



## **EFFET DU BARRAGE ZERRAR SUR LE SYSTEME AQUIFERE DU BASSIN D'ESSAOUIRA (MAROC)**

### **EFFECT OF ZERRAR DAM ON THE AQUIFER SYSTEM OF ESSAOUIRA BASIN (MOROCCO)**

**BAHIR M.<sup>1</sup>, OUHAMDOUCH S.<sup>2</sup> CARREIRA P.M.<sup>3</sup>, GOUMIH A.<sup>1</sup>,  
CHAMCHATI H.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), Département de Géologie, ENS-  
Marrakech, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

<sup>2</sup> 3GEOLAB, Département de Géologie, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi  
Ayyad, Marrakech, Maroc.

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

*bahir@uca.ma*

#### **RESUME**

La forte croissance de la demande en eau au Maghreb pousse les pouvoirs publics à construire de plus en plus de barrages pour augmenter la disponibilité des ressources en eau, naturellement limitée, et faire face à la forte irrégularité temporelle (saisonnière et interannuelle) des précipitations. Le Maroc dispose ainsi de 140 grands barrages d'une capacité totale de 17 Gm<sup>3</sup>. Or, la quantité d'eau douce potentielle est diminuée par l'envasement des barrages estimée à 70 millions de m<sup>3</sup>, l'évaporation de surface et les fuites d'eau par les rives et les fondations. On assiste à de fortes disparités d'un site à l'autre et une importante augmentation de l'érosion dans certains bassins au cours des dernières décennies, notamment au rif où l'envasement des barrages est foudroyant et rend caduc toute nouvelle implantation de barrage. Cela représente une réduction de capacité de 0,85 % par an. Les dernières techniques de dragage des barrages sont estimés à 5 euros le mètre cube, dépassant largement le seuil de rentabilité du mètre cube obtenu par désalinisation des eaux de mer (1euro). Le barrage Zerrar du bassin d'Essaouira, objet de cette étude, illustre cette problématique, en sus des phénomènes de salinisation, observés dans les deux aquifères de la cuvette synclinale causée par cette mobilisation de la ressource.

La mise en œuvre du barrage Zerrar a considérablement modifié l'hydrologie du bassin, en particulier à son aval. Tous les points montrent un abaissement du niveau des eaux, cette tendance est le résultat de l'effet du barrage Zerrar et le changement climatique, en plus de la surexploitation. Le système aquifère présentant alors une potabilité moyenne à médiocre, résultat de l'effet immédiat du barrage, qui régule le flux de l'oued Ksob, alimentant le système aquifère.

**Mots clés :** Aquifère, Barrage Zerrar, Envasement, Bassin d'Essaouira, Zone semi-aride.

## **ABSTRACT**

The strong growth in water demand in North Africa pushed the government to build more dams to increase the availability of water resources, naturally limited, and cope with the strong temporal irregularity (seasonal and interannual) of precipitation. The Morocco has 140 large dams with a total capacity of 17 Gm<sup>3</sup>. However, the amount of potential fresh water is decreased by siltation of dams estimated at 70 million m<sup>3</sup>, surface evaporation and water loss by the banks and foundations. We are witnessing strong disparities from one site to the other and a significant increase in erosion in some basins in recent decades, especially the Rif where siltation of dams is terrible and make null and void any new dam location. This represents a reduction in capacity of 0.85% year<sup>-1</sup>. The last dam dredging techniques is estimated at 5 euros for cubic meter, well above breakeven per cubic meter produced by desalination of sea water (1 euro). The Zerrar dam of Essaouira Basin, object of this study, illustrates this problem, in addition to salinization phenomena observed in the two aquifers in the synclinal basin caused by the mobilization of resources. The implementation of Zerrar dam has significantly altered the hydrology of the basin, particularly at its downstream. All points show a lowering of the water level, this trend is the result of the effect of Zerrar dam and climate change, in addition to over-exploitation.

The aquifer system then having an average to poor potability result of the immediate effect of the dam that regulates the flow of the Ksob Wadi, feeding the aquifer system.

**Keywords :** Aquifer, Dam Zerrar, Essaouira Basin, semi-arid area, Siltation.

## **INTRODUCTION**

La région d'Essaouira, sur le littoral atlantique du Maroc, subit de plein fouet l'impact des changements climatiques, illustre bien les multiples problèmes rencontrés dans les zones semi-arides. Au-delà de son intérêt régional pour la maîtrise de l'eau, notre étude pourra être facilement transposée et adaptée à bien d'autres régions subissant les mêmes contraintes climatiques et anthropiques, notamment dans le bassin méditerranéen.

Depuis les trois dernières décennies, les conditions climatiques ont influencé négativement les ressources en eau (Bahir et al. 2003, Bouchaou et al. 2011). En zone aride et semi-aride, l'essentiel des ressources en eau est constitué par les eaux souterraines à la recharge extrêmement variable dans le temps et l'espace.

Le changement climatique dans ce bassin engendre des problèmes importants tels que : (i) Erosion du sol sous l'effet de la désertification, (ii) Accentuation de la salinisation des sols ainsi que les ressources en eaux et (iii) Abaissement des niveaux piézométriques des nappes phréatiques d'un côté et la hausse du niveau des eaux de mer, ce qui engendre dans les zones littorales comme le bassin d'Essaouira, une inversion de courant dont le résultat est l'invasion d'eau marine et la destruction du potentiel hydraulique. D'où une vulnérabilité sans cesse croissante de la ressource (Bahir et al. 2007).

