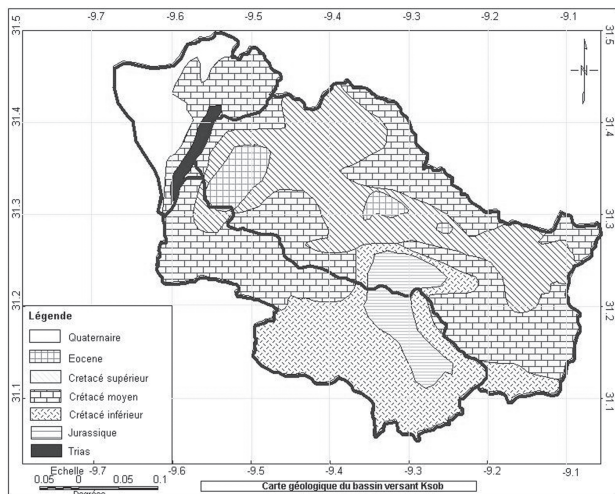


Fig. 3.—Cadre géologique et géographique (D'après : Carte géologique de Marrakech, 1/500000).

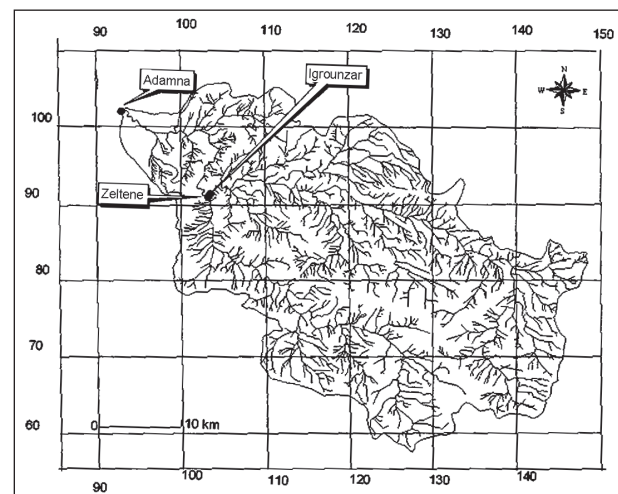


Fig. 4.—Réseau hydrographique des bassins de Igrounzar et Zéltène.

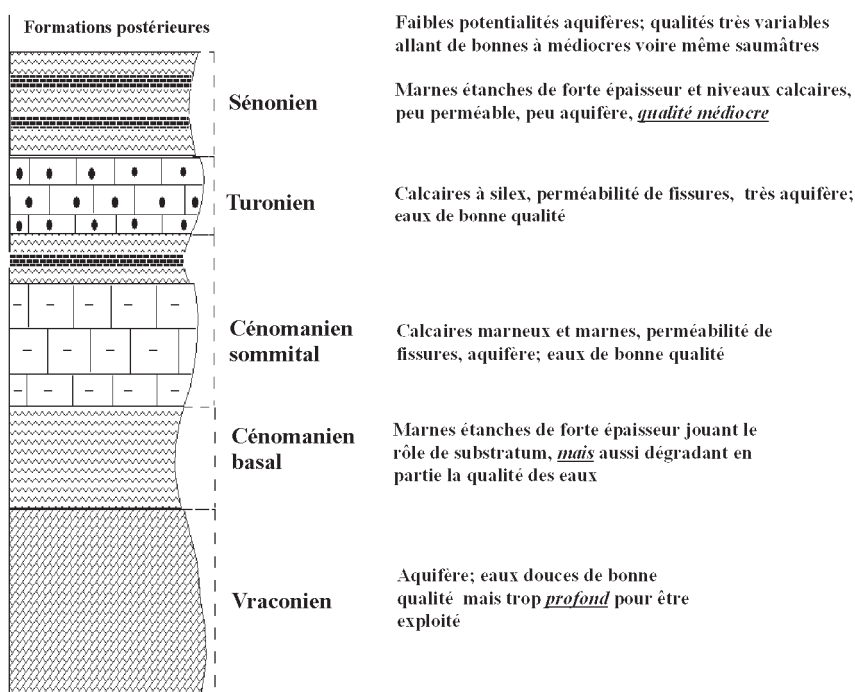


Fig. 5.—Lithologie des formations du Crétacé moyen à Jbel Aganane, au sud de Kourimat (Içame, 1994).

généralement peu profond, parfois encaissé. Le bassin est subdivisé en trois sous bassins qui sont: le sous-bassin de l'Igrouzgar au nord, du Zelten au sud et du Bas Qsob en aval (Laftouhi & Persoons, 2007). Ce dernier est en fait le résultat de la confluence des deux autres à la station dite de Zerrar à l'entrée du diapir de Tidzi.

La série stratigraphique du bassin est essentiellement visible au niveau des affleurements du Crétacé moyen et supérieur, et de quelques pointements de terrains éocènes et quaternaires. Le Crétacé moyen (fig. 5) comprend quatre unités lithostratigraphiques (Içame, 1994). La formation de l'oued Tidsi d'âge Albien, est constituée essentiellement par des argiles vertes, comprenant à la base des intercalations de calcaires et de bancs gréseux. Son épaisseur moyenne est de 200 m. La formation de Kechoulla est constituée de dolomies gréseuses, surmontées par des dolomies bioclastiques alternant avec des carbonates bioclastiques et des grès. Elle est d'âge Albien supérieur-Cénomaniens inférieur (Vraconien). La formation d'Aït Lamine (épaisseur moyenne de 240 m), attribuée au Cénomaniens est formée par des alternances répétées de calcaires bioclastiques ou lumachéliques et d'argiles jaunes-vertes à rares bancs gréseux. Elle montre également des bancs de gypse laminés. La formation turonien-

ne d'Agadir, d'une puissance de 60 m correspond à des bancs de calcaires fins riches en silex, surmontés par des calcaires dolomitiques et des dolomies massives. C'est le niveau le plus fissuré et karstifié. Il alimente la majorité des sources de la région et surtout celles de l'oued Igrouzgar au sud de Kourimat. Les affleurements du Sénonien occupent surtout le centre du synclinal. Le quaternaire correspond à des limons argileux qui affleurent au niveau des vallées des petits oueds traversant l'unité de Kourimat. Du point de vue structural, le synclinal de Kourimat fait partie du sillon nord-atlasique défini par Ambroggi (1963) comme étant une zone à plissements modérés résultant de la tectonique hercynienne, atlasique et du diapirisme (Souid, 1983; Medina, 1994 et Amrhar, 1995).

