

CONTRIBUTION DES ISOTOPES DE L'ENVIRONNEMENT POUR LA COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT DE L'AQUIFERE MIO-PLIOQUATERNAIRE DU HAOUZ DE MARRAKECH (MAROC)

A. Abourida*, S. Er-rouane*, M. Bahir*, M. Olivera da Silva**, A. Cheggour*

RESUME

Parmi les aquifères régionaux importants de très grande extension au Maroc, celui du Haouz qui s'étend sur une superficie de 6.000 km², circule au niveau du remplissage mioplioquaternaire issue du démantèlement de la chaîne Atlasique. Ce dernier présente un faciès constitué de galets, graviers, argiles, marnes et calcaires, dont la puissance atteint les 100 mètres. Cet aquifère joue un rôle très important dans l'alimentation en eau potable des habitants de la plaine du Haouz d'une population de plus de 4 millions d'habitants, en sus d'un complément à l'irrigation de 80.000 ha.

Le climat aride de type continental, qui y règne se caractérise par des amplitudes thermiques assez importantes entre l'hiver et l'été. La pluviométrie présente une moyenne de 250 mm par an.

La piézométrie de la zone étudiée est caractérisée par un écoulement général du sud vers le nord ouest en direction de l'oued Tensift, également principal collecteur des eaux de surface de la région.

Une campagne de mesures isotopiques de plus d'une vingtaine d'échantillons prélevés en janvier 2002 au niveau de puits bien répartis dans la zone d'étude, au pu montrer une variation des teneurs en O¹⁸ avec l'altitude des zones de recharge.

En outre, la relation oxygène-18 deutérium ($\delta^2\text{H} = 8,9032 \delta^{18}\text{O} + 14,214$ ($R^2 = 0,7449$) traduit un régime atlantique des précipitations, sans évaporation, ce qui implique que la recharge se fait rapidement, probablement à travers les formations miocènes gréseuses largement fissurées à l'affleurement de l'aquifère mio-plioquaternaire.

Un gradient altitudinal moyen de $-0,26 \text{‰}$ par 100 mètres est déterminé pour la plaine du Haouz, très proche des autres valeurs trouvées pour d'autres régions au Maroc, confirmant la validité régionale de celui-ci.

Les variations des teneurs en oxygène-8 peuvent être interprétées en termes de différence d'altitude entre les altitudes de recharge et d'émergence.

Mots clés: *Aquifère mio-plioquaternaire, isotopie, gradient altitudinal, Haouz de Marrakech.*

ABSTRACT

The study area «Haouz plain» is Located at the center of Morocco, it extend on a surface of 2800 km², limited by the Jbilet hills in the North, the High-Atlas range in the South, R' dat wadi in the East and the Essaouira-Chichaoua plateau in the West. The area climate is semi-arid, characterized by low precipitations varying between 160 mm/year and 250mm/year and important variation in temperature between the winter and the summer with respectively 5°C and 45°C. Its hydrographic network is represented by the Tensift system which receives all the affluents of central and Western Haouz. These affluents are characterized by weak flows with important seasonal variations.

The Haouz plain is a sedimentary basin, being along the northern edge of the high atlas, it presents a geologic succession going from the primary to the recent Quaternary. The mio-plioquaternary formations, stemming from the dismantling of the atlasic chain, refuge an important and generalized water table on all the plain. This water table shows very variable hydrodynamic characteristics, reflecting the complexity of the deep structures of the plain, 1986) and also the lithological variability of the mio-plioquaternary formations.

* Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

** Faculté des Sciences de Lisbonne, Portugal.

The Haouz plain includes also the deep reservoirs of the Jurassic, Cretaceous and Eocene which finish some meters at the north of the Atlas, thus having a very limited extension and thereafter a low productivity.

Five representative samples of water taken on the haouz water table were analyzed by the ABHT, the projection of these contents on the potability diagram enabled us to show that water of the water table generally has a good quality to passable. In the east quality becomes poor related to the existence of a zone arranged for agriculture (piezometer 1903/44). The nastiest potability is observed on the piezometer 3828/44 located at north of Marrakech at elazouzia zone of spreading of worn water of this city.

The representation of the percentages of anions and major cations shows the prevalence of ions Ca^{2+} and HCO_3^- and makes it possible to show up the Bicarbonate calcic facies of the water table.

