



IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AQUIFERE HAUTERIVIEN DU BASSIN D'ESSAOUIRA (MAROC)

CLIMATE CHANGE IMPACT ON HAUTERIVIAN AQUIFER OF ESSAOUIRA BASIN (MOROCCO)

OUHAMDOUCH S.¹, BAHIR M.², CARREIRA P.³, CHKIR N.⁴, GOUMIH A.²

¹GEOLAB, faculté des sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

²Département de géologie, Ecole Normale Supérieure de Marrakech,
Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

³ Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, IST/CTN,
Universidade de Lisboa, Portugal.

⁴ Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Radio-Analyses et Environnement,
BP : W. 3038, Sfax, Tunisie.

salah.ouamdouch@edu.uca.ma

RESUME

La variabilité climatique est un phénomène dont les causes sont difficiles à déterminer, peut se manifester par les épisodes récurrents de la sécheresse, la désertification, la rareté des eaux et changement de leur chimisme, et l'érosion des sols ainsi que leur salinisation. Cette variabilité peut avoir des effets sur les ressources naturelles telles que les eaux souterraines. Pour déchiffrer l'impact de la variabilité climatique sur les eaux souterraines de l'aquifère Hauterivien du bassin d'Essaouira, gouverné par un climat semi-aride, trois approches ont été utilisées : (i) la technique piézométrique qui a permis de tracer les cartes piézométrique de la nappe depuis 1976 à 2015. Elle a montré que le niveau d'eau de cet aquifère est en étroite relation avec les précipitations. (ii) l'approche hydrogéochimique a mis en évidence une évolution du faciès chimique du type Na-Cl au Type Mg-HCO₃ entre 1996 et 2015. (iii) l'outil isotopique a permis de déterminer (1) une droite météorique local (LMWL) proche de la droite météorique mondiale (GMWL) caractérisant les

précipitations d'origine océanique et (2) l'altitude de recharge de cet aquifère en se basant sur ^{18}O .

Mots-clés : Aquifère, bassin d'Essaouira, climat semi-aride, hydrogéochimie, isotopie, piézométrie, ressource en eau, variabilité climatique.

ABSTRACT

Climate variability is a phenomenon whose causes are difficult to determine, can be manifested by recurrent episodes of drought, desertification, scarcity of water and change their chemistry, soil erosion and salinization. This variability may have effects on natural resources such as groundwater. To decipher the impact of climate variability on groundwater from the Hauterivian aquifer of Essaouira basin, ruled by a semi-arid climate, three approaches were used: (i) the piezometric technique that allowed drawing piezometric maps of the aquifer from 1976 to 2015. It showed that the water level from this aquifer is closely related to precipitation. (ii) The hydrogeochemical approach revealed an evolution of chemical facies from Na-Cl to Mg-HCO₃ type between 1996 and 2015. (iii) The isotopic tool was used to determine (1) a local meteoric line (LMWL) close to the global meteoric line (GMWL) characterizing precipitation of oceanic origin and (2) the charging altitude of the aquifer based on ^{18}O .

Keywords: Aquifer, Essaouira basin, climate variability, hydro-geochemistry, isotopy, piezometry, semi-arid climate, water resource.

INTRODUCTION

Dans les zones semi-arides, les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau potable, agricole et industrielle vu la rareté des eaux de surface. Ces eaux sont limitées et connaissent de plus en plus une dégradation, résultant de contraintes naturelles (climat généralement de type semi-aride et variabilité importante des hauteurs des précipitations) et anthropiques (ponction prélevée largement supérieure à la recharge actuelle et multiplication des sources de pollutions) (Bahir et al. 2012 ; 2002 ; Fedrigoni et al 2001). Le bassin d'Essaouira qui fait partie de ces zones, ne fait pas exception à cette situation. Plusieurs études réalisées au sein de ce bassin dans le but d'évaluer et de suivre la qualité de l'eau souterraine ont démontré de nombreuses sources de contamination (Chamchati, 2014 ; Chamchati et Bahir, 2013,2011 ; Bahir et al., 2012, 2008 ; Galego et al., 2005 ; Mennani et al., 2001,

laftouhi 1991). Ce bassin occupe une superficie d'environ 6000Km² et comporte plusieurs systèmes aquifères, parmi eux l'aquifère Hauterivien, l'objet de cette étude. Vue l'importance des eaux souterraines dans le développement des zones à climat semi-aride, il convient donc de connaître et suivre la qualité de cette ressource. L'objectif de cette investigation est l'étude de l'évolution du chimisme et du niveau piézométrique des eaux de l'aquifère Hauterivien suite aux changements climatiques au cours des dernières décennies.