Etude hydrogéologique

Sur le plan hydrogéologique, l'analyse de la série stratigraphique décrite ci-dessus et des résultats des forages réalisés dans la région permettent de mettre en évidence un aquifère contenu dans le Cénomaniens et le Turonien et qui alimentent les plus grandes sources karstiques de la région (Jalal *et al.*, 2001). Le substratum correspond aux marnes vertes

Tableau 1.—Caractéristiques hydrodynamiques du système aquifère de Kourimat (PT, profondeur totale ; Q_{es} , débit d'essai ; s, rabattement ; T_d , transmissivité en descente ; T_r , transmissivité en remontée)

N° IRE	Aquifère	PT (m)	Q_{es} (l/s)	Durée (h)	s (m)	T_d (m ² /s)	T_r (m ² /s)
1112/52	Turonien	53,38	80	60	14,15	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$
648/52	Turonien	39,13	15,8	12	3,57	$1,70 \cdot 10^{-3}$	
650/52	Turonien	20,08	40	24	0,15	$1,12 \cdot 10^{-1}$	
1113/52	Turonien	35,36	115	46	3,86		$2,70 \cdot 10^{-1}$
645/52	Turonien	18,50	95	30	1,00	$8,00 \cdot 10^{-2}$	
664/52	Cénomanién	25,85	5	24	5,42	$2,60 \cdot 10^{-4}$	
662/52	Cénomanién	29,85	1,5	12	2,98	$2,20 \cdot 10^{-4}$	
649/52	Cénomanién	20,50	4	8	8,45	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$
894/52	Cénomanién	42,40	6	12	0,62		$8,50 \cdot 10^{-4}$

de l'oued Tidsi. Les potentialités hydrogéologiques du Vraconien, niveau susceptible de contenir d'importantes réserves en eau, sont encore mal connues vu sa profondeur très importante. Le Sénonien présente un intérêt hydraulique négligeable. Il alimente des sources à faible débit et il n'est capté que par des puits traditionnels surtout au niveau du synclinal de Meskala.

Caractéristiques hydrodynamiques

Dans la région de Kourimat, 9 pompages d'essai ont été réalisés par la DRHT. L'interprétation des données a abouti aux paramètres hydrodynamiques exposés au tableau 1. Notons que la répartition des ouvrages testés est très hétérogène sur le plan lithologique. Ce qui rend difficile la généralisation de l'information hydrodynamique acquise. En effet, les paramètres hydrodynamiques obtenus sont à caractère très localisé et de ce fait ne peuvent être généralisés à l'ensemble de l'aquifère capté par le puits d'essai.

Les transmissivités sont comprises entre $2,20 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $2,7 \cdot 10^{-1}$ m²/s. Les valeurs les plus fortes sont celles calculées au niveau des puits 650/52 et 1.113/52, captant le Turonien. Ces deux ouvrages sont situés dans le même contexte géologique et surtout structural. En effet, ils se localisent sur l'axe synclinal de la cuvette de Kourimat. Plus à l'aval du système aquifère, les eaux souterraines circulent dans le Cénomanién, dont les caractéristiques hydrodynamiques sont moins bonnes que celles du Turonien. Les transmissivités calculées pour les puits testés vont de $2,20 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $1,80 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

La grande dispersion des valeurs des différents paramètres hydrodynamiques provient de l'importante hétérogénéité de faciès lithologiques rencontrés

Tableau 1bis.—Nature des aquifères captés par les puits

N° IRE	Aquifère
1112/52	Turonien
650/52	Turonien
1113/52	Turonien
645/52	Turonien
651/52	Cénomanién
663/52	Cénomanién
649/52	Cénomanién

au niveau de chaque niveau aquifère (tableau 1bis) et des variations quantitatives et qualitatives de la fracturation.

Piézométrie

Carte piézométrique de 1996

La campagne de mesure du niveau piézométrique effectuée en période des hautes eaux (janvier 1996) a permis de dresser la carte piézométrique (fig. 6) établie pour tous les niveaux confondus montrant que le sens général de l'écoulement des eaux s'effectue du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Cependant, on note l'existence d'une ligne de partage des eaux ayant une direction SE-NW et qui influe sur le sens local de l'écoulement des eaux.

Le gradient hydraulique montre des variations qui peuvent être induites par la nature lithologique du réservoir (abondance de calcaires ou de marnes) et/ou par les variations qualitatives et quantitatives de la fracturation. Ainsi, dans la partie amont du secteur de Kourimat (zone sud-est), le gradient est relativement important, de l'ordre de 2,4%, c'est la zone d'alimentation du réservoir. Au centre, ce gradient diminue de quatre fois pour atteindre une valeur de

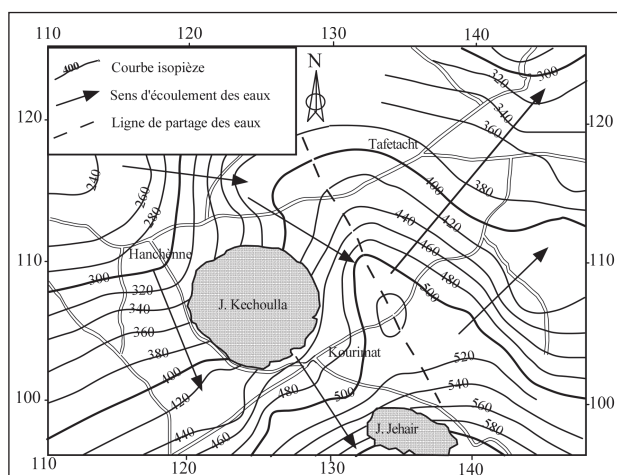


Fig. 6.—Carte piézométrique du Cénomano-Turonien (janvier 1996).

0,6%. Cette partie médiane ayant un gradient hydraulique faible correspond à la zone synclinale de Kourimat où les essais de pompage réalisés ont permis de calculer les meilleures caractéristiques hydrodynamiques de la région. Cette zone est donc la plus favorable pour l'implantation des points d'eau. Au nord, le gradient hydraulique augmente de nouveau pour atteindre une valeur moyenne de 2%.