Le système hydrogéologique de la cuvette synclinale d'Essaouira est un système complexe, précaire et surtout il est en équilibre, cet équilibre fait entrer en jeu différents facteurs climatiques, géologiques et hydrogéologiques ainsi que les facteurs hydrologiques (alimentation des différents aquifères), il comprend deux aquifères superposés. Le Plio-quadernaire, constitue de sables, des grès et des conglomérats, alors que le Turonien est calcaro-dolomitique (Mennani et al. 2001, Chamchati & Bahir 2011). Ce synclinal à cœur sénonien est compris entre deux structures diapiriques à matériel triasique, ces deux aquifères constituent l'essentielle de l'alimentation en eaux potable de la ville d'Essaouira et les agglomérations avoisinantes. L'implantation d'un barrage de l'envergure du barrage Zerrar change considérablement l'hydrologie du bassin de Ksob surtout à son aval ce qui va forcément faire varier la piézométrie de la cuvette d'Essaouira et changer ainsi la qualité de ses eaux.

Pour accompagner le développement économique et social de la ville d'Essaouira et ses régions, il est devenu primordial de mobiliser toutes les ressources hydriques disponibles afin de répondre à la demande, toujours plus accrue, en eau potable et d'irrigation, c'est dans cet esprit que le projet de construction du barrage Zerrar a vu le jour. Situé dans la confluence des deux

Oueds dits Zelten et Igrounzar, le barrage Zerrar est haut de 84 mètres avec une longueur en crête de 427 mètres et une largeur de 8 mètres. Une retenue de 67 millions de m<sup>3</sup>, étalés sur 435 hectares (INGEMA 2006).

Les principaux objectifs de cet édifice sont : (1) La régularisation des apports de l'Oued Ksob pour : (i) l'alimentation en eau potable et industrielle de la ville d'Essaouira et des centres avoisinants (5.7 Mm<sup>3</sup> en 2030) et (ii) l'irrigation du périmètre de la petite et moyenne hydraulique de Ksob sur une superficie de 960 ha. (2) La contribution à la protection de la baie et la plage de la ville d'Essaouira contre les inondations.

## **DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE**

La région étudiée, dite zone synclinale d'Essaouira, fait partie du littoral Atlantique Marocain. D'une superficie de 300 km<sup>2</sup> environ, elle est limitée au Nord par l'oued Ksob, au Sud par l'oued Tidzi, à l'Est par le diapir de Tidzi et à l'Ouest par l'Océan Atlantique (Fig. 1a). Elle est peu accidentée et se caractérise par un relief de collines basses, modelées par un réseau hydrographique peu dense. La zone synclinale d'Essaouira fait partie des zones semi-arides du Maroc avec des précipitations très irrégulières qui ne dépassent pas les 300 mm/an en moyenne. La température moyenne oscille autour de 20°C, l'écart entre le mois le plus froid (janvier) et le mois le plus chaud (août) peut atteindre 17°C (Mennani et al. 2001).

Les ressources en eau souterraine de cette région sont contenues dans deux réservoirs principaux : le Plio-Quaternaire et le Turonien. Le Plio-Quaternaire à matrice de grès calcaire marin ou dunaire présente une conductivité hydraulique primaire par porosité et renferme une nappe libre importante dont le mur est formé, dans la structure synclinale, par les marnes du Sénonien. Le Turonien renferme une nappe très rapidement captive sous les marnes sénoniennes dans la structure synclinale et probablement en contact direct avec le Plio-Quaternaire sur les bordures de cette structure, au Nord vers l'Oued Ksob, à l'Ouest à l'approche du diapir caché d'Essaouira, à l'Est et au Sud au voisinage du diapir de Tidzi (Fig. 1b). Les fortes crues peuvent transporter des charges de sédiments en suspension supérieures à 100 g/L, comme dans le bassin d'Essaouira. Cette forte concentration se manifeste surtout pendant l'automne, succédant à la période estivale pendant laquelle les Oueds sont à sec. Le plus souvent, il convient de rajouter la partie charriée du transport aux chiffres précédents. L'une des conséquences immédiates de l'érosion est la sédimentation dans le barrage Zerrar.