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Il se localise dans le haut atlas occidental, entre les latitudes 31°05' et 31°40'N et les longitudes 9°00' et 9°50'W, le bassin d'Essaouira comprend plusieurs systèmes aquifères. Parmi ces systèmes, l'aquifère Hauterivien, qui fait l'objet de cette étude, localisé à une quarantaine de kilomètres au Sud de la ville d'Essaouira. Cet aquifère est limité au Nord par l'anticlinal d'Amsettène, l'oued Igouzoullene au Sud, les formations du Crétacé Inférieur à l'Est et par l'Océan Atlantique à l'Ouest (figure1). Sa superficie est d'environ 100 km² (Mennani, 2001) pour une population estimée à 40 000 habitants répartis en plusieurs villages.

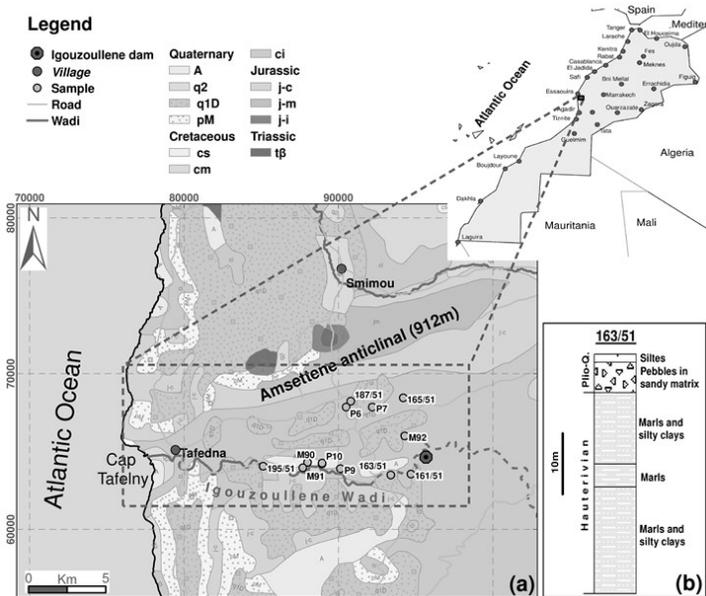


Figure 1 : Carte géologique du secteur d'étude et emplacement des points échantillonnés (a) et coupe lithologique du puits 163/51(b).

La zone d'étude est soumise à un climat de type semi-aride, caractérisé par deux saisons : l'une pluvieuse s'étale du mois de novembre jusqu'au mois de mars et l'autre sèche s'intercale entre avril et octobre. Les précipitations moyennes annuelles et mensuelles ne dépassent pas les 300mm (figure 2), les températures autour de 20°C et l'évapotranspiration moyenne est d'environ 910 mm/an. Hydro-géologiquement, le bassin d'Essaouira comprend une série sédimentaire qui s'échelonne du Trias au Quaternaire contenant ainsi plusieurs aquifères tel que celui d'Hauterivien. Celui-ci est constitué d'argiles marneuses et silteuses +/- altérées et fracturées, alternant avec des niveaux de calcaires siliceux durs, fracturés, des siltstones marneux, des calcaires marneux altérés et fracturés ainsi que des calcaires +/- dolomitiques fracturés (figure1b) (Rey et al. 1988, Duffaud et al. 1966, Duffaud 1960).

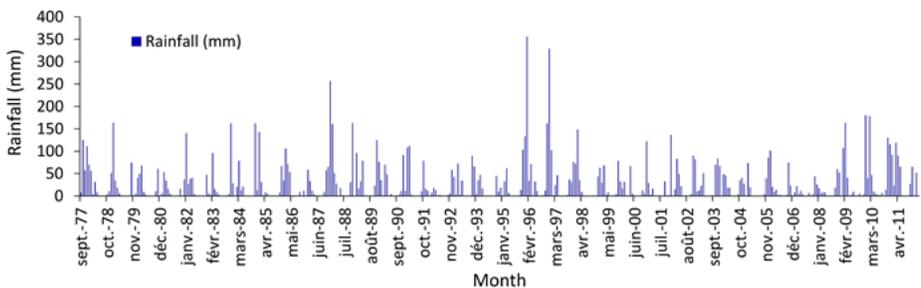


Figure 2 : Variation des précipitations mensuelles de 1977 à 2012.

MATERIEL ET METHODES

Echantillonnage, analyse hydrochimique et traitement des données.

Cette étude est appuyée sur les données physico-chimiques et piézométriques des missions qui ont été effectuées en 1976, 1997 et 2004 et sur les analyses physico-chimiques des échantillons prélevés en juin 2015 ainsi que la mesure du niveau d'eau en cette période. La température, le pH, la conductivité électrique (CE) et la profondeur de la surface d'eau ont été mesurés in situ. Au laboratoire, les analyses ont portées sur les éléments chimiques majeurs cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-). Le niveau des eaux est aussi mesuré.

Sur le terrain, ont été mesurés les paramètres physiques et la profondeur de la nappe : (i) Le pH et la température par un pH/mV/°C mètre type ADWA

AD111. (ii) La conductivité par un conductimètre de terrain type HANN HI 8733. (iii) La profondeur du niveau de l'eau via une sonde piézométrique sonore de 200m.