During these last decades, the use of stable isotopes, such oxygen 18 and deuterium, became necessary for the study of subsoil waters, it makes possible the estimation of the surfaces of refills, the determination of water origin. The samples taken on water points well distributed in the area of study allowed us a better comprehension of the function of the plioquaternary water table. The relation oxygen 18, deuterium shows that water is aligned on a line of slope 8.09, slightly different from the world meteoric line, thus characterizing precipitations of oceanic origin which did not endure notable isotopic fractionation therefore not important evaporation.

Using the isotopic measures for the samples taken in January 2002 on wells well distributed in the area of study, allows us to show a variation of the contents of O18 with the altitude of the zones of refill. Thus we could delimit the surfaces of refill between 1500 and 800meters height. The relation oxygen-18 deuterium $\delta^2\text{H} = 8.0932 \delta^{18}\text{O} + 14.214$ ($R^2 = 0.7449$) translated an Atlantic mode of precipitations without remarkable evaporation.

Key words: *Mio-plioquaternary aquifer, isotops, altitudinal gradient, haouz of Marrakech.*

Introduction

L'évaluation et la gestion optimale des ressources en eaux est un problème important surtout dans les régions touchées par les années de sécheresse consécutives ou l'eau est un facteur limitant. Indépendamment de tout changement climatique, la gestion de l'eau est l'un des grands problèmes qui conditionne l'avenir du Maroc. Le pays devrait être en situation de stress hydrique et devra au delà de 2020, se trouver en situation de pénurie d'eau, car des problèmes importants de qualité se poseront en relation avec l'érosion, la salinisation et la pollution (Bahir *et al.*, 2002).

Actuellement 400 millions de m^3 d'eau sont exploités de la nappe mio-plioquaternaire de la plaine du Haouz (région de Marrakech), pour irriguer en totalité ou pour apporter un complément d'irrigation à 80,000 ha. Durant les dernières années de sécheresse, on estime à plus 4 milliards de m^3 le volume fourni par ce réservoir à l'irrigation (Elhbil, 1999). Dans ce sens l'estimation rigoureuse de ces ressources devient de plus en plus indispensable. Elle s'appuie sur la représentation des réservoirs à l'aide de modèles mathématiques dont la fiabilité dépend des paramètres hydrauliques imposés. Aussi dans cette étude on a eu recours à l'utilisation des techniques isotopi-

ques pour la détermination des aires de recharges ainsi que l'origine de l'eau en vue de'une meilleure compréhension du fonctionnement du système aquifère.

Situation géographique

La zone d'étude fait partie de la plaine du Haouz, qui est située au centre du Maroc (Fig. 1). Elle s'étend sur environ 6.000 Km^2 et se présente comme un bassin de sédimentation d'origine tectonique de topographie monotone. Elle est limitée entre les Jbilet au nord, le Haut-Atlas au sud, les plateaux d'Essaouira-Chichaoua à l'ouest et le premier versant du moyen atlas à l'est, prenant ainsi une forme allongée d'est en ouest.

Le réseau hydrographique de la zone s'organise en deux systèmes : le Tensift qui reçoit en rive gauche tous les Oueds provenant du Haut Atlas, se trouvant dans le Haouz central entre l'oued R'dat et l'oued N'fis, le second étant le Tassaout-Lakhdar affluents de l'Oum Rbiaa dans le Haouz oriental.

Le climat aride qui y règne se caractérise par des précipitations annuelles de l'ordre de 250 mm, avec un maximum en mars et avril. Les températures montrent des variations importantes entre l'hiver et