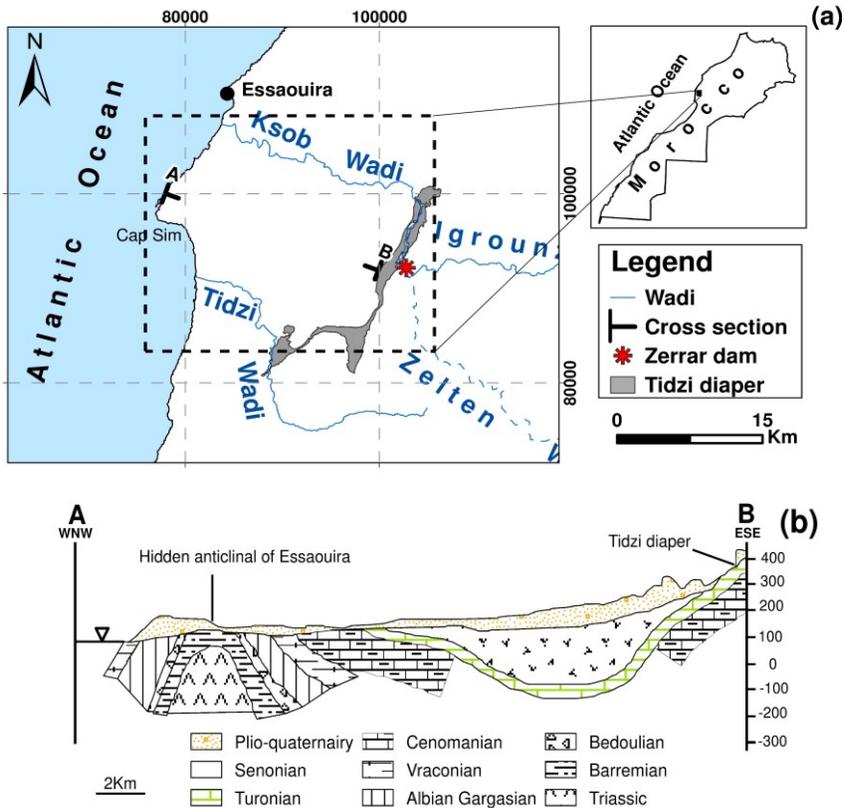


Figure 1 (a) : Localisation géographique et (b) coupe hydrogéologique de la zone d'étude,

## MATERIELS ET METHODES

Une série de campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en 1995, 2009 et 2015 dans le bassin d'Essaouira. La profondeur du niveau d'eau, la conductivité électrique, le pH et la température ont été mesurés sur le champ. Les analyses des éléments majeurs ont été effectuées au laboratoire d'hydrogéologie de la faculté des sciences Semlalia de Marrakech par la chromatographie ionique et l'alcalinité par titration. L'objet de cette étude a été approché par l'étude piézométrique, technique hydrogéochimique et par l'outil isotopique.

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

### **Hydrogéochimie**

La demande croissante en l'eau a créé d'énormes pressions sur les ressources en eau qui ont abouti à l'abaissement du niveau d'eau et à l'augmentation du processus de salinisation. La mobilisation de la ressource, tel le cas du barrage Zerrar dans la zone côtière augmenterait encore l'épuisement et la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ces facteurs devraient tenir compte des plans de gestion future de l'eau et un changement dans l'exploitation de l'eau des zones fortement peuplées, encore plus vulnérables.

Le report des éléments majeurs sur le diagramme de Piper (Fig. 2), très utilisé en hydrogéochimie et donne des résultats satisfaisantes (Bahir et al. 2014; Fernandes et al. 2005, Petalas et al. 2009, Trabelsi et al. 2005), montre que : le faciès des eaux prélevées en 1995 et 2009, avant la construction du barrage, présentent une seule famille de type Na-Cl, par contre celles de 2015, après la mise en service du barrage, montrent le type Mg-Cl et Ca-Cl avec la dominance du premier.

La comparaison des trois campagnes laisse apparaître que les points d'eau conservent leur tendance, que ce soit en 1995, 2009 et 2015, vers le pôle Cl dans le diagramme des anions. Dans le diagramme des cations, ils ont une tendance à se regrouper près du pôle Na + K en 1995 et 2009 et près du pôle Mg pendant 2015. Cette tendance est expliquée par l'effet indirect du barrage qui fait diminuer le flux de l'oued Ksob alimentant le système aquifère.

Afin de comprendre les processus qui contribuent à l'évolution de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin d'Essaouira, des diagrammes de corrélations des éléments majeurs ont été établis (Fig. 3a-c).

La corrélation positive entre Na et Cl, que ce soit en 1995, 2009 et 2015 montre la contribution de la dissolution de l'halite dans la minéralisation des eaux souterraines (Fig. 3a). L'hypothèse de la dissolution de l'halite est soutenue par la relation proportionnelle parabolique du diagramme Na + Cl vs SI par rapport à l'halite (Fig. 5a). Les points sont placés au-dessous de la ligne 1:1 indiquant un déficit de Na vs Cl, ce déficit est compensé par un excès de Mg et/ou Ca (selon l'année d'échantillonnage) indiquant le processus d'échange de cations confirmé par la dispersion des points autour de la ligne de pente -1 dans le diagramme  $[(Ca + Mg) - (SO_4 + HCO_3)]$  vs  $[(Na + K) - Cl]$  (Garcia et al. 2001 ;

Carol et al. 2009) (figure 4). L'excès de Cl est dû à l'effet des embruns marins et à la dissolution des évaporites.