Evolution de la piézométrie dans le temps

Pour le contrôle du niveau piézométrique du réservoir créacé du synclinal de Kourimat, la Direction Régionale de l'Hydraulique du Tensift (DRHT) a mis en service un réseau de piézomètres dont les relevés s'effectuent régulièrement à pas de temps mensuel. Ce réseau comprend 10 puits, 4 pour la nappe cénomaniennne et 6 pour la nappe du Turonien. La localisation des différents piézomètres ainsi que l'évolution piézométrique au niveau de certains d'entre eux sont reportés dans la figure 7.

Afin de faire une corrélation objective, nous avons introduit un graphique représentant l'évolution des précipitations mensuelles durant la période 1989-1997 à la station de Zerrar, point de confluence entre les oueds Igrounzar et Zéltène, voir figure 8.

La nappe turonienne de Kourimat

D'une manière générale, nous constatons une certaine stabilité piézométrique par rapport à la nappe cénomaniennne. En effet l'amplitude de variation du

niveau piézométrique est faible et varie de 1,5 à 5 mètres durant la période du suivi. Cette variabilité des réactions piézométriques au sein de l'aquifère turonien semble être contrôlée par les propres caractéristiques hydrodynamiques de chaque piézomètre.

L'évolution de la piézométrie annuelle de la nappe turonienne fait apparaître l'étroite relation avec les variations pluviométriques et l'allure des courbes de variation piézométrique incite à faire les commentaires suivants:

- La période 1984-1987 se caractérise par une baisse généralisée du niveau piézométrique.
- Pendant l'année 1988, la surface piézométrique a accusé une remontée qui a permis de rétablir l'ancien niveau piézométrique.
- En 1989, la piézométrie va entrer dans une nouvelle phase d'abaissement continue jusqu'à la fin de l'année 1995, cette baisse était de 0,10 à 0,20 m/an.
- Dès le début de l'année 1996 qui est très excédentaire de point de vue pluviométrique, tous les piézomètres vont enregistrer une remontée rapide de la surface piézométrique. Cette augmentation varie de 1,5 à 5 mètres.

La nappe cénomaniennne de Kourimat

Le puits 649/52 est situé sur la partie occidentale de la cuvette synclinale de Kourimat. Il montre une amplitude de variation du niveau piézométrique de 12 mètres. L'allure de sa courbe de fluctuations se caractérise par des variations saisonnières et annuelles en fonctions des apports pluviométriques.

Après une augmentation suite à la saison pluvieuse de 1984-1985, le niveau du plan d'eau s'est stabilisé durant les deux cycles de 1984-1985 et 1985-1986. L'année déficitaire 1986-1987 s'est marquée par une baisse très nette du niveau piézométrique (près de 3 mètres). Durant les trois cycles qui suivent, le niveau de l'eau augmente progressivement pour atteindre son maximum à la fin de 1990. Dès lors on entre dans une phase hydrologique très déficitaire durant laquelle, le niveau piézométrique baisse considérablement à une moyenne de 1,5 m/an. La saison pluvieuse de 1995-1996 s'est répercutée très positivement sur l'état piézométrique de la nappe qui a enregistré une remontée de 12 mètres en quatre mois. Il ressort clairement de cette analyse qu'aussi bien la recharge que la décharge de la nappe cénomaniennne se font d'une manière rapide.

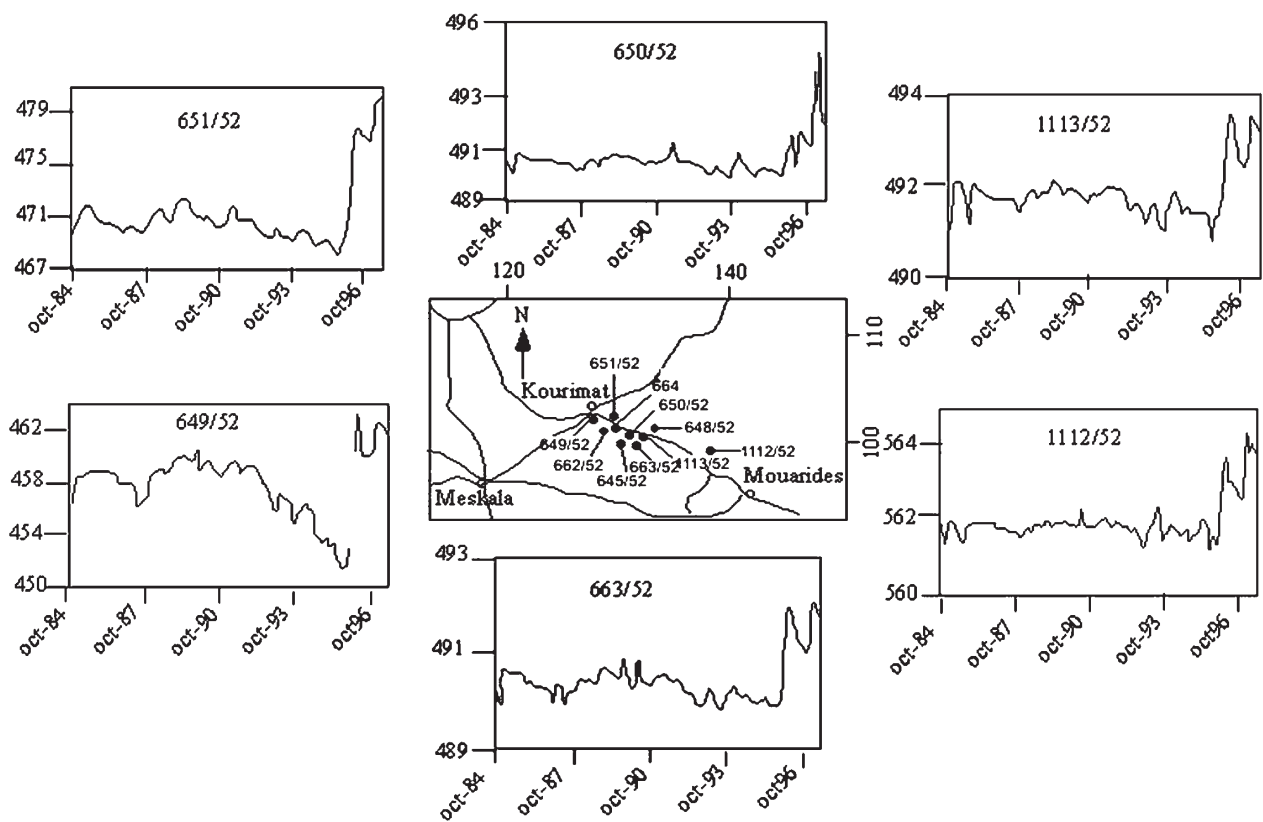


Fig. 7.—Evolution piézométrique du synclinal de Kourimat.