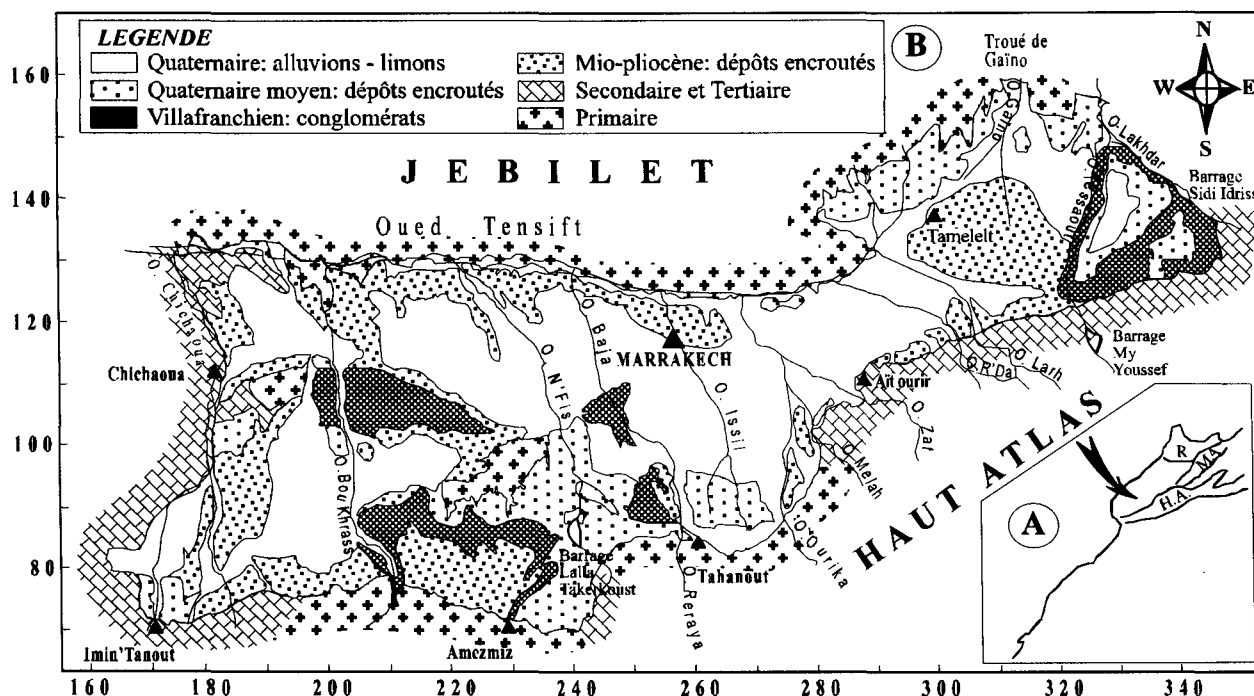


Fig. 1.—Contexte géographique et géologique de la plaine du Haouz (tiré de Razoki, 2000).

l'été avec des amplitudes comprises respectivement entre 5 et 45 °C.

Contexte géologique et hydrogéologique

La plaine du Haouz et la chaîne du Haut-Atlas ont connu une succession de périodes de sédimentation et d'érosion depuis le Précambrien jusqu'au Quaternaire. Le contrôle tectonique de la sédimentation a joué un rôle déterminant dans ces différentes phases, notamment pendant le Permo-Trias (Biron, 1982).

Le Haouz de Marrakech est un bassin de subsidence présentant un remplissage mioplioquaternaire issue du démantèlement de la chaîne atlasique. La série géologique s'étend jusqu'au Primaire (Fig. 2) sous forme de dépôts dont le faciès et l'épaisseur sont très variables (Ambroggi & Thuile, 1952) (Fig. 3).

Les propriétés lithologiques ont permis l'identification d'un certain nombre de réservoirs, localisés notamment au niveau du Jurassique, du Cénomano-Turonien, de l'Eocène et dans les formations mioplioquaternaires.

Les dépôts du mio-plioquaternaire sont le siège d'une nappe importante et généralisée au niveau de la plaine. Ils sont caractérisés par la complexité de leur structure aussi bien verticalement qu'horizontalement. Ce qui se manifeste par l'extrême variabilité-

SUBDIVISION GEOLOGIQUE	LITHOLOGIE
Quaternaire récent	Sables - graviers - limons (50 m)
Villafranchien	Conglomerats (100m)
Néogène	Marnes gréseuse rose -saumon Calcaires lacustres et conglomérats (600m).
Bocène supérieur	Formations rouges et brunes (200 m).
Bocène moyen et inférieur	Calcaires et sables phosphatés (50m).
Crétacé supérieur	Grès et marnes (100m).
Crétacé moyen et inférieur	Calcaires dolomitiques (100m). Marnes vertes et argiles rouges gypsifères (200m).
Jurassique	Formations continentales à l'Est et marnes à l'Ouest (200m). Formations continentales rouges Calcaires et calcaires très dolomitiques (300m). Marnocalcaires et marnes à gypses
Stéphano-Trias	Coulées de dolérites. Argiles, grès. Conglomerats rouges avec dépôts de gypse et de sel gemme.
Primaire	Schistes, grès et quartz.
Autuno-stéphanien	

Fig. 2.—Log stratigraphique synthétique du Haouz (Ambroggi et Thuile, 1952).