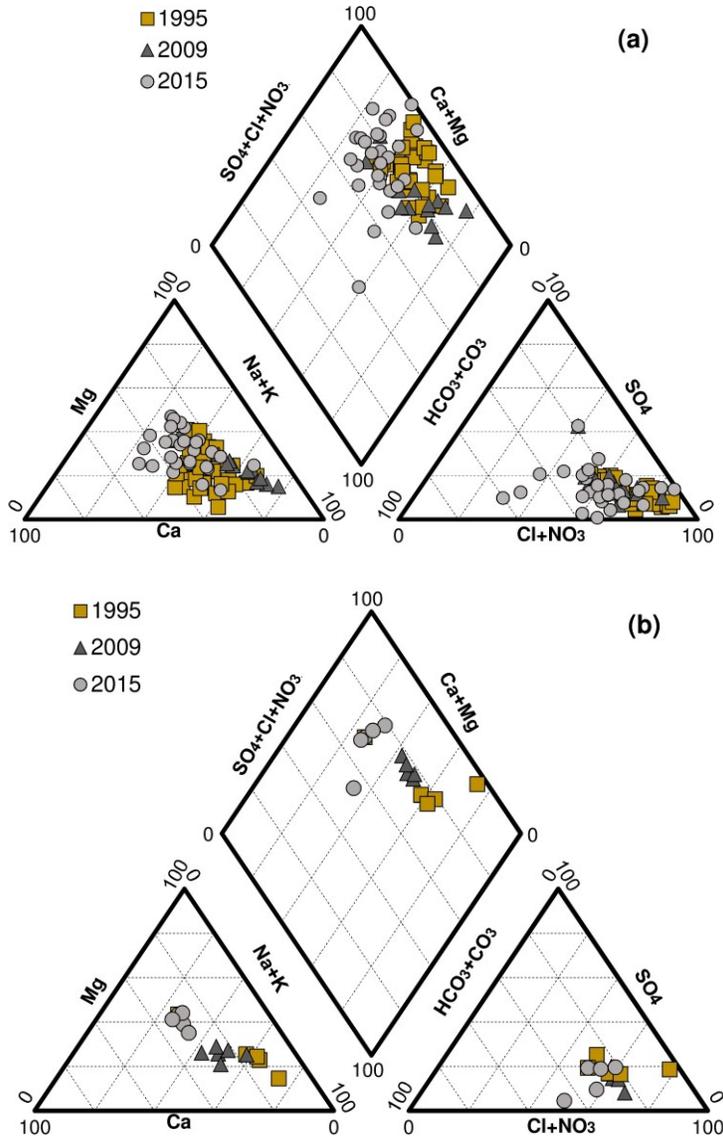


Figure 2 : Diagramme de Piper Pour les eaux de (a) l'aquifère Plio-quaternaire et (b) l'aquifère Turonien.

Le diagramme Ca-SO<sub>4</sub> montre que quelques points sont dispersés autour de la ligne 1:1, cela signifie que la dissolution du gypse et/ou de l'anhydrite est limitée. L'année 2009 présente un excès de SO<sub>4</sub> vs Ca, mais 1995 et 2015 sont déficitaires en cet ion. La dissolution du gypse est confirmée par la relation proportionnelle parabolique du diagramme Ca+SO<sub>4</sub> vs SI par rapport au gypse (fig. 5b).

Le diagramme Ca-Mg laisse apparaître que les points collectés en 2015 et 1995 sont dispersés autour de la droite 1:1 (Fig. 3c) avec un léger excès de Ca pour 1995. En 2009, les points sont regroupés en amas au-dessous de la ligne 1:1.

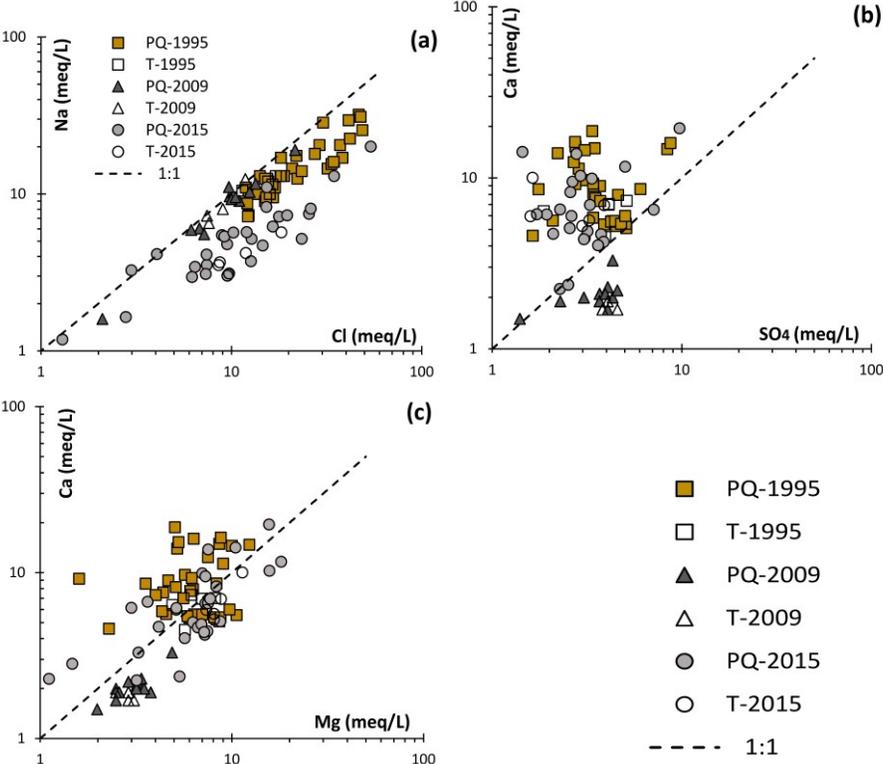


Figure 3 : Relations entre les éléments majeurs des eaux échantillonnées : (a) Na/Cl ; (b) Ca/SO<sub>4</sub> et (c) Ca/Mg.