Les éléments chimiques majeurs sont déterminés par la chromatographie ionique en utilisant DIONEX ICS-1100 au sein du Centre d'Analyse et de Caractérisation (CAC) à la Faculté des Sciences Semlalia, UCA, Marrakech.

L'approche hydrochimique est utilisée pour traiter les résultats des analyses physico-chimiques. Le diagramme de Piper et celui de Durov étendu sont utilisés pour la classification des eaux et pour définir les processus hydrogéochimiques plausibles dominant la chimie des eaux souterraines, telles que le mélange, échange d'ions et la dissolution affectant la composition des eaux souterraines. Ces diagrammes sont très utilisés en hydrochimie et donne des résultats satisfaisants (Abid et al. 2014, 2012, Trabelsi et al 2005, Al Bassam et al 1997,). Un système d'information géographique (SIG) est exploité pour tracer les cartes piézométriques.

RESULTATS ET DISCUSSION

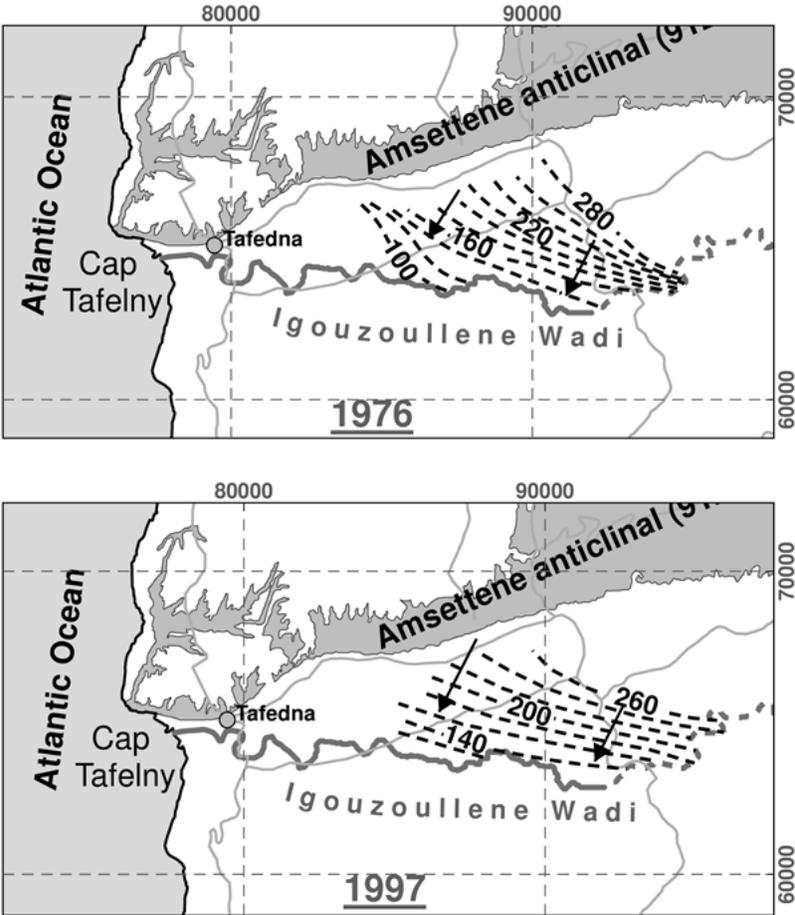
Piézométrie

L'esquisse de la carte piézométrique de la nappe Hauterivienne en 1976 (Figure 3) a été établie grâce aux données de la tournée piézométrique effectuée par la D.R.H.T. (A.B.H.T. actuellement). Selon cette carte, le sens d'écoulement des eaux de cette nappe est du NE vers le SW avec un gradient hydraulique voisine de 3.2%.

Les cartes piézométriques de l'année 1997 et 2004 (Figure 3) ont été dressées à partir des données des deux campagnes réalisées par Mennani en 1997 et Bahir en 2004. La mesure de la profondeur d'eau effectuée en juin 2015 a permis de tracer la carte piézométrique de l'aquifère Hauterivien en cette période. (Figure 3). A partir de cette carte l'altitude du niveau d'eau varie de 220 à 140m avec un gradient hydraulique d'environ 4.05% en amont et 2.10% en aval. Le sens d'écoulement reste du NE vers le SW comme a été déterminé en 1976, il est imposé par le flanc sud de l'anticlinal d'Amssettène. Selon ce sens d'écoulement, l'oued Igouzoullene semble drainer l'aquifère Hauterivien et ceci se manifeste par les sources de faible débit le long de cet oued.

