



IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU AU MAROC ; CAS DU BASSIN D'ESSAOUIRA

CLIMATE CHANGE IMPACT ON WATER RESOURCE IN MOROCCO; CASE OF ESSAOIURA BASIN

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

¹ 3GEOLAB, Département de Géologie, Faculté des Sciences Semlalia,
Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

² Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), Département de Géologie,
ENS-Marrakech, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

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

bahir@uca.ma

RESUME

Depuis les années 50, beaucoup de changements sont observés dans le climat du globe à savoir ; le réchauffement de l'atmosphère et l'océan, diminution de l'étendue de neiges et glaces et l'élévation des niveaux des mers. En plus de la pression démographique, les pays maghrébins souffrent de la sécheresse qui accentue le phénomène de la désertification et l'érosion du sol ainsi que leur salinité, ce qui aboutit à la salinisation et la raréfaction des ressources en eau. Au Maroc, le changement climatique engendre : érosion du sol sous l'effet de la désertification qui aboutit à l'envasement des barrages, accentuation de la salinisation des soles ainsi que la ressource en eau. Le bassin d'Essaouira, objet de cette étude, est situé sur la façade atlantique du Maroc au Sud-Est de la ville d'Essaouira. Ce bassin se caractérise d'un climat semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 300 mm/an et des températures à la moyenne de 20°C. Vu l'importance de l'aquifère d'Essaouira dans l'approvisionnement en eau potable la ville d'Essaouira et les agglomérations avoisinantes, une étude a été faite pour évaluer quantitativement et qualitativement l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Les aquifères caractérisant cette zone sont celui de Céno-mano-Turonien en amont et Plio-Quaternaire en aval, séparés par le diapir de Tidzi. Les cartes

piézométriques du bassin ont été faites (1990-2015). L'étude du chimisme des eaux montre que celles-ci présentent un faciès de type Na-Cl (1990-2009), Mg-Cl et Ca-Cl (2015). La salinité varie de 80 à 3500 mg/L. La concentration de ^{18}O ; ^2H ; ^3H et ^{14}C ont été mesurées, une droite météorique locale proche de la droite météorique mondiale caractérisant les précipitations d'origine océanique a été déterminée ainsi que l'âge des eaux souterraines est déterminé. Le bassin d'Essaouira est très vulnérable et sensible au changement climatique du fait que sa recharge est entièrement dépendante de l'eau de pluie.

Mots clés : Bassin d'Essaouira, changement climatique, hydrochimie, isotopie, semi-aride, ressource en eau, recharge.

ABSTRACT

Since the 50s, many changes are observed in the global climate namely; the warming of the atmosphere and ocean, decrease in the extent of snow and ice and rising sea levels. In addition to population pressure, the Maghreb countries suffer from drought which accentuates the phenomenon of desertification and soil erosion and salinity, leading to salinization and depletion of water resources. In Morocco, climate change causes: soil erosion as a result of desertification resulting in siltation of dams, accentuation the salinization of soils and water resources. The Essaouira Basin, object of this study, is located on the Atlantic coast of Morocco in the southeast of Essaouira city. This basin is characterized by a semi-arid climate with annual rainfall of around 300 mm / year and average temperatures of 20 ° C. Given the importance of the Essaouira aquifer in supplying drinking water to the city of Essaouira and neighboring communities, a study was done to quantitatively and qualitatively assess the impact of climate change on water resources. The aquifers characterizing this area are the Cenomanian-Turonian in upstream and Plio-Quaternary in downstream separated by the diapir Tidzi. The piezometric maps were made (1990-2015). The study of the chemistry of water shows that they have type facies Na-Cl (1990-2009), Mg-Cl and Cl (2015). The salinity varies from 80-3500 mg / L. The concentration of ^{18}O ; ^2H ; ^3H and ^{14}C were measured, a local meteoric right close to the global meteoric right characterizing ocean-precipitation was determined and the age of groundwater is determined. The Essaouira Basin is very vulnerable and sensitive to climate change because its home is entirely dependent on rainwater.

Keywords: Climate change, Essaouira basin, hydrochemistry, recharge, semi-arid stable isotope, water resources.