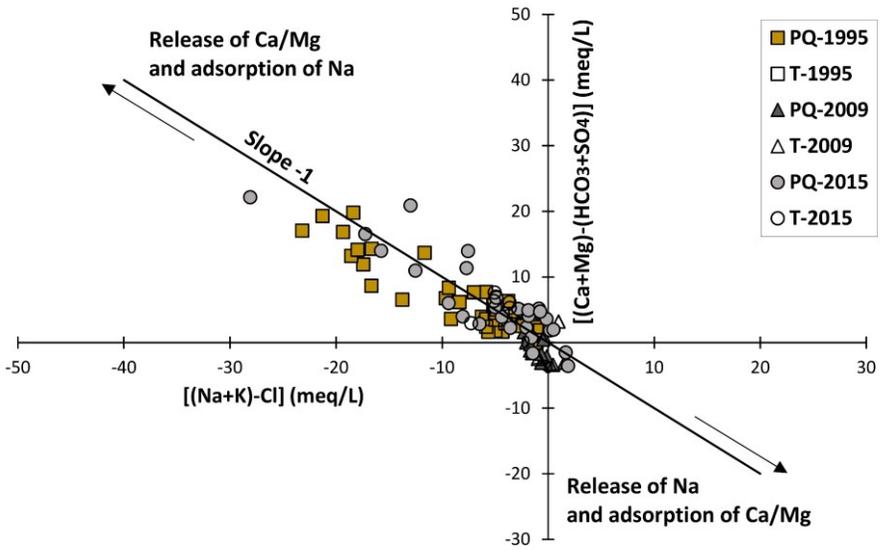


Figure 4 : Relation entre  $[(Ca+Mg)-(HCO_3+SO_4)]$  et  $[(Na+K)-Cl]$ .

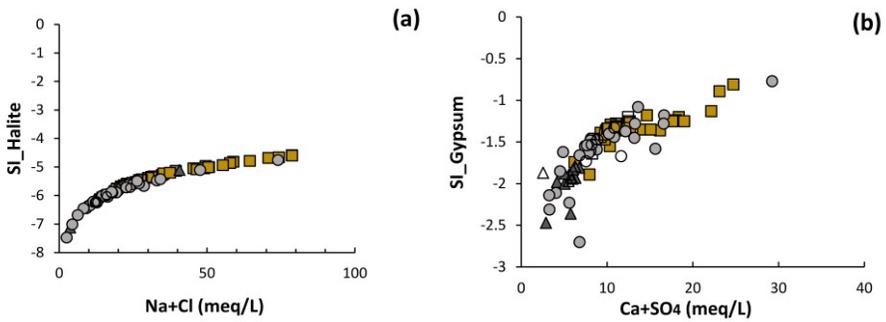
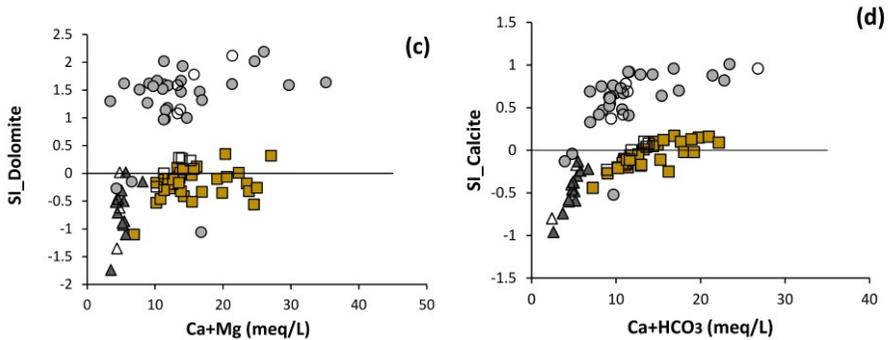


Figure 5 : Relations (a)  $SI_{Halite}/Na+Cl$ , (b)  $SI_{Gypse}/Ca+SO_4$ , (c)  $SI_{Dolomite}/Ca+Mg$  et (d)  $SI_{Calcite}/Ca+HCO_3$ .



Suite.

En comparant les résultats des trois campagnes, on peut tirer que l'indice de saturation en calcite et en dolomite ont été avancées d'un signe négatif (avant la mise en service du barrage de Zerrar) au signe positif (après la construction du barrage). Quant à l'indice de l'halite et de gypse, ils ont gardé leur signe négatif (Fig. 5).