Une comparaison des cartes piézométriques réalisées en 1976, 1997, 2004 et 2015 (Figure 3) et le suivi de l'évolution du niveau piézométrique du point

d'eau 163/51 (Figure 4), laisse apparaitre une augmentation du niveau d'eau durant les quatre dernières décennies (1976-2015). Cette augmentation est liée aux variations climatiques, surtout les précipitations, et l'édification du barrage Igouzoullene en 2004 à l'Est de la zone d'étude en recueillant les eaux de précipitations, ayant connu un retour durant les dernières décennies sous forme d'orages, et de ruissellement et alimentant ainsi la nappe. La baisse du niveau piézométrique du point d'eau 163/51 est expliquée par le fait qu'il a été mesuré en pompage. Ce point eau a été destiné à l'alimentation en eau potable le village de Tmanar avant d'être remplacé par le barrage.



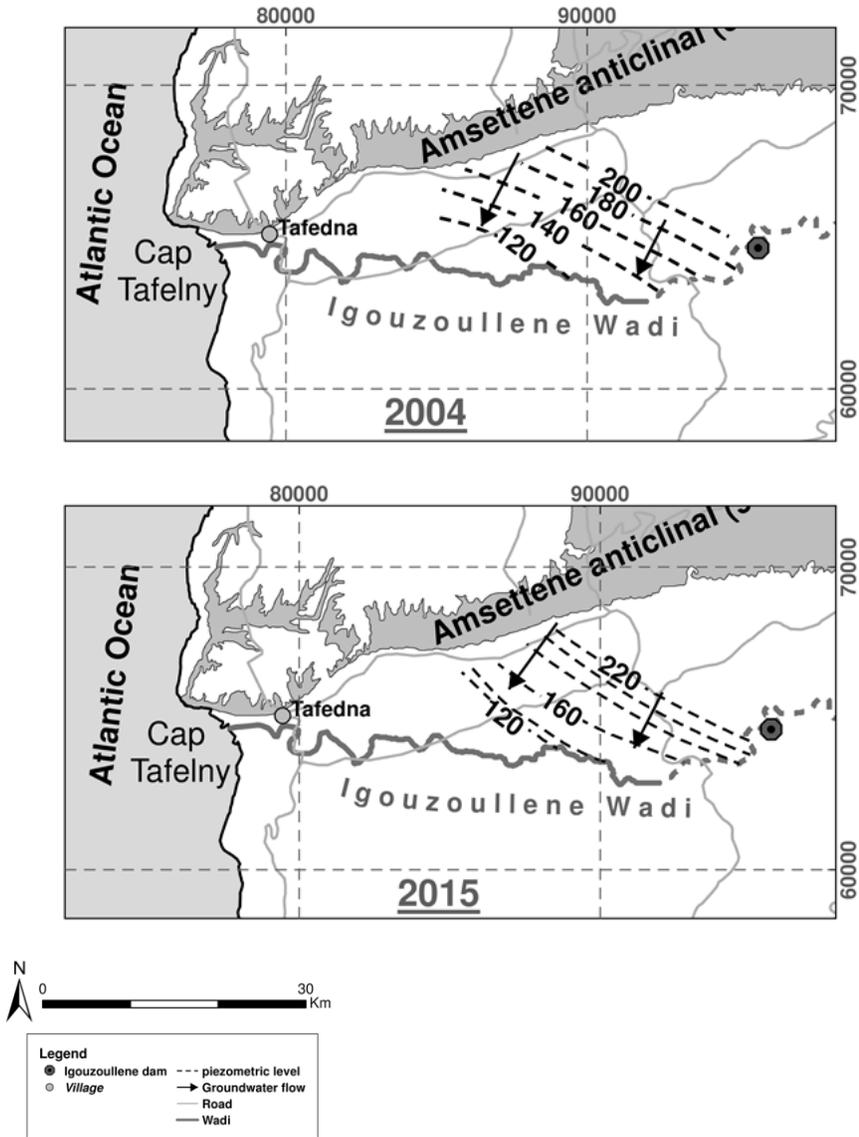


Figure 3 : Cartes piézométrique de l'aquifère Hauterivien 1976-2015.

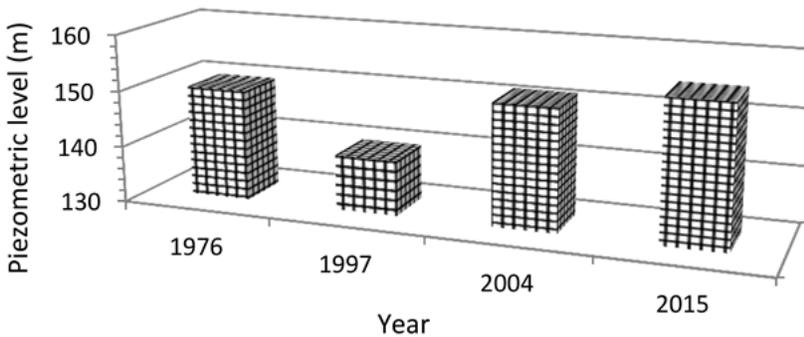


Figure 4 : Evolution du niveau piézométrique du point d'eau 163/51.