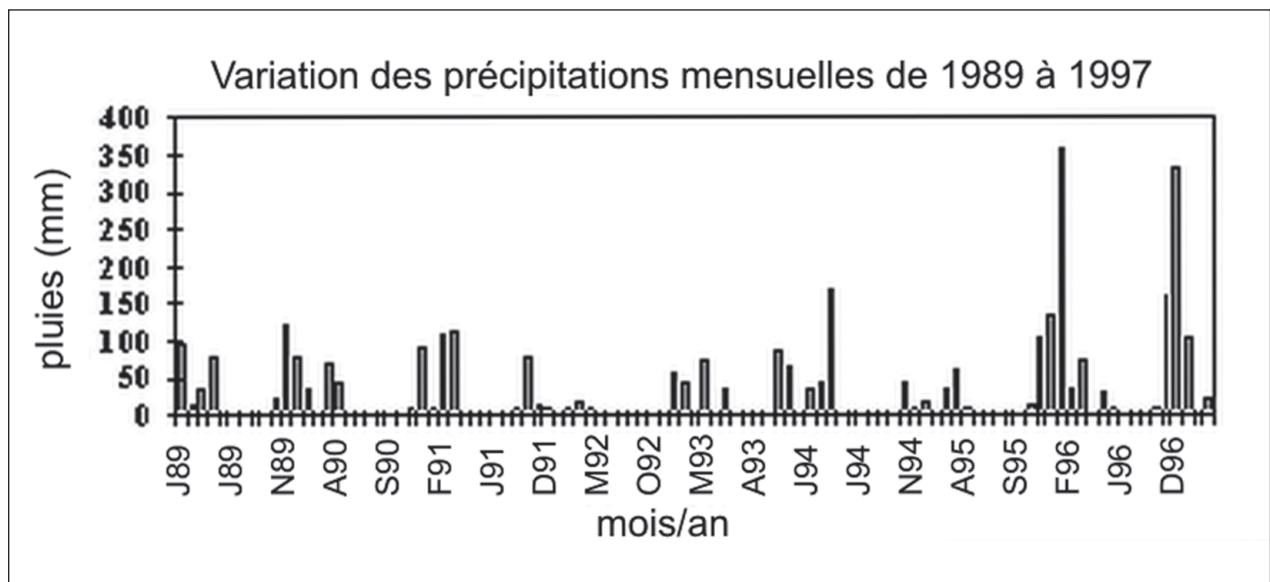


Fig. 8.—Evolution des variations mensuelles des précipitations à la station de Zerrar, point de confluence entre les oueds Igrounzar et Zéltène.

Le piézomètre 651/52 présente les mêmes allures de fluctuations et une amplitude de variation du niveau piézométrique similaires à celles décrites pour le N° 649/52. Cependant les particularités suivantes sont à noter:

— Au cours de la période sèche de 1989-1995, la vitesse moyenne d'abaissement du niveau piézométrique est de 0,8 m/an contre 1,5 m/an pour le 649/52.

— Pendant l'étiage de 1996, le niveau piézométrique s'est maintenu stable en comparaison à celui du 649/52.

Contexte hydrochimique

Cette étude est basée sur les analyses physico-chimiques des échantillons prélevés sur l'ensemble du bassin en janvier 1996. La température et la conductivité électrique ont été mesurées sur le terrain. Au laboratoire, les analyses ont porté sur les éléments chimiques majeurs, anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- et NO_3^-) et cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+). Sur le terrain, ont été mesurés les paramètres physiques:

— La température de l'eau grâce à un thermomètre qui donne une précision de 0,2 °C.

— La conductivité électrique par un conductivimètre de terrain type HANN HI 8733 et qui donne les mesures à 25 °C de manière automatique.

— Le pH par un pH-mètre type JENWAY 3051.

Au laboratoire, les analyses ont porté sur les éléments majeurs:

— Cations: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} :

• Le calcium et le magnésium ont été dosés par complexation par l'EDTA.

• Le sodium et potassium par spectrophotimètre à flamme au niveau de la faculté des Sciences Semlalia de Marrakech.

— Anions: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , et F^- :

• Pour les bicarbonates: par acidimétrie à l'aide d'une solution d'acide sulfurique.

• Pour les sulfates: par la méthode néphélométrique; les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de «Tween 20». Les suspensions sont mesurées au spectromètre.

• Pour les chlorures: par la méthode de Mohr dont le principe est le suivant; les chlorures sont

dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'Argent en présence de chromate de potassium. La fin de réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'Argent.

• Les nitrates et les fluorures ont été dosés au laboratoire d'Hydrogéologie de la faculté des Sciences d'Avignon par chromatographie ionique en phase liquide sur un appareil Dionex relié à un intégrateur électrique.

Les résultats analytiques reportés par Bahir *et al.* (2001), ont permis l'élaboration de diagrammes type Piper (1944) et le calcul de corrélations entre éléments et de rapports caractéristiques. L'ensemble a pour but de suivre l'évolution du chimisme du système aquifère, la différenciation entre les deux nappes le constituant, la discussion de l'origine des éléments en solution dans les eaux souterraines de la région et la qualité de ces eaux pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation.

La température des eaux souterraines de la région de Kourimat est comprise entre 15 et 21 °C, avec une moyenne de 19 °C, proche de celle de l'air enregistrée à la station Igrounzar pour la période allant de 1988 à 1997.