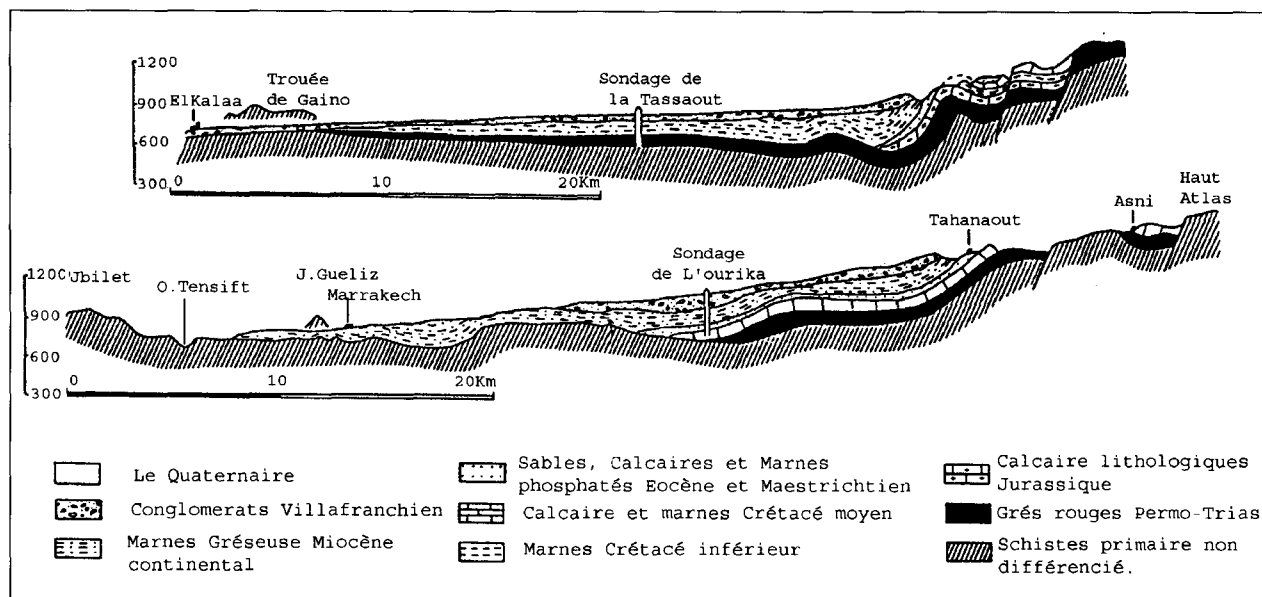


Fig. 3.—Coupes géologiques au niveau de la plaine du Haouz (Ambroggi et Thuile, 1952).