Hydrochimie

L'étude du chimisme des eaux permet d'identifier le faciès chimique des eaux, leurs qualités ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Elle permet aussi de suivre l'évolution spatio-temporelle des paramètres chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie et la piézométrie (Bakalowicz 1979). La projection des concentrations des éléments majeurs sur le diagramme de Piper (Figure 5), permet de (i) déterminer le faciès gouvernant les eaux de l'aquifère Hauterivien pour les trois campagnes 1996, 1997 et 2015, (ii) vérifier s'il y a des concentrations ou des dilutions de certains éléments d'une mission à l'autre.

Au niveau du diagramme des cations (Figure 5) les échantillons prélevés en 1996 et 1997 se regroupent en un seul groupe à évolution vers le pôle Na, tandis que les échantillons de 2015 présentent un seul groupe s'étendant vers le pôle Ca et Mg avec une légère tendance vers le pôle Mg. Pour le diagramme des anions (Figure 5), les points de la campagne 1996 et 1997 tendent généralement vers le pôle Cl, alors que ceux de la mission 2015 s'évaluent vers le pôle HCO_3 à l'exception des deux points à évolution vers le pôle SO_4 . A partir de ce diagramme on constate que le faciès des eaux de l'aquifère Hauterivien a évolué de type Na-Cl au type Mg- HCO_3 . Cependant les eaux de cette nappe ont connu une dilution notable. Celle-ci peut être expliquée par l'augmentation du niveau piézométrique suite au retour des précipitations sous forme d'orage à la construction du barrage Igouzoullene à l'Est de la zone d'étude.

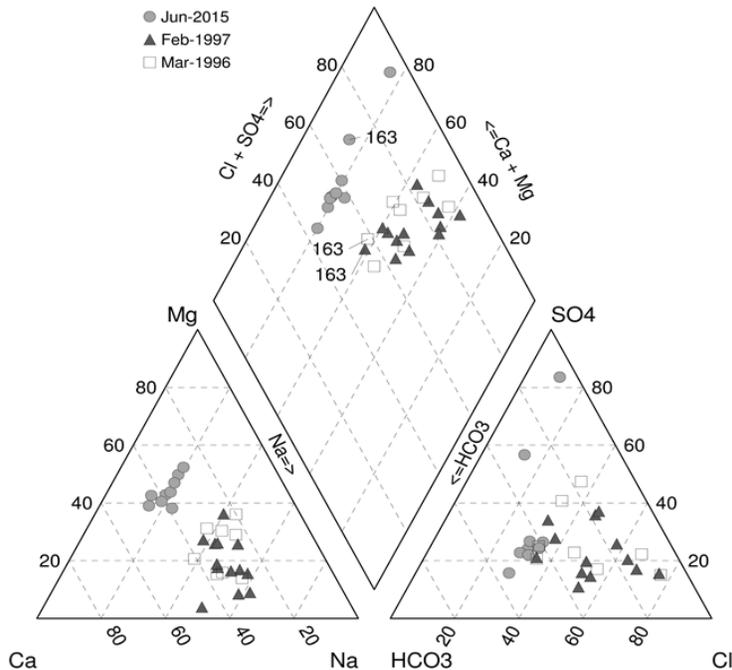


Figure 5 : Diagramme de piper des eaux de l'aquifère Hauterivien en 1996, 1997 et 2015.

La position des échantillons dans les casiers de 1 à 9 du diagramme de Durov (Figure 6) est utilisée pour l'identifier les processus et les réactions chimiques qui règnent dans l'aquifère. A partir de ce diagramme, il se constate que les points d'eaux de l'aquifères sont regroupés dans les deux casiers 5 et 8 avec une répartition diagonale suivant la ligne de mixage conservative (ligne II). Dans le casier 5 (Cardona et al. 2004, Lloyd et al. 1985, Petelas et al. 1999) on rencontre la totalité des eaux de la campagne 2015 et la majorité des eaux des deux missions 1996 et 1997. Leur composition résulte ainsi des réactions de mélange des eaux de différentes origines. Le casier 8 regroupe quelques points d'eau de la campagne 1996 et 1997. Ce casier indique des réactions de mélange et d'échange ioniques inverses (i.e. échange de Ca et/ou Mg de l'aquifère contre Na et/ou K de l'eau).

Potabilité et qualité des eaux

La majorité des points d'eau de l'aquifère Hauterivien sont destinés à l'alimentation en eau potable. Le tableau 1 regroupe les teneurs des paramètres

physico-chimiques des échantillons prélevés en juin 2015 et les normes de la potabilité de l’OMS relatives à la qualité des eaux. Les eaux présentent des teneurs inférieures à celles déterminées par O.M.S. en 2011 pour les paramètres pH, Cl, SO₄, NO₃ et Na. Par contre elles ont des concentrations qui dépassent les normes pour la CE et K. Généralement, l’aquifère Hauterivien présente une potabilité de bonne qualité. Cette qualité est acquise après la construction du barrage Igouzoullene qui conduit à la dilution notable des eaux de cet aquifère en recueillant les précipitations (généralement sous forme d’orage) et les eaux de ruissellements.