Les eaux souterraines de la région se caractérisent par leur grande variabilité hydrochimique. En effet, les conductivités enregistrées varient de 350 mS/cm à plus de 3.000 mS/cm, avec une moyenne de l'ordre de 1.500 mS/cm. L'examen de la carte de distribution spatiale de la minéralisation des eaux (fig. 9) montre une certaine zonalité chimique liée surtout à la nature lithologique des terrains traversés. Dans la partie sud du secteur étudiée (près de Mouarides), les eaux s'écoulent principalement dans la nappe turonienne, les conductivités sont ainsi faibles à modérées et ne dépassent pas 1.200 mS/cm. Plus à l'aval, aux environs d'El Amimet, les deux puits 50 et 51 captent des niveaux de calcaires marneux très riches en gypse. De ce fait, les eaux sont nettement plus minéralisées, dépassant 2 mS/cm.

Les faciès chimiques des eaux souterraines du synclinal de Kourimat sont très variés en fonction essentiellement de la nature lithologique des terrains traversés (fig. 10). En effet, les eaux du Turonien ont un faciès mixte bicarbonaté calcique et chloruré sodique. Celles du Cénomanién présentent un faciès chloruré sodique ou magnésien à franchement sulfaté calcique. Les teneurs très fortes en sulfates, dépassant 2 g/l, enregistrées par certains puits (105/520 et 789/52) sont liées à la

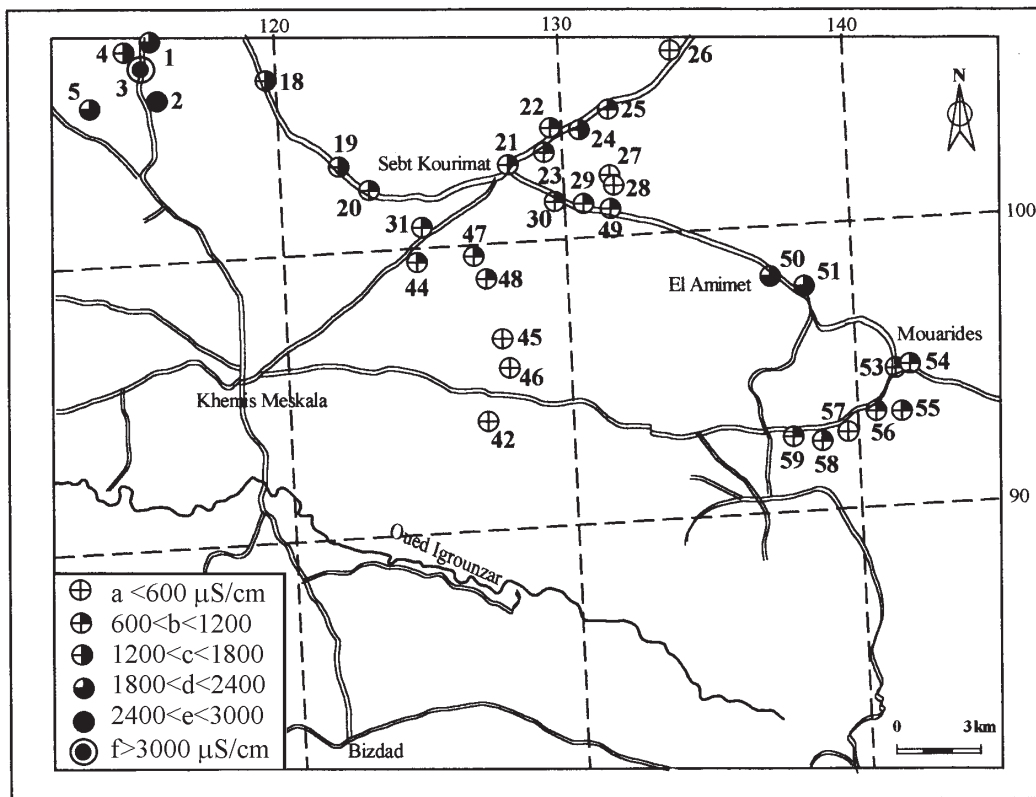


Fig. 9.—Répartition spatiale de la conductivité électrique dans les eaux souterraines de Kourimat.

dissolution des évaporites contenues dans les assises cénomaniennes (gypse et anhydrite). La distribution des faciès hydrogéochimiques semble être conditionnée par la lithologie de la nappe et du substratum, la profondeur de l'eau et les actions anthropiques, comme il a été montré ailleurs (Appelo & Postma, 1993)

Parmi les relations entre éléments chimiques, on note l'excellente corrélation entre sulfates-calcium, qui confirme l'origine évaporitique des sulfates par dissolution de l'anhydrite et du gypse du réservoir Cénomaniens. De même, les chlorures se corrént bien au sodium, ce qui laisse penser à une origine commune des deux éléments par dissolution de l'halite. enfin, les bicarbonates présentent les corrélations les moins significatives avec les différents cations du fait que les cations ne proviennent pas uniquement des roches carbonatées mais également des évaporites.

Le puits 105/52 affiche la teneur la plus forte en ions fluorures (plus de 7 mg/l de F^-). Ceci est à relier au lessivage des terrains phosphatés du Maestrichtien.

Les eaux souterraines de la région de Kourimat constituent la seule ressource pour l'approvisionnement en eau potable des différentes agglomérations rurales et pour l'irrigation. De ce fait, il est intéressant d'étudier la qualité de ces eaux. Concernant la potabilité de ces eaux et en utilisant les normes nationales de la Direction Générale de l'Hydraulique, on note que les eaux du synclinal de Kourimat sont de moyenne à bonne qualité selon la minéralisation globale, conductivité électrique et selon leur teneur en chlorures. Selon leur concentration en nitrates, elles sont de moyenne à mauvaise qualité pour 80% des puits prospectés, et 65% dépassent la norme OMS de 50 mg/l. La pollution par les nitrates serait surtout d'origine domestique et liée à la mauvaise protection des puits. Pour l'aptitude des eaux à l'irrigation, on utilise la méthode du $SAR = f(\text{conductivité})$ et on remarque les eaux appartiennent toutes à la classe S_1 pour le SAR, donc sans danger d'alcalinisation du sol. Pour la conductivité, les eaux se répartissent entre la classe C_2 et la classe C_4 , avec 66% appartenant à C_2 , qui correspond aux eaux pouvant être utilisées