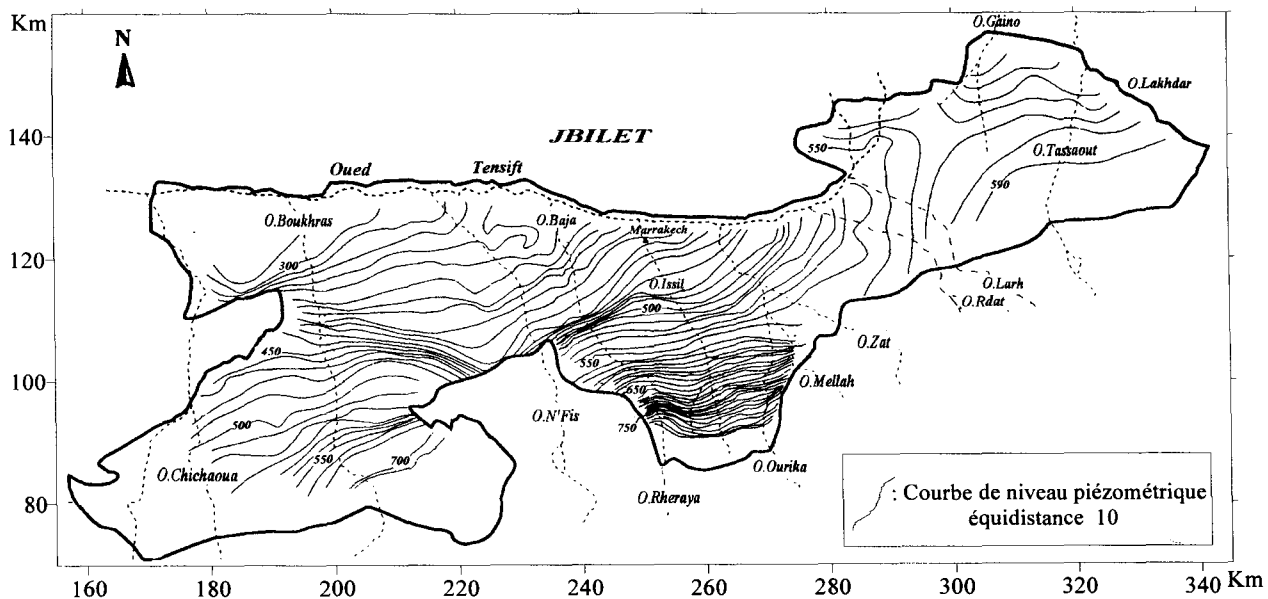


Fig. 4.—Schéma piézométrique général de l'aquifère mioplioquaternaire.

té spatiale du gradient hydraulique et des paramètres hydrodynamiques (Sinan, 1986).

La piézométrie est caractérisée par un écoulement général du sud vers le nord ouest en direction de l'oued Tensift, avec de forts gradients hydrauliques qui atteignent 2 à 4 % au sud de la plaine pour montrer une nette diminution en allant vers le nord avec des valeurs moyennes de 0,5 à 1% vers le nord (Fig. 4).

Hydrologie Isotopique

Les eaux de la nappe du Haouz présentent un faciès chimique bicarbonaté calcique ou magnésien en rapport avec la matrice avec des teneurs importantes en sodium et chlorures liées au lessivage du Permo-Trias argilo-salifère, constituant le substratum de l'aquifère (Sinan, 2000).