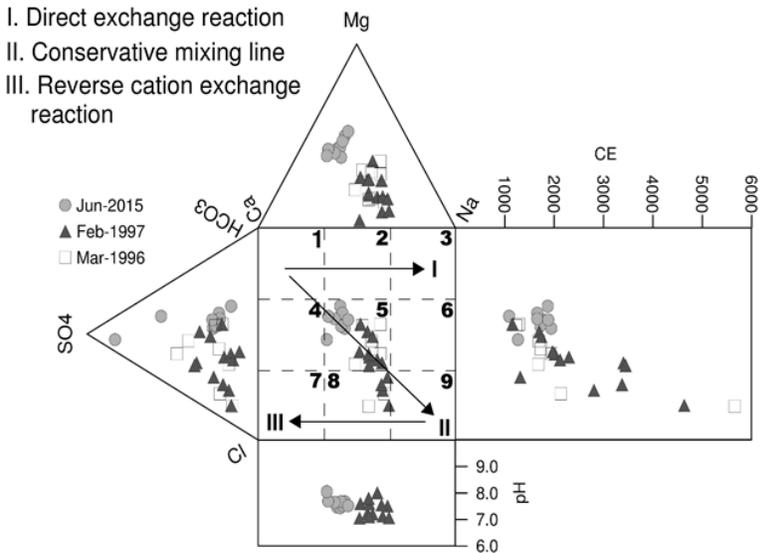


Figure 6 : Diagramme de Durov des eaux de l’aquifère Hauterivien en 1996, 1997 et 2015.

Tableau 1 : Valeurs extrêmes et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux de l’aquifère Hauterivien (juin 2015) et les normes de potabilité de l’OMS (2011).

| Paramètre Physico-chimique | Min | Max | Moy | Normes OMS 2011 |
|----------------------------|------|------|------|-----------------|
| pH | 7.44 | 8.05 | 7.62 | 6.5-8.5 |
| CE (µs/cm) | 1090 | 1940 | 1645 | 180-1000 |
| Cl | 52 | 256 | 180 | ≤ 250 |
| SO ₄ | 165 | 295 | 228 | ≤ 250 |
| NO ₃ (mg/l) | 0.47 | 8.85 | 4.65 | ≤ 50 |
| Na | 26 | 63 | 49 | ≤ 200 |
| K | 26 | 61 | 51 | ≤ 12 |

Isotopie

L'utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau, en particulier l'oxygène ^{18}O , est devenue un outil nécessaire pour l'étude des eaux souterraines (Farid et al. 2013, Charfi et al. 2012, Zouari et al. 2011, Blavoux 1995). Cette technique permet de (i) déterminer l'origine et l'histoire des eaux, (ii) d'estimer les aires et les conditions de recharge des aquifères et (iii) de déterminer leurs relations, entre eux et avec les eaux de surface (pluies, ruissellements).

Dans l'aquifère Hauterivien, le nombre de points d'eau analysé pour l'oxygène ^{18}O est très restreint, mais permet d'avoir une première approche des teneurs en ^{18}O des eaux souterraines ainsi qu'une estimation de leur altitude de recharge. Les résultats de la mesure de ^{18}O des eaux souterraines de l'aquifère Hauterivien sont regroupés dans le tableau.2. Deux groupes de points d'eau se distinguent, le premier se situe au NE et au SW avec une moyenne d' ^{18}O d'environ -4.5‰ et un deuxième groupe de point surtout les 161 et 163/51 avec des teneurs plus importantes tournant autour de -2.80‰ . Selon l'équation du gradient régional de ^{18}O avec l'altitude (1) établie par Bouchaou et al. (1995) dans l'atlas de Bni-Mellal et confirmée par Bahir en 2004, l'altitude de recharge estimée dans la zone étudiée est de 400m.

$$\delta^{18}\text{O} = -3-(2.6 \cdot 10^{-3} \times \text{altitude}) \quad (1)$$

Tableau 2 : Teneurs en ^{18}O des eaux souterraines de l'aquifère Hauterivien.

| Echantillon | Altitude (m) | $^{18}\text{O}(\text{‰})$ |
|-------------|--------------|---------------------------|
| 163/51 | 166 | -2.59 |
| 161/51 | 175 | -3.24 |
| 165/51 | 305 | -4.42 |
| 195/51 | 92 | -4.60 |