INTRODUCTION

Depuis les années cinquante, le climat terrestre a connu de grands changements représentés essentiellement par le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, en étroite relation avec l'activité humaine.

Ces changements ont une influence négative sur l'environnement et l'homme. Parmi les conséquences de ces changements on note : (i) l'augmentation de la température, (ii) diminution des précipitations et la masse des calottes glaciaires, (iii) élévation du niveau de la mer et (iiii) la raréfaction des ressources en eau. Egalement les pays maghrébins (Algérie, Maroc et Tunisie) n'ont pas été épargnés par l'impact de ces changements qui affectent négativement la plupart de leurs ressources naturelles, notamment la ressource en eau. Localement, le bassin d'Essaouira a aussi sa part de ces effets qui sont représentés essentiellement dans la raréfaction des ressources en eau voir aussi sa salinité suite à l'invasion des eaux de mer et à l'accentuation de la salinité du sol, dégradation de la qualité des eaux souterraines et l'extermination d'un certain nombre de sources d'eau.

Changement climatique à l'échelle planétaire

Selon son rapport du septembre 2013, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) affirme, que le réchauffement du système climatique du globe est sans équivoque. Parmi les résultats de ce réchauffement, on note : (i) L'augmentation de la température moyenne du globe (+0.85°C) et la diminution des précipitations surtout en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du sud. (ii) La réduction de la superficie des calottes glaciers et les glaciers au rythme de 3.5 à 4.1% par décennie. (iii) L'élévation mondiale du niveau moyen de la mer avec l'affiche une hausse de 19 cm.

Changement climatique aux pays maghrébins

Les pays du Maghreb n'ont pas été épargnés par le changement climatique. Le nord-ouest de l'Algérie a connu une réduction de l'ordre de 40% des précipitations annuelles à partir de la première moitié des années 1970 (UNESCO, 2010 ; Nouacer et al., 2013), accompagnée d'une hausse de température. Selon le 4ème rapport du GIEC (Bates et al., 2008), les lames d'eaux écoulées annuelles moyennes pour la période de 1976 à 2002 sont de 28

à 36% plus faible que celles de la période 1949-1976, et cette réduction est attribuée principalement au changement climatique. D'après l'institut national de la météorologie tunisienne, le régime pluviométrique de la Tunisie durant le 20^{ème} siècle a été marqué par l'alternance de périodes sèches et de périodes humides. Quant aux températures, on observe une tendance à la hausse de plus d'un degré depuis les années soixante. En plus de cette hausse, la Tunisie souffrirait d'une amplification des processus d'érosion asséchant les sols et augmentant la salinité des réservoirs d'eau. Au Maroc, les ressources hydriques sont limitées, elles sont estimées à 20 milliards de m³, soit une moyenne de 700m³/hab/an, ce qui correspond à une situation de stress hydrique assez élevée. Le nombre des années à déficit pluviométrique est plus important que le nombre des années excédentaires (Driouech, 2010 ; Driouech et al., 2013 ; Sebbar et al., 2011, Stour & Agoumi, 2009 ; Sinan et al., 2009), notamment les cycles de 1980-1985, 1990-1995 et 2007-2010. D'après babqiqi (2014), La comparaison des moyennes des températures annuelles sur les deux périodes 1971-1980 et 1998-2007 montre une tendance à la hausse (de 0.3°C à 2.5°C).

ZONE D'ETUDE

Le Bassin d'Essaouira fait partie des zones semi-arides du Maroc. Il est localisé sur la façade Atlantique entre Jbel Hadid au nord et Oued Igouzoullene au sud. La partie concernée par cette étude est située entre Jbel Hadid et Oued Tidzi (Fig. 1). Sur le plan stratigraphique, les affleurements sont constitués de terrains dont l'âge s'échelonne entre le Crétacé gréseux à la base et à dominance carbonaté alternant avec des passées de marnes, le Tertiaire formé de marnes phosphatées et de grès et le Quaternaire constitué de grès et conglomérats. Le Trias visible au niveau du diapir de Tidzi est formé d'argiles rouges salifères et de dolérites (Duffaud et al., 1966) (Fig. 2).