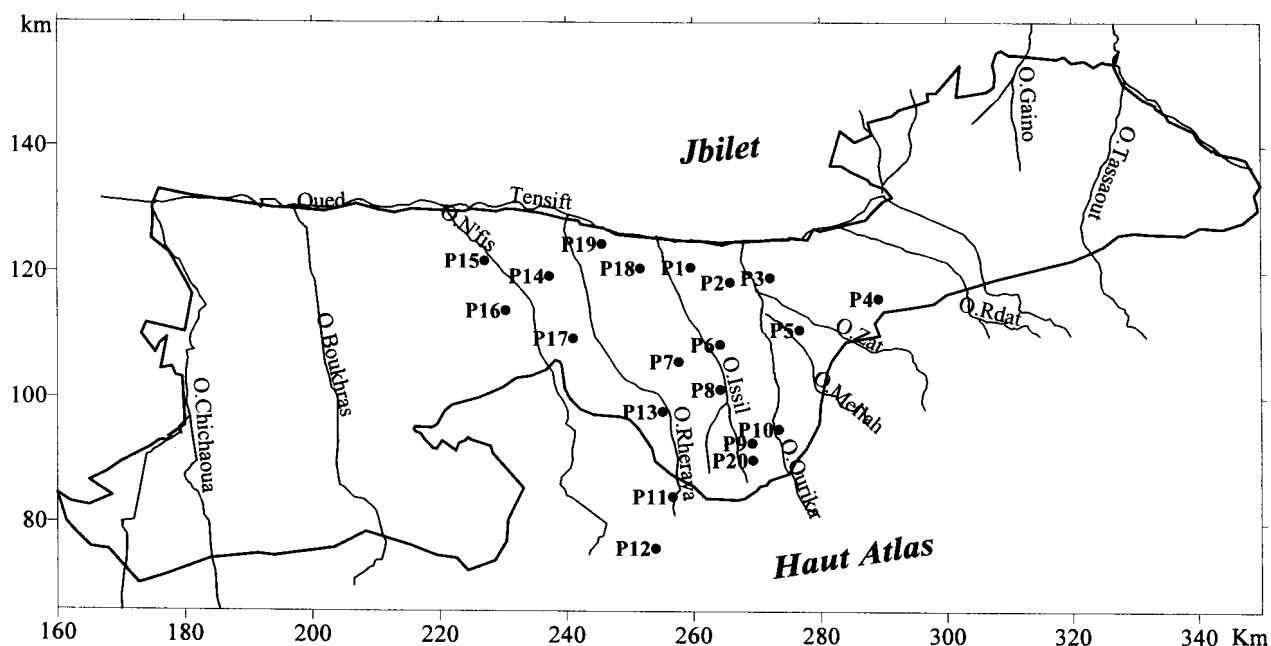


Fig. 5.—Localisation des points échantillonnés pour analyses isotopiques oxygène 18 / deutérium.

Les isotopes stables de la molécule d'eau peuvent être utilisés pour définir les aquifères, l'origine de la recharge, d'estimer les altitudes d'alimentation et de déterminer les relations entre aquifères et avec les eaux de surface. Cette approche développée ici, est couramment utilisée en contextes sub-montagneux, tant en Europe (Siegenthaler *et al.*, 1980), qu'au Maroc (Bahir *et al.*, 2001; Kabbaj *et al.*, 1978).

L'estimation des ressources en eaux souterraines dans un contexte de sécheresse prolongé, conjugué à un développement socio-économique croissant ayant entraîné une surexploitation intense avec un déficit de 200 millions de m³ par an, nécessite la localisation des zones d'alimentation. Pour ce faire, on utilise les phénomènes de thermo-dépendance des isotopes stables de l'eau et de l'écart des isotopes stables de l'air de l'évaporation des pluies en fonction de la température moyenne des sols ou plus exactement de l'altitude (Blavoux & Letolle, 1995; Olivera da Silva & Fernandes, 2001).

Pour la présente étude, on a eu recours aux isotopes stables de la molécule d'eau ¹⁸O et ²H qui permettent un traçage isotopique naturel des eaux. Une vingtaine d'échantillons, prélevés en janvier 2002, au niveau de puits répartis dans la zone d'étude (Fig. 5) ont fait l'objet d'analyses isotopiques.

La comparaison des compositions en isotopes stables des puits mio-plioquaternaires avec celles des précipitations de même altitude permet d'esti-

mer les altitudes moyennes des aires de recharge. Pour ce faire, il est nécessaire de définir au préalable un gradient altitudinal régional, grâce aux compositions isotopiques des précipitations. Cependant, le manque de données en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ sur les pluies de la zone d'étude, nous a conduit à utiliser la droite de Marcé (Marcé, 1975) et les données de la station GNIP (Global Network for Isotopes in Précipitation) de Fès (IAEA, 1998) qui s'alignent suivant un gradient altitudinal et de pente $-0,25 \pm 0,03 \text{ ‰}$ pour 100 m d'élévation ($n = 10$; $r = 0,93$). Cette valeur est cohérente avec celles du bassin d'Essaouira limitrophe (Bahir *et al.*, 2000) et de la plaine du Tadla (Bouchaou *et al.*, 1995) de l'ordre de $-0,26 \text{ ‰}$ pour 100 mètres d'altitude et aussi avec celle du Haut-Atlas (El Ouali *et al.*, 1999) qui est de $-0,27 \text{ ‰}$ pour 100 mètres d'élévation.

La projection des teneurs des puits échantillonnés (Tab. 1, Fig. 6) a permis de localiser les aires de recharge de la nappe entre 1.100 m et 1.880 m.

Les points représentatifs de ces échantillons s'alignent selon une droite d'équation $\delta^2\text{H} = 8,0932 \delta^{18}\text{O} + 14,214$ ($R^2 = 0,7449$) (Fig. 7). La pente 8,09 de la droite régionale est proche de celle des eaux météoriques mondiales ce qui montre que les précipitations n'ont pas subi d'évaporation. On note aussi un excès de deutérium d'une teneur de l'ordre de 14,21 témoignant d'un air maritime issu de la Méditerranée.