A partir du diagramme de corrélation ^{18}O - ^2H (Figure 7) de la zone côtière d'Essaouira, il se constate que la droite météorique local (LMWL) d'équation (2) est proche de la droite météorique mondiale (GMWL) de pente 8 avec un excès en ^2H de 10 (Craig 1961). Ceci reflète des précipitations d'origine océanique. Le point représentant l'aquifère Hauterivien (Figure 7) se trouve au-dessus de la GMWL ce qui confirme que la recharge de cet aquifère s'effectue par des pluies qui s'infiltrèrent rapidement sans évaporation.

$$\delta^2\text{H} = 7.95 \delta^{18}\text{O} + 11.3 \quad (2)$$

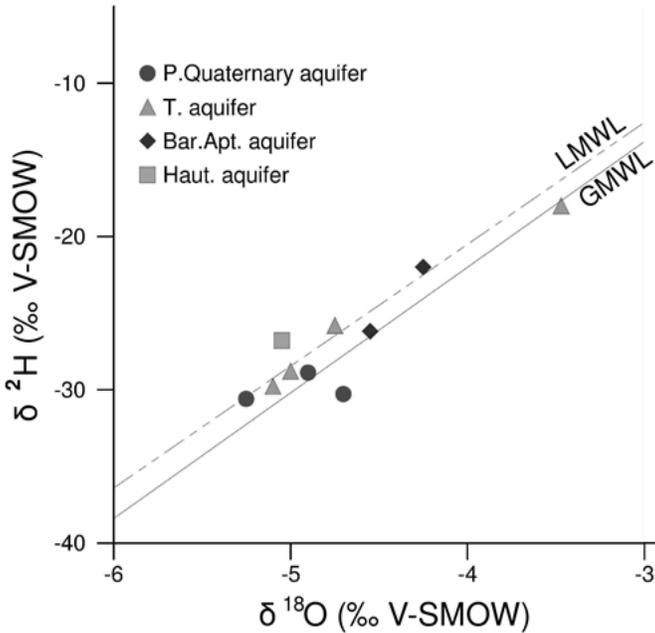


Figure 7 : Relation ^{18}O - ^2H dans l'aquifère Hauterivien.

CONCLUSION

L'étude piézométrique des eaux souterraines de l'aquifères Hauterivien a montré que le sens d'écoulement se fait du NE vers le SW avec pour exutoire l'océan Atlantique et une alimentation par l'oued Igouzoullene. L'évolution du niveau piézométrique durant les 4 dernières décennies a montré une tendance à la hausse. Cette évolution est en étroite relation avec les précipitations (aléas climatiques). L'approche hydrogéochimique a permis de caractériser cette ressource naturelle. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux sont neutres (pH varie de 7 à 8.5). Le faciès chimique des eaux de cet aquifère a connu une évolution de type Na-Cl au type Mg- HCO_3 . Cette évolution est due à la fois au retour de précipitations, sous forme d'orages, et à la construction du barrage Igouzoullene, sur l'oued Igouzoullene, recueillant ainsi les eaux de pluie et alimentant la nappe, ceci rendre les eaux souterraines de cette zone généralement de bonne qualité. Sur le plan isotopique, la recharge de l'aquifère Hauterivien est assurée par une infiltration directe sans évaporation. Cette recharge s'effectue sur une altitude d'environ 400m sur ses affleurements situés sur le flanc sud de l'anticlinal d'Amssettène. Cependant la piézométrie et le

chimisme des eaux de l'aquifère Hauterivien du bassin d'Essaouira est en relation étroite avec la variabilité climatique. Par conséquent, l'adaptation d'une stratégie rationnelle pour exploiter cette nappe, qui ne dépasse pas les 100Km² et alimente plus de 40 000 habitants, en tenant compte de la variabilité climatique est importante.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les personnels du Centre d'Analyse et de Caractérisation (CAC) à la Faculté des Sciences Semlalia, UCA, Marrakech.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AL-BASSAM, A.M., AWAD, H.S. AND ALALAWIA, J.A. (1997). Durov plot: a computer program for processing and plotting hydrochemical data, *Groundwater*, Vol. 35, No. 2, pp.362–367.
- ABID K., HADJ AMMAR F., WEISE S., ZOUARI K., CHKIR N., ROZANSKI K., OSENBÜCK K. (2014). Geochemistry and residence time estimation of groundwater from Miocene-Pliocene and Upper Cretaceous aquifers of Southern Tunisia. *Quaternary International* 338: 59-70.
- BAHIR M., CHKIR N., TRABELSI R., FRIHA H.A., ZOUARI K. CHAMCHATI H. (2012). Hydro-geochemical behaviour of two coastal aquifers under severe climatic and human constraints: comparative study between Essaouira basin in Morocco and Jeffara basin in Tunisia. *Int. J. Hydrology Science and Technology*, Vol. 2, N°1, 75-100.
- BAHIR M., CARREIRA P., OLIVEIRA DA SILVA M., FERNANDES P. (2008). Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geol.*, 64: 61-73.
- BAHIR M., MENNANI A., 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). *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Vol.13, N°1, pp :9-13.
- BAKALOWICZ M. (1979). Contribution de la géochimie à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse doct. ès-science.
- BOUCHAOU L., MICHELOT J.C., 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, t.320, série IIa, pp : 95-101.