### Piézométrie

La carte piézométrique type (Fig. 6a) de la cuvette synclinale d'Essaouira montre un sens d'écoulement du SE vers le NW, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 2.5% en amont et 1.25 % en aval. La figure 6b, représentant l'évolution du niveau piézométrique de la nappe Plio-quaternaire en fonction du temps, montre qu'il y'a une diminution générale du niveau piézométrique durant 2015, après la mise en service du barrage Zerrar, par rapport à 2009. La baisse du niveau piézométrique n'a aucun effet sur le gradient hydraulique, car ce paramètre est en liaison direct avec le pendage des couches. La faible profondeur de l'aquifère combiné à sa structure et texture les rend vulnérable face à la sécheresse, cet effet est remarquablement démontré durant l'année 1995 qui a connu la pire sécheresse au Maroc durant le siècle dernier. Au cours de cette année la hauteur de tous les points d'eau a connu une baisse allons jusqu'à 11m. De l'année 1995 jusqu'à 2009, les hauteurs d'eaux se rétablissent progressivement jusqu'à atteindre des valeurs comparables à celles de 1990, cette augmentation est facilement explicable par la stabilité des précipitations. Aussi la surexploitation du système aquifère n'explique que partiellement cette baisse, d'où l'impact et l'influence du barrage Zerrar. Cette mobilisation, retient l'eau de l'Oued Ksob qui est connue pour être la source d'alimentation majeure de la cuvette synclinale d'Essaouira. En retenant l'eau de Ksob il baisse son

débit et raréfie la ressource en aval. Les points de captage du système aquifère montrent un abaissement du niveau des eaux souterraines. Cette réduction aurait un effet sur la qualité des eaux souterraines en augmentant la salinité.

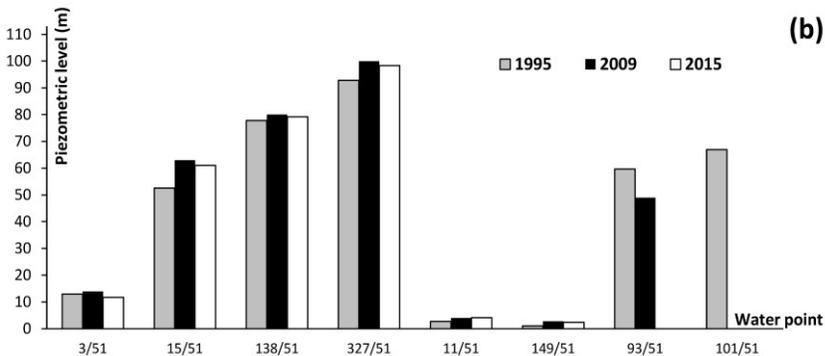
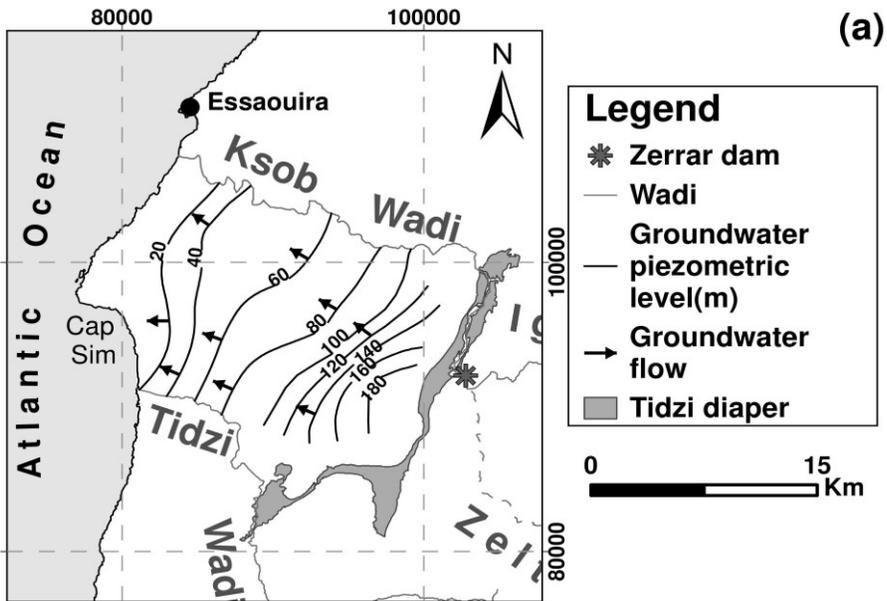


Figure 6(a) : Carte piézométrique type, (b) évolution du niveau piézométrique de la nappe Plio-quaternaire en fonction du temps.

## Isotopie

La teneur en  $^2\text{H}$  et en  $^{18}\text{O}$  des échantillons d'eau ont été déterminées par spectrométrie de masse. Chaque échantillon a été mesurée trois fois afin d'augmenter la précision de l'analyse, en utilisant les méthodes proposées par Friedman (Friedman, 1953), et par Epstein et Mayeda (Epstein et Mayeda 1953) pour  $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$ , respectivement, avec une précision de  $\pm 1 \text{ ‰}$  pour  $\delta^2\text{H}$  et de  $\pm 0,1 \text{ ‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$ . Les données des isotopes stables,  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ , sont signalés à V-SMOW (Vienne-Standard Mean Ocean Water) en ‰.

Le tritium ( $^3\text{H}$ ) contenu a été déterminée en utilisant l'enrichissement électrolytique suivie par scintillation liquide la méthode de comptage (IAEA 1976, Lucas et Unterweger 2000). L'erreur associée aux mesures de  $^3\text{H}$  (généralement autour de 0,6 unité Tritium (UT) varie avec la concentration  $^3\text{H}$  dans l'échantillon d'eau.