Dans la zone d'étude, les eaux souterraines constituent la principale ressource en eau potable et d'irrigation. La combinaison des effets de la tectonique et du diapirisme ont provoqué la compartimentation du bassin en plusieurs systèmes aquifères. Parmi ces systèmes, la cuvette synclinale d'Essaouira et celle de Bouabout, séparées par le diapir de Tidzi. Le premier est le siège de l'aquifères Plio-Quaternaire à matrice gréseuse, dont le mur est représenté par les marnes sénoniennes, et le Turonien calcaro-dolomitique fracturé. Le deuxième renferme l'aquifère Cénomano-Turonien formé de calcaires dolomitiques fracturés alternant avec des marnes, son mur est représenté par les marnes grises du Cénomaniens inférieur (Bahir et al., 2013 ; Bahir, 2007 ; Jalal et al, 2001)

Impact du changement climatique sur la ressource en eau au Maroc ; cas du bassin d'Essaouira (Maroc).

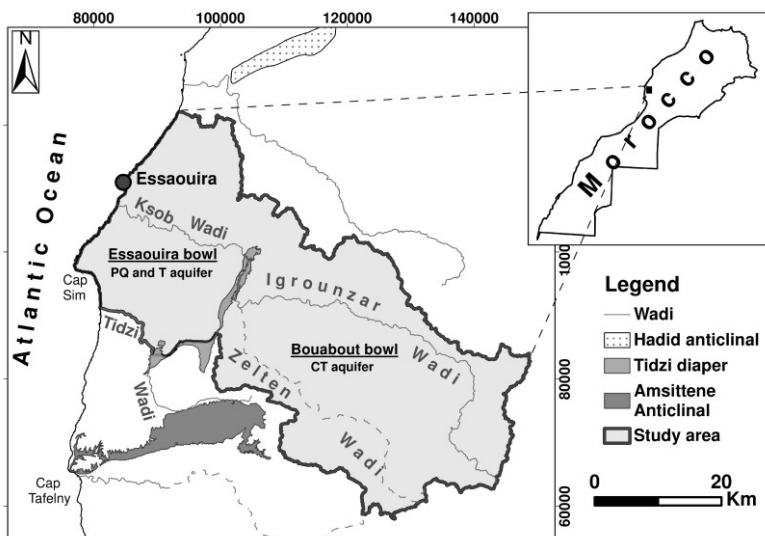


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

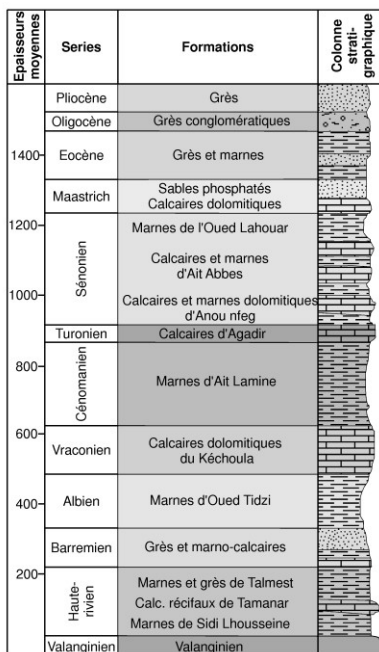


Figure 2 : Log stratigraphique synthétique du Crétacé du Bassin synclinal d'Essaouira (Duffaud et al, 1966).

METHODOLOGIE

Cette étude est basée sur les données disponibles des paramètres climatiques, la température et les précipitations, les données piézométries, hydrochimiques et isotopies. Ces données sont utilisées pour étudier l'impact des changements climatiques dans un bassin hydrologique sous climat semi-aride. Un système d'information géographique a été créé pour étudier la variation spatio-temporelle de la salinité et pour dresser les cartes piézométriques.