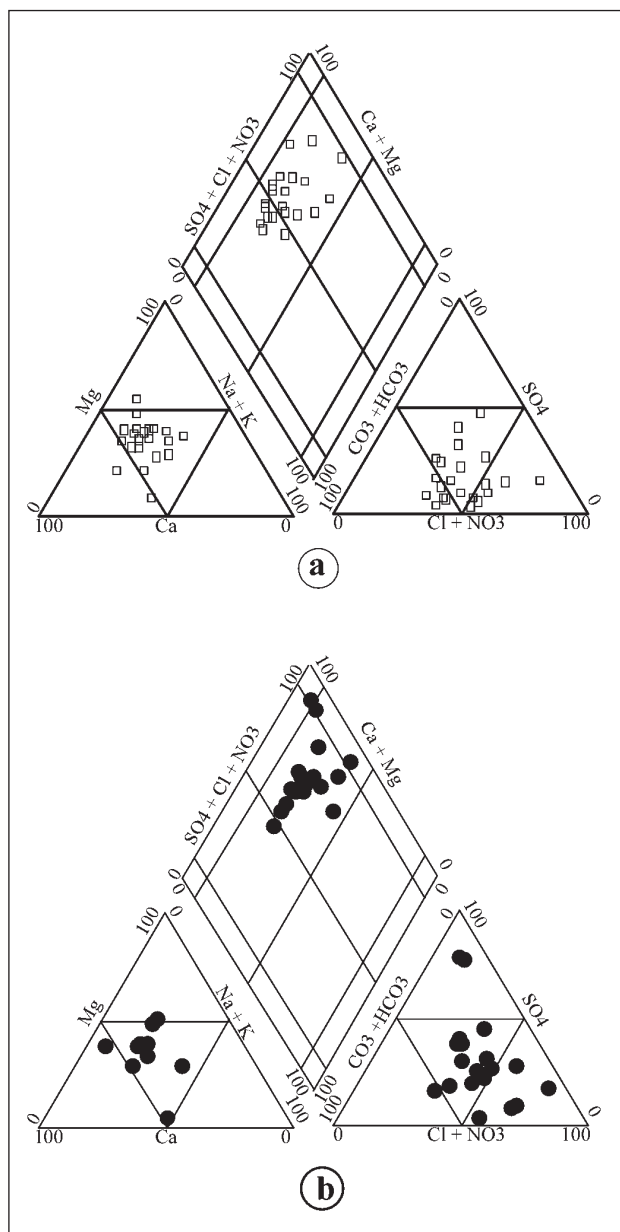


Fig. 10.—Faciès chimique des eaux (diagramme de Piper, 1944). a) Turonien; b) Cénomanién.

pour l'irrigation des plantes ayant une certaine tolérance aux sels.

Hydrologie isotopique

Oxygène-18 dans les eaux souterraines

Parmi les méthodes de l'hydrologie isotopique, celles fondées sur l'étude des variations naturelles

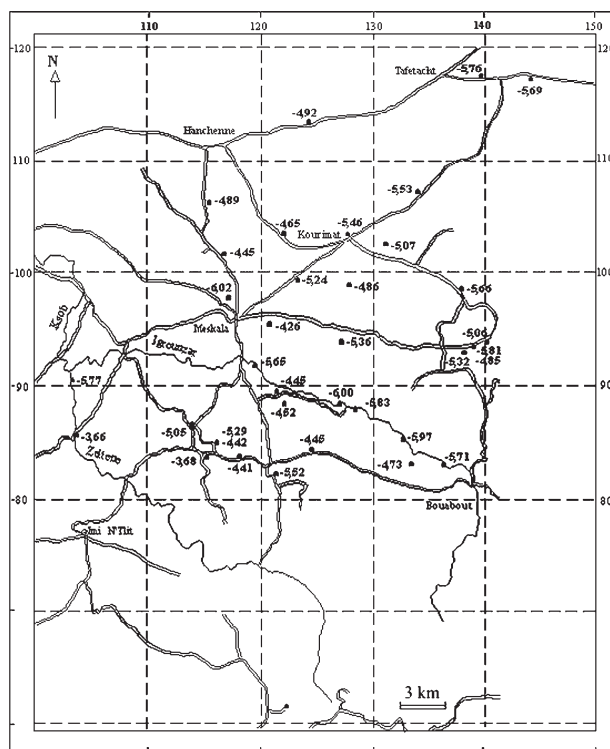


Fig. 11.—Répartition spatiale des points d'eau analysés pour l'oxygène 18.

des teneurs en isotopes constitutifs de la molécule d'eau sont devenues d'un usage courant (Fontes, 1976; Molinari, 1977; Iaea, 1981). Elles sont particulièrement adaptées aux régions caractérisées par d'importantes variations d'altitude et/ou soumises à des conditions climatiques marquées (Aranyossi, 1989), comme le cas du bassin synclinal d'Essaouira. L'estimation des aires d'alimentation des aquifères est nécessaire pour l'estimation des réserves en eaux souterraines et pour la délimitation des périmètres de protection de ces ressources. Pour la détermination des altitudes de recharge des aquifères, on a recours à l'hydrologie isotopique (Blavoux, 1978), qui revêt un intérêt particulier dans le cas du bassin synclinal de Meskala-Kourimat où les aires d'alimentation des sources et puits sont mal connues. Plusieurs points d'eau (sources, puits et forages) ont fait l'objet d'analyses isotopiques portant sur le dosage des teneurs en oxygène-18 (fig. 11; tableau 2).

Les eaux souterraines de la région présente des teneurs en oxygène-18 qui varient entre $-6,02 \delta \text{‰}$ et $-3,66 \delta \text{‰}$. Cette dernière forte valeur a été enregistrée au niveau du puits (N°IRE 865/52) en

Tableau 2.—Teneurs en oxygène 18 des différents points d'eau de l'aquifère Cénomano-turonien