Les compositions des isotopes stables d'échantillons allant de -5,59 à -3,77 ‰ et -32,78 à -21,27 ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ , respectivement. Les résultats du système aquifère étudiés sont présentés dans la Figure 7 par rapport à la ligne des eaux météoriques globales (GMWL) ( $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ ) (Craig 1961) et la ligne des eaux météoriques local (LMWL) ( $\delta^2\text{H} = 7,72 \delta^{18}\text{O} + 10,53$ ). La proximité à GMWL suggère que l'eau était d'origine météorique. Tous les points sont placés au-dessus du GMWL, ce qui reflète une recharge directe sans évaporation notable.

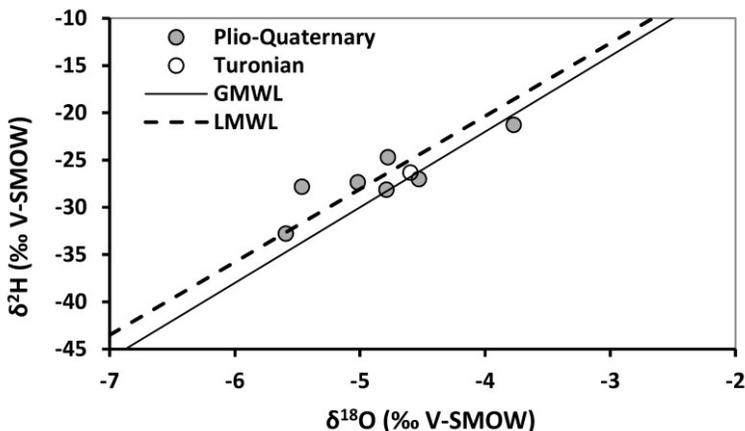


Figure 7 :  $\delta^2\text{H}$  en fonction de  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux souterraines du bassin d'Essaouira

En ce qui concerne les teneurs en tritium ( $^3\text{H}$ ), ils varient de 0 à 3,4 TU. En général, l'eau avec des teneurs en  $^3\text{H} < 1\text{ TU}$  est considéré comme ayant un âge pré-1952, date représentant la date des essais nucléaires et ces eaux peuvent avoir été affectées par des processus peu ou pas secondaires, telle que l'évaporation avant l'infiltration ou l'échange isotopique avec les matériaux aquifères (Mazor, 1991). Cependant, les concentrations de  $^3\text{H}$  au-dessus de 1TU indiquent une infiltration récente d'eau. Le diagramme de corrélation  $^{18}\text{O}$ - $^3\text{H}$  (Fig. 8) montre que tous les échantillons ayant connu la mesure du  $^3\text{H}$  sont placés au-dessus de la ligne limite (1UT), ce qui reflète une recharge récente du système aquifère du bassin d'Essaouira.

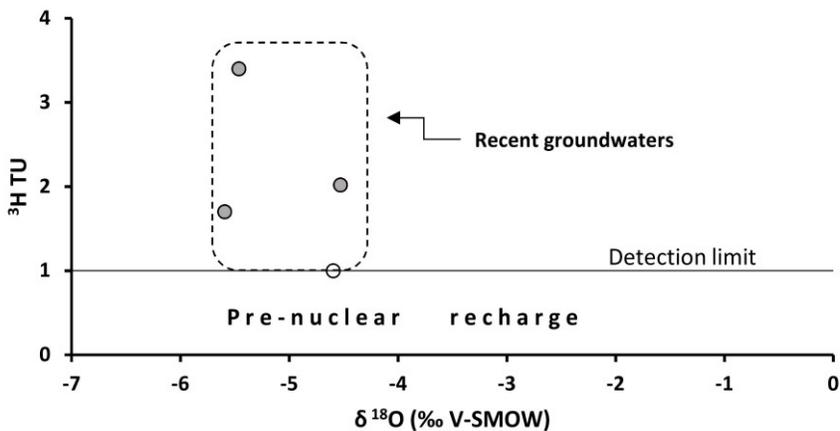


Figure 8 :  $^3\text{H}$  en fonction de  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux souterraines du bassin d'Essaouira.

Cependant, La recharge des aquifères du bassin est supportée par des précipitations d'origine océanique. Cette recharge est rapide sans évaporation importante. Les teneurs en  $^3\text{H}$  et en  $^{14}\text{C}$  montrent que la charge est généralement récente et la tranche d'âge des eaux entre moderne et 2300 BP.

## CONCLUSIONS

Le barrage Zerrar est un projet ambitieux, ayant pour but principal, l'approvisionnement en eau de la ville d'Essaouira, d'augmenter le rendement agricole et de protéger la baie d'Essaouira. La mobilisation de la ressource au niveau du barrage Zerrar va non seulement avoir un impact sur l'environnement et le cadre socio-économique de la région, mais aussi sur tout le système

aquifère du bassin d'Essaouira, connu comme étant un system d'un équilibre fragile.

Les fortes crues, marquant l'impact du changement climatique de ces dernières années et pouvant transporter des charges de sédiments en suspension supérieures à 100 g/L, comme dans le bassin d'Essaouira. Fortes concentrations se manifestant surtout pendant l'automne, succédant à la période estivale pendant laquelle les oueds sont à sec. Le plus souvent, il convient de rajouter la partie charriée du transport aux chiffres précédents. L'une des conséquences immédiates de l'érosion est la sédimentation dans le barrage Zerrar, diminuant considérablement sa durée de vie.