Tableau 1.—Résultats d'analyses isotopiques des points d'eau échantillonnés

Stations	X (Km)	Y (Km)	Altitude d'émergence (m)	Altitude de recharge estimée (m)	δ^{18} (V-SMOW)	δ^2 H (V-SMOW)
P1	259,68	120,81	481	1.528	-7,07	-42,87
P2	265,86	118,45	513	1.878	-8,02	-46,3
P3	272,11	119,19	545	1.753	-7,68	-44,48
P4	289,17	115,89	640	1.565	-7,17	-46,45
P5	276,68	110,89	598	1.598	-7,26	-44,95
P6	264,26	108,56	575	1.694	-7,52	-46,4
P7	257,77	105,78	606	1.871	-8	-58,37
P8	264,27	101,38	660	1.790	-7,78	-46,59
P9	269,25	92,88	830	1.598	-7,26	-45,53
P10	273,40	95,08	792	1.852	-7,95	-49,64
P11	256,74	84,28	984	1.517	-7,04	-45,05
P12	254,06	76,01	1.190	1.440	-6,83	-45,46
P13	255,20	97,84	741	1.709	-7,56	-45,17
P14	237,35	119,38	430	1.587	-7,23	-43,95
P15	227,12	121,83	393	1.771	-7,73	-49,11
P16	230,45	113,90	443	1.746	-7,66	-48,27
P17	241,09	109,48	514	1.816	-7,85	-50,87
P18	251,76	120,65	468	1.462	-6,89	-37,01
P19	245,66	124,53	422	1.108	-5,93	-30,76
P20	269,36	90,18	424	1.675	-7,47	-43,68
Source	—	—	—	—	-5,6	-32,9

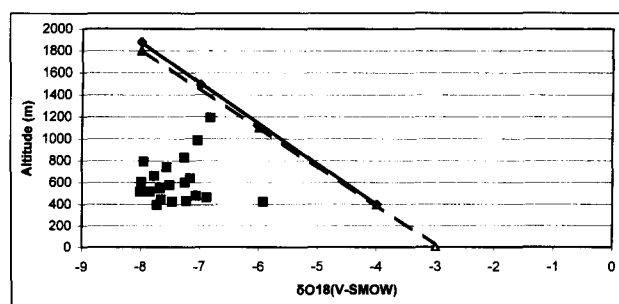


Fig. 6.—Position des différents points échantillonnés en fonction de l'altitude des prélèvements en (m). En trait plein : Droite de Marcé, en pointillé : gradient altitudinal défini avec les données des précipitations de la station GNIP de Fès.

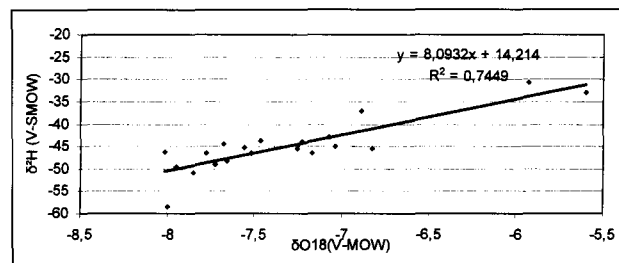


Fig. 7.—Relation Oxygène 18 deutérium.

Conclusion

Le développement socio-économique que connaît la région du Haouz (Marrakech) engendrera une évolution importante des besoins en eau, aussi bien potable et industrielle que dans le secteur agricole, dont les volumes atteignent actuellement environ 400 millions de m³/an.

Cette exploitation amplifiée par une sécheresse de plus de deux décennies, a causé un déficit du bilan hydrique d'environ 200 millions de m³/an. Ceci a eu pour conséquence une baisse importante et généralisée des niveaux piézométriques et un tarissement presque total des khetaras, notamment dans les zones surexploitées de la nappe, rendant caduques les modèles de gestion des eaux souterraines réalisées dans les années 80.

Pour ce faire, le recours aux isotopes de l'environnement pour une meilleure compréhension du fonctionnement de l'aquifère mio-plioquaternaire (précision des mécanismes de recharge des nappes, appréciation de l'importance de l'évaporation, origine des eaux) a été réalisé.

Les teneurs en isotopes stables de l'aquifère mio-plioquaternaire du Haouz sont comparables à celles des études antérieures au Maroc.