Echantillons	Date	Nature	Z (m)	T °C	CE à 25°	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
675/52	03/11/95	Source	540	**	**	-6,00	
676/52	03/11/95	Source	580	**	**	-5,83	
867/52	03/11/95	Source	205	**	**	-5,77	
865/52	03/11/95	Puits	255	**	**	-3,66	
824/52	11/12/95	Puits	360	18	2.600	-4,89	
1049/52	11/12/95	Puits	430	20	804	-4,45	
820/52	12/12/95	Puits	430	16	382	-6,02	
801/52	15/12/95	Puits	390	19,5	1.460	-5,65	
75/52	15/12/95	Puits	465	18	1.080	-5,46	
796/52	15/12/95	Puits	545	19,5	352	-5,53	
898/52	15/12/95	Puits	498	16	567	-5,07	
108/52	16/01/96	Puits	460	22	579	-5,24	
40	16/01/96	Puits	450	21	2.300	-4,26	
809/52	16/01/96	Puits	630	18	506	-5,36	
807/52	17/01/96	Puits	515	21	1.020	-4,86	
105/52	17/01/96	Puits	600	15	2.010	-5,66	
1374/52	17/01/96	Puits	655	16	737	-5,06	
610/52	17/01/96	Source	675	20	520	-4,85	
613/52	17/01/96	Source	690	19	990	-5,32	
678/52	02/02/96	Source	500	17	1.495	-4,52	
677/52	02/02/96	Source	470	18	1.699	-4,45	
827/52	02/02/96	Puits	620	20	2.576	-4,45	
65	02/02/96	Puits	570	17	756	-4,41	
681/52	02/02/96	Source	690	18	995	-4,42	
828/52	02/02/96	Puits	695	20	823	-3,68	
829/52	02/02/96	Puits	640	18	500	-5,05	
610/52	18/06/96	Source	675	21	771	-5,81	-35,7
Tagmount	19/06/96	Oued	785	26,5	596	-5,71	
A. Bou Setta	19/06/96	Source	740	21	625	-4,73	-28,3
1319/52	19/06/96	Source	650	19,5	815	-5,97	-35,7
1317/52	19/06/96	Source	405	21	952	-5,65	-35,3
141/52	20/06/96	Puits	631	20,5	920	-5,52	-30,9
681/52	20/06/96	Source	640	21	528	-5,29	-28,9
Ait Daoud	20/06/96	Source	1.160	18,5	897	-5,89	-35,9
65/52	16/01/97	Puits	396	20	4.185	-4,92	
257/43	17/01/97	Source	361	22	1.855	-5,69	
1020/43	18/01/97	Puits	380	21	1.280	-5,76	

novembre 95, qui capte les écoulements hypodermiques de l'oued Zeltène. Cet enrichissement isotopique serait lié à l'évaporation des eaux de l'oued avant son infiltration. Hormis ce point élevé on peut distinguer deux groupes principaux.

Le premier représente les points d'eau les plus appauvries en oxygène-18, composés par les sources karstiques de l'oued Igrounzar qui affichent des teneurs entre $-6 \delta \text{‰}$ et $-5 \delta \text{‰}$. En adoptant le gradient altimétrique de $-0,26 \delta \text{‰}$ par 100 m établi par Bouchaou (1995) pour l'Atlas de Béni-Mellal, on peut calculer l'altitude des aires de recharge de ces sources. Ce dernier serait compris entre 900 et 1.200 mètres correspondant à l'affleurement des terrains du Crétacé moyen au niveau du flanc nord de l'anticlinal des Ida Ou Zemzem.

Le deuxième groupe présente des teneurs plus enrichies en oxygène-18, allant de $-5 \delta \text{‰}$ à $-4 \delta \text{‰}$. Ces teneurs plus fortes enregistrées par les points d'eau situés dans la partie nord de la région étudiée témoignent d'une recharge locale à des altitudes plus basses.

Relation Oxygène-18-Deutérium

Les points d'eau échantillons en juin 1996 ont fait l'objet de mesures en deutérium. Les résultats obtenus (tableau 3) ont été reportés sur le diagramme $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$ (fig. 12). Les points représentatifs des différents échantillons ainsi que d'autres situés dans la zone côtière d'Essaouira s'alignent bien selon une

Tableau 3.—Teneur en oxygène 18 et en deutérium de quelques points d'eau du Cénomano-turonien

Sources	Altitude d'émergence	Altitude de recharge connue	Altitude de recharge estimée	Nov. 1995		Juin 1996	
				^{18}O (‰)	^{18}O (‰)	^{18}O (‰)	^2H (‰)
676/52	580		1.100-1.200	-5,83			
675/52	540		1.100-1.200	-6,00			
867/52	255		1.100-1.200	-5,77			
610/52	675		1.100-1.200		-5,85		-35,7
681/52	640	900-1.000			-5,29		-28,9
Bou Setta	740	700-800			-4,73		-28,3
1.319/52	650		1.100-1.200		-5,97		-35,7
1.317/52	405		1.000-1.100		-5,65		-35,3
141/52	631		1.000-1.100		-5,52		-30,9
Ait Daoud	1.160	1.100-1.200			-5,89		-35,9

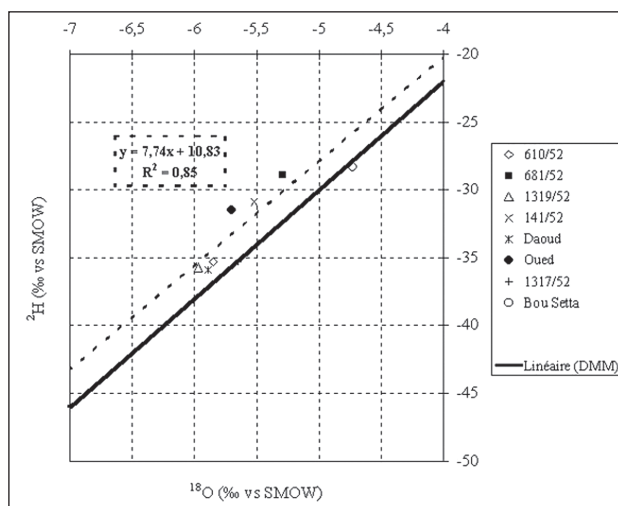


Fig. 12.—Relation oxygène 18 – deutérium dans les eaux souterraines de la région.

droite d'équation: $\delta^2\text{H} = 7,74 * (\delta^{18}\text{O}) + 10,83$ Cette droite est peu différente de celle des eaux météoriques mondiales (DMM) définie par Craig (1961), et traduit un régime atlantique des précipitations.

Aucune de ces eaux n'est marquée de façon significative par l'évaporation. Cette absence d'enrichissement par évaporation suggère sous ce climat, une infiltration rapide des eaux météoriques, confirmée en cela par l'intense fracturation des affleurements calcaire et calcaire dolomitique de l'aquifère céno-mano-turonien. L'effet isotopique dû à l'évaporation est donc probablement négligeable devant celui induit par les variations des altitudes de recharge (Bahir *et al.*, 2007).