RESULTATS ET DISCUSSION

Précipitations

En général, les précipitations au Maroc diminuent en allant du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est. Le nord-ouest reçoit les plus grandes quantités de précipitations. La pluviométrie moyenne annuelle atteint plus de 500mm dans le nord, Saïs et Hauteur atlas haut, et moins de 500mm partout. Au cours des dernières décennies, les précipitations présentent des fluctuations aléatoires (succession désordonnée des années sèches et humides), avec une tendance globale à la baisse. Cette diminution oscille, selon les régions, entre 3% et 30% (babqiqi 2014). Ce sont les résultats des effets de la variabilité naturelle et les changements climatiques.

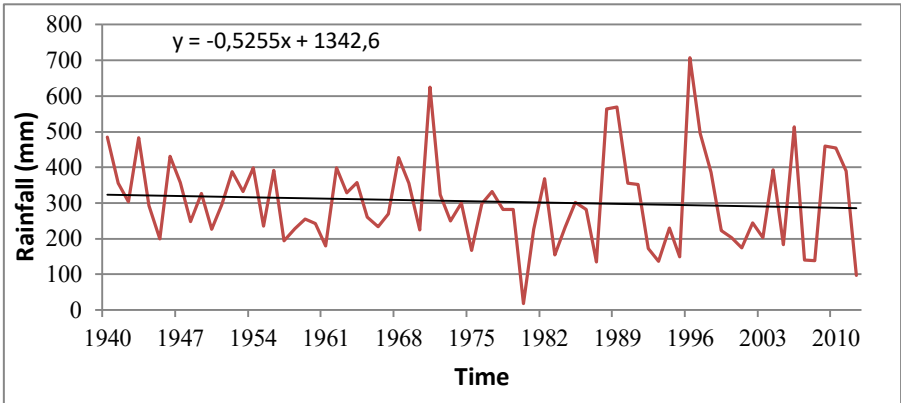
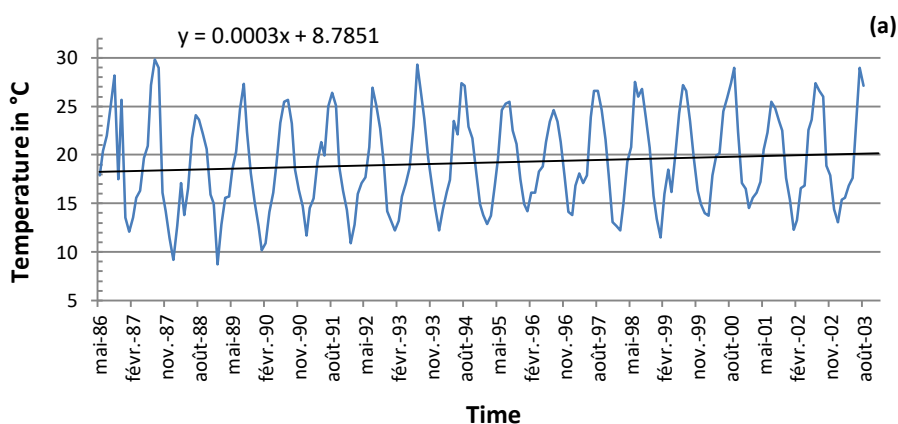


Figure 3 : Evolution des précipitations au bassin d’Essaouira.

Le bassin d'Essaouira se caractérise par un climat de type semi-aride et un cycle climatique annuel à deux saisons. L'une est humide s'étale du mois de novembre à mars et l'autre sèche du mars à octobre. La moyenne annuelle des précipitations ne passe pas les 300mm. La pluviométrie varie dans le temps et dans l'espace. Malgré le retour des précipitations, sous forme d'orages, au cours des dernières décennies, 1988 ; 1996-1997 et 2011, la tendance à la baisse se produit dans la zone d'étude (Fig. 3).

Températures

Au Maroc, les températures moyennes annuelles susceptibles de connaître une augmentation allant de 0,6 ° C à 1,1 ° C pour 2020 (Bates et al., 2008). La comparaison des températures annuelles moyennes de 20 stations a étudié au cours des deux périodes 1971-1980 et 1998-2007 montre une tendance à la hausse. Cela varie d'une station à l'autre, allant de 0,3 ° C à Tétouan (nord Maroc) à 2,5 ° C à Midelt (centre Maroc), passant par 1°C à Agadir (babqiqi, 2014). Les températures mensuelles au bassin d'Essaouira indiquent une augmentation au cours des dernières décennies (Fig. 4a). L'évolution interannuelle montre la même tendance avec une forte augmentation de la température. La température annuelle moyenne est tracée en fonction du temps (Fig. 4b). La ligne noire discontinue représente une régression linéaire. Les deux bandes bleues et rouges représentent les intervalles de confiance à 95% de la moyenne et les observations.