En effet, elles s'alignent sur la droite météorique mondiale indiquant l'origine atlantique des précipitations. La relation oxygène-18 / deutérium : $\delta^2\text{H} = 8,0932 \delta^{18}\text{O} + 14,214$ ($R^2 = 0,7449$), tra-

duit un régime atlantique des précipitations, sans évaporation. Cette dernière n'est observable que sur quelques échantillons, ce qui implique que la recharge se fait rapidement, probablement à travers les formations miocènes gréseuses largement fissurées à l'affleurement.

Grâce aux données isotopiques des eaux de puits et de précipitations de la station GNIP de Fès, un gradient altitudinal moyen de $-0,26 \text{ ‰}$ par 100 mètres est déterminé pour la plaine du Haouz, très proche des autres valeurs trouvées pour d'autres régions au Maroc. Les aires de recharge de l'aquifère sont localisées entre 1.100 m et 1.880 m.

Références

- Ambroggi, R. & Thuille, G. (1952). Les plaines et les plateaux des domaines marginal de l'Atlas, Haouz de Marrakech. In: Hydrogéologie du Maroc. *Notes mém. Serv. Géol. Maroc*.
- Bahir, M., Mennani, M., Jalal, M. & Youbi, N. (2000). Ressources hydriques du bassin synclinal d'Essaouira (Maroc). *Estudios Geol.*, 56: 185-195.
- Bahir, M.; Jalal, M., Mennani, M. & Laftouhi, N. (2001). Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geol.*, 57: 47-52.
- Bahir, M., Mennani, M., Jalal, M. & Fakir, Y. (2002). Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la ville d'Essaouira (Mogador, Maroc). *Sécheresse* 13: 13-19.
- Biron, P.E. (1982). *Permo-Trias de l'Ourika*. Thèse de troisième cycle. Univ. Grenoble, France.
- Blavoux, B. & Letolle, R. (1995). Apports des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines. *Géochronique* 54: 12-15.
- Bouchaou, L., Michelot, J.L., Chauve, P., Mania, J. & Mudry, J. (1995). Apports des isotopes stables à l'étude des modalités d'alimentation des aquifères du Tadla (Maroc) sous climat semi-aride. C.R. Acad. Sci. Paris, série Iia, 95-101.
- Elhbil, A. (1999). Les ressources en eau dans la région hydraulique du Tensift. *Les Nouvelles du Sud* 10: 10-11.
- El Ouali, A. (1999). *Modalités d'alimentation et échanges entre aquifères de piémont en conditions climatiques arides. Cas des systèmes aquifères du Haut Atlas/bassin Crétacé d'Errachidia (Maroc)*, Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V, Rabat, 182 p.
- IAEA/WMO (1998). Global Network for Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Release 3 October 1999; URL: <http://www.iaea.org/programs/ri/gnip/ipmain.html>.
- Kabbaj, A., Zeryouhi, I., Carlier, Ph. & Marce, A. (1978). Contribution des isotopes du milieu à l'étude des grands aquifères du Maroc. In: *Isotope Hydrology*, IAEA, Vienne, 491-524.
- Marce, A. (1975). Contribution des molécules isotopiques à l'étude des modalités d'alimentation et de renouvellement des réserves de quelques nappes souterraines du Maroc. Rapport du Ministère des Travaux Publics et des Communications. Ed. BRGM, 75 SGN 447 LAB, 131 p.
- Olivera da Silva, M. & Fernandes, P.G. (2001). Use of hydrochemistry & isotopes as tracers in the Sado-Sines sedimentary basin (S Portugal), XXXI IAH Congress, *New Approaches to characterizing Groundwater Flow* Vol. I, Munich, 65-70.
- Razoki, B. (2000). Thèse de doctorat, Univ. Sci., Marrakech, Maroc.
- Siegenthaler, U. & Oeschger, O. (1980). Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature & altitude, *Nature* 285: 314-317.
- Sinan, M. (1986). *Paramètres hydrogéologiques et géoélectriques en milieu alluvial fortement hétérogène*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Sci., Tech., Montpellier, 397 pp.
- Sinan, M. (2000). *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par couplage des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc)*. Thèse d'Etat es-sciences. Univ. Mohammed V, Rabat, 371 pp.

Recibido el 3 de marzo de 2003.
Aceptado el 16 de agosto de 2004.