Conclusions

Une étude hydrogéologique, hydrodynamique et hydrogéochimique a été entreprise sur le système aquifère du synclinal de Kourimat. Ce dernier est constitué de deux nappes d'importance inégales, le Cénomaniens et le Turonien. La carte piézométrique établie pour les deux niveaux confondus montre un sens d'écoulement général des eaux du sud-est vers le nord-ouest, avec des gradients hydrauliques variables de l'amont vers l'aval. Les caractéristiques hydrodynamiques des deux nappes sont très variables. En effet, les transmissivités calculées sont de $1,7 \cdot 10^{-3}$ à $2,7 \cdot 10^{-1}$ m²/s et de $2,2 \cdot 10^{-4}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$ m²/s, respectivement pour le Turonien et le Cénomaniens.

L'étude des paramètres physico-chimiques a montré la grande variabilité chimique des eaux souterraines de la région, avec des conductivités allant de 0,3 à plus de 3 mS/cm. Les eaux du Cénomaniens sont les plus minéralisées, avec des faciès chimiques chlorurés sodiques et magnésiens à sulfatés calciques. Celles du Turonien sont moins chargées et ont des faciès plus carbonatés.

D'une manière globale, les eaux sont de moyenne qualité pour l'alimentation en eau potable, et de moyenne à bonne qualité pour l'irrigation.

L'étude isotopique entreprise a montré qu'on est en présence d'un régime atlantique des précipitations, aucune des eaux n'est marquée par l'évaporation. La présence de lapiez dans les zones d'alimentation du système aquifère, d'une topographie accentuée qui ne favorise pas le séjour des eaux à la surface et l'importance de la fracturation des cal-

caires et calcaires dolomitiques de l'aquifère céno-mano-turonien seraient responsables de cette infiltration rapide des précipitations.

Références

- Aboufirassi, M.; El Hebil, A.; El Mandour, A.; Amrhar, M.; Bahir, M.; Errouane, S.; Fakir, Y.; Laftouhi, N.E. & Quortobi, M. (1991). Hydrologie des milieux fissurés: Milieux carbonatés et milieux de socle. *Eau et développement*, 11: 62-68.
- Ambroggi, R. (1963). Etude géologique du versant méridional du Haut Atlas Occidental et de la plaine du Souss. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 157: 1-321.
- Amrhar, M. (1995). *Tectonique et inversions géodynamiques post-rift dans le Haut Atlas occidental: Structures, instabilités tectoniques et magmatisme liés à l'ouverture de l'Atlantique central et la collision Afrique-Europe*. Thèse d'Etat, Faculté Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc, 253 pp.
- Appelo, C.A.J. & Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, Leiden, The Netherlands, 649 pp.
- Aranjosi, J.F. (1989). Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. *Hydrogéologie*, 3: 159-166.
- Bahir, M.; Jalal, M.; Mennani, A. & Laftouhi, N. (2001). Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geológicos*, 57: 47-52.
- Bahir, M.; Silva, M.O. & Carreira, P. (2007). Ressources en eau en zones semi-arides, Etat des lieux: Cas du Bassin d'Essaouira (Maroc Atlantique). In: *Los acuíferos costeros: retos y soluciones* (Pulido Bosch, A.; López Geta, J.A. & Ramos González, G., eds.), IGME, Madrid, 529-540.
- Blavoux, B. (1978). *Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée*. Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France, 333 pp.
- Bouchaou, L. (1995). *Fonctionnement des aquifères Atlasiques et relation avec les aquifères de la plaine. Cas de l'Atlas de Béni-Mellal et la plaine du Tadla (Maroc)*. Thèse d'Etat, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc, 154 pp.
- Duffaud, F.; Brun, L. & Fontboté, J.M. (1966). Le bassin du Sud-Ouest marocain. In: *Bassins sédimentaires du littoral Africain* (Reyre, D., ed.), Symposium New Delhi, Publications Associés du Service Géologique Africain, Paris, 5-26.
- Duffaud, F. (1960). Contribution à l'étude stratigraphique du bassin secondaire du Haut Atlas Occidental (Maroc). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7: 728-734.
- Fontes, J.Ch. (1976). *Isotope du milieu et cycle des eaux naturelles: Quelques aspects*. Thèse d'Etat, ès-Sciences Naturelles, Université pierre et Marie Curie de Paris, France, 218 pp.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (1981). Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. In: *Stable Isotope Hydrology* (J.R. Gat, J.R. & Gonfiantini, R., eds.). IAEA Technical Reports Series N° 210, 337 pp.
- Içame, N. (1994). *Sédimentologie, Stratigraphie séquentielle et diagenèse carbonatée des faciès du Crétacé moyen du bassin d'Essaouira (Haut Atlas, Maroc)*. Thèse de doctorat de l'Université de Tunis, 300 pp.
- Jalal, M.; Blavoux, B.; Bahir, M.; Bellion, Y.; Laftouhi, N.E.; Puig, J.M.; Mennani, A. & Daniel, M. (2001). Etude du fonctionnement du système aquifère karstique céno-mano-turonien de l'oued Igrounzar (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, 32: 803-817.
- Laftouhi, N. & Persoons, E. (2007). Influence des variations climatiques sur le régime hydrologique du bassin versant du Qsob (Essaouira Maroc). *UNESCO, HydroSciences Montpellier, Technical Document in Hydrology*, 80: 85-98.
- Medina, F. (1994). *Evolution structurale du Haut Atlas Occidental et des régions voisines du Trias à l'actuel dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique central et de la collision Afrique-Europe*. Thèse d'Etat, Université Mohammed V de Rabat, Maroc, 260 pp.
- Molinari, J. (1977). Quelques remarques pratiques et une présentation commode facilitant l'exploitation des variations naturelles en deutérium et en oxygène-18 dans les eaux. *Journal of Hydrology*, 32: 383-392. doi:10.1016/0022-1694(77)90028-2
- Piper, A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union Transactions*, 25: 914-923.
- Souid, A.K. (1983). *Etude tectonique et microtectonique des injections du Trias du bassin d'Essaouira pendant la compression alpine dans l'avant pays atlasique (Maroc)*. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Montpellier, France, 258 pp.

Recibido el 29 de agosto de 2006
Aceptado el 29 de noviembre de 2007
Publicado online el 22 de abril de 2008