- CARDONA A., CARRILLO-RIVERA J.J., HUIZAR-ALVAREZ R., GARNIEL-CASTRO E. (2004). Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico, *Environ. Geol.* 45 pp: 350–366.
- CHAMCHATI H. (2014). Evaluation et protection des ressources en eau en zones semi-arides ; exemple du bassin d'Essaouira. Thèse de doctorat de l'université Cadi Ayyad, Maroc, 143 p.
- CHAMCHATI H., BAHIR M. (2013). Potential Hydrogeological, Environment and Vulnerability to Pollution of the Plio-Quaternary Aquifers of the Coastal Basin of Essaouira (Morocco). *Journal of Environment and Earth Science*, Vol. 3, No.10, 170-185.
- CHAMCHATI H., BAHIR M. (2011). Contributions of climate change on water resources in semi-arid areas; example of the Essaouira Basin (Morocco). *American journal of scientific and industrial research*, 2(2): 209-215.
- CHARFI S., TRABELSI R., ZOUARI K., CHKIR N., CHARFI H., REKAIA M. (2012). Isotopic and hydrochemical investigation of the Grombalia deep aquifer system, northeastern Tunisia. *Carbonates Evaporites*. DOI 10.1007/s13146-012-0114-5.
- CRAIG H. (1961). Standards for reporting concentration of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Science*. 133, pp : 1833-1834
- DUFFAUD F., BRUN L., PLANCHOT B., (1966). Bassin du sud-ouest marocain (SW Morocco basin). In : Reyre (ed.), Bassin sédimentaire du littoral africain. *Ass. Serv. Géol. Africain. 1ère partie, Paris* : 5-12.
- 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.
- FARID I., TRABELSI R., ZOUARI K., ABID K., MOHAMED AYACHI M. (2013). Deciphering the interaction between quaternary and continental Sabkhas aquifers in Central Tunisia using hydrochemical and isotopic tools. *Environ Earth Sci*. DOI 10.1007/s12665-013-2395-y.
- FEDRIGONI L., KRIMISSA M., ZOUARI K., MALIKI A., ZUPPI G.M. (2001). Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie). *Earth and Planetary Sciences* 332, 665–671.
- GALEGO F. P., BAHIR M., MENDONÇA J., CARREIRA P., FAKIR Y., M.O. SILVA M.O. (2005). Anthropogenic features in the Sines (Portugal) and Essaouira (Morocco) coastal aquifers: a comparative study of their hydrochemical evolution by a principal component analysis. *Estudios Geol.*, 61: 207-219.

- LAFTOUHI N. 1991. Hydrogéologie et hydrogéochimie de l'aquifère turonien du bassin synclinal de Meskala-Kourimat-Ida Ou Zemzem (Essaouira, Maroc). *Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Maroc*.163p.
- LLOYD W.J., HEATHCOTTE J.A.. (1985). Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater, *Clarendon Press, Oxford, UK*.
- MENNANI A., (2001). Apports d l'hydrochimie et de l'isotopie à la connaissance du fonctionnement des aquifères de la zone côtière d'Essaouira (Maroc occidental). Thèse de doctorat de l'université Cadi Ayyad, Maroc, 173 p.
- MENNANI A., BLAVOUX B., BAHIR M., BELLION Y., JALAL M., DANIEL M. (2001). Apports des analyses chimiques et isotopiques à la connaissance du fonctionnement des aquifères Plio-quadernaire et turonien de la zone synclinale d'Essaouira, Maroc Occidental. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 32, No. 4. pp. 919-835.
- PETELAS C.P., DIAMANTIS I.B. .(1990). Origin and distribution of saline groundwater in the Upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northern Greece, *Hydrogeol. J.* 7 (3) pp: 305–316.
- REY J., CANEROT J., PEYBERNES B., TAJ EDDINE K., THIEULOY J. P., (1988). Lithostratigraphy, biostratigraphy and sedimentology dynamics of the lower cretaceous deposits on the northern side of Western High Atlas (Morocco). *Cretaceous Research*, 9, 2, 141-158.
- TRABELSI R., ZAÏRI M., SMIDA H., BEN DHIA H., (2005). Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *C. R. Geoscience*.Vol. 337, pp.515–524. DOI:10.1016/j.crte.2005.01.010.
- WHO (2011). Guidelines for Drinking-water Quality. *Recommandations; Fourth Edition*; 518p.
- ZOUARI K., TRABELSI R., CHKIR N. (2011). Using geochemical indicators to investigate groundwater mixing and residence time in the aquifer system of Djeffara of Medenine (southeastern Tunisia). *Hydrogeology Journal*. 19: 209–219. DOI 10.1007/s10040-010-0673-2.