L'étude hydrogéochimique a montré que le faciès de l'eau dans le système aquifère a évolué du type Na-Cl, avant la construction du barrage, au type Mg-Cl et Ca-Cl avec la dominance du premier type, après la mise en service du barrage. Les corrélations entre les éléments majeurs et les indices de saturation par rapport à l'halite et le gypse indiquent que la dissolution des roches évaporitiques et le processus d'échange d'ions affectent considérablement la composition des eaux souterraines. L'hydrochimie des eaux souterraines dans la zone d'étude est indirectement influencée par le barrage Zerrar.

Sur le plan piézométrique, les points de captage du système aquifère montrent un abaissement du niveau des eaux souterraines. Cette réduction a un effet sur la qualité des eaux souterraines en augmentant la salinité.

Les résultats isotopiques montrent que la recharge des aquifères du bassin est assurée par des précipitations d'origine océanique. Cette recharge est rapide sans évaporation importante. Les teneurs en  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$  montre que la charge est généralement récente et la tranche d'âge des eaux entre moderne et 2300 BP. Cependant, les résultats de cette étude peuvent être prises en compte pour suivre l'impact du barrage, en plus de l'effet du changement climatique et la surexploitation sur la cuvette du bassin d'Essaouira et par conséquent sur la qualité de l'eau du système aquifère de cette région.

## REFERENCES

- BAHIR M., EL MOUKHAYAR R. AND CHKIR N., (2014). Recharge and Hydro-geochemical Evolution Groundwater in Semi-Arid Zone (Essaouira Basin, Morocco). *Journal of Resources Development and Management*, Vol.3, pp.30-48.
- BAHIR M., SILVA M.O. ET CARREIRA P., (2007). Ressources en eau en zones semi-aride, état des lieux : cas du bassin d'Essaouira (Maroc atlantique). A.Pulido Bosch,

- J. A. López Geta y G. Ramos González (Eds.), Los acuíferos costeros: retos y soluciones. Coastal aquifers: challenges and solutions, pp : 529-540. ISBN: 978-84-7840-712-5.
- BAHIR M., MENNANI A., OLIVEIRA DA SILVA M. BLAVOUX B. (2003). Impact de la sécheresse sur la ressource en eau en zone semi-aride : cas de l'aquifère barrémien-aptien de la zone côtière d'Essaouira (Maroc). Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos. pp 785-796.
- BOUCHAOU L., TAGMA T., BOUTALEB S., HSSAISOUNE M., EL MORJANI Z.E. (2011). Climate change and its impacts on groundwater resources in Morocco: the case of the Souss-Massa basin. Chapter 8 in book: Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations. pp 129-144.
- CAROL, E., KRUSE, E., MAS-PLA, J., 2009. Hydrochemical and isotopic evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombon Bay, Argentina. Journal of Hydrology, 365, pp: 35-45.
- CHAMCHATI H. ET BAHIR M., (2011). Caractérisation du système aquifère plio-quaternaire et turonien (Bassin d'Essaouira, Maroc). Heohydro, pp.1-6.
- CRAIG, H., (1961). Isotopic variation in meteoric water. Science, 133, pp: 1702-1703.
- EPSTEIN S. AND MAYEDA T., (1953). Variation of  $^{18}\text{O}$  content of waters from natural sources. Geochim Cosmochim Acta, 4, pp: 213-224.
- FERNANDES P. GALEGO, BAHIR M., MENDONÇA J., CARREIRA P., FAKIR Y., 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, pp: 207-219.
- FRIEDMAN I., (1953). Deuterium content of natural waters and other substances. Geochim Cosmochim Acta. 4, pp: 89-103.
- GARCIA, M.G., DEL HIDALGO, M., BLESA, M.A.,(2001). Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. Journal of Hydrology 9, pp: 597-610.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), (1976). Procedure and technique critique for tritium enrichment by electrolysis at IAEA laboratory. Vienna (Austria): Technical Procedure n°. 19, IAEA, Isotope Hydrology Section.
- INGEMA, (2006). Etude d'impact du barrage Zerrar sur l'environnement naturel et socio-économique mission I : identification et évaluation des impacts du barrage Zerrar sur l'environnement naturel et socio-économique. Rapport réalisé par la société d'ingénierie INGEMA.
- LUCAS L.L. AND UNTERWEGER M.P., (2000). Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. J Res Natl Inst. Technol, 105, pp: 541-549.
- MENNANI A., BLAVOUX B., BAHIR M., BELLION Y., JALAL M. ET DANIEL M., (2001). Apports des analyses chimiques et isotopiques à la connaissance du

fonctionnement des aquifères plio-quaternaire et turonien de la zone synclinale d'Essaouira (Maroc occidental). *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 32/4, pp (819-835), septembre 2001.

MAZOR E., (1991). *Applied chemical and isotopic groundwater hydrology*. Open University Press, Buckingham, 282p.

PETALAS C., PISINARAS V., GEMITZI A., TSIHRINTZIS V.A. AND OUZOUNIS K., (2009). Current conditions of saltwater intrusion in the coastal Rhodope aquifer system, northeastern Greece, *Desalination*, Vol. 237(1-3), pp: 22-41.

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*. 337, pp:515-524. doi:10.1016/j.crte.2005.01.010.