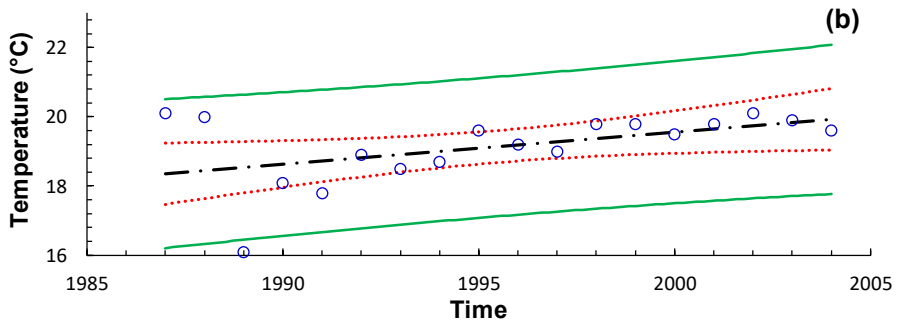


Figure 4 : Evolution saisonnière des température (a) mensuelles et (b) annuelles du bassin d'Essaouira

Piézométrie

L'évolution de la piézométrie dans le bassin d'Essaouira a été mesurée aussi bien dans sa partie amont (aquifère Céno-mano-Turonien) que dans sa partie aval (aquifère Plio-Quaternaire).

- Nappe céno-mano-turonienne de Bouabout : Les campagnes de mesure du niveau piézométrique effectuées de 2006 à 2010 ont permis d'établir des courbes d'évolution du niveau d'eau d'un certain nombre de points d'eaux tels que 1126/52 et 1166/52 (Fig. 5). La représentation graphique de l'évolution du niveau piézométrique au cours de la période 2006-2010 au niveau des points 1126/52 et 1166/52, montre une baisse du niveau de l'eau en allant du juin 2006 jusqu'au octobre 2008. Ce déclin est expliqué par la sécheresse que connaît la région pendant les deux années 2007 et 2008 et aussi par la surexploitation de la nappe pour l'irrigation afin de pallier l'impact de la sécheresse. Après octobre 2008, le niveau d'eau commence à remonter durant une durée de huit mois, puis commence à se déclinier de nouveau.

- Nappe plio-quaternaire : les campagnes de mesure du niveau piézométrique de la nappe Plio-quaternaire durant 1990,1995,2000,2004, 2009 et 2015 ont permis de dresser les cartes piézométriques ainsi que le graphe de l'évolution du niveau piézométrique en fonction du temps (Fig. 6). La carte piézométrique type montre un sens d'écoulement global du Sud-Est vers le Nord-Ouest, conditionné par le redressement de son substratum à l'Est suite au soulèvement du diapir de Tidzi. La figure 6b laisse apparaître une diminution des niveaux piézométriques en 1995 (l'année la plus sèche du siècle au Maroc) au sein d'un certains puits ayant connu des mesures de leur plan d'eau dans les cinq

périodes. Malgré la légère remontée du plan d'eau après 1995, on observe une tendance générale à la baisse du niveau piézométrique de l'aquifère plio-quaternaire, et ce depuis 1990 jusqu'au 2015, confirmant ainsi l'impact du changement climatique sur la ressource. Cette variation du niveau piézométrique ne peut être expliquée que par l'effet conjugué du changement climatique et de la surexploitation pour pallier l'effet de la sécheresse, car cette zone se caractérise par une activité agricole très modeste et absence d'activité industrielle. La surexploitation a été confirmée par de nombreux puits devenus secs lors de la campagne de 2015, notamment les puits 116/51 et 117/51 (depuis 2004), 101/51 (depuis 2009), 93/51 (depuis 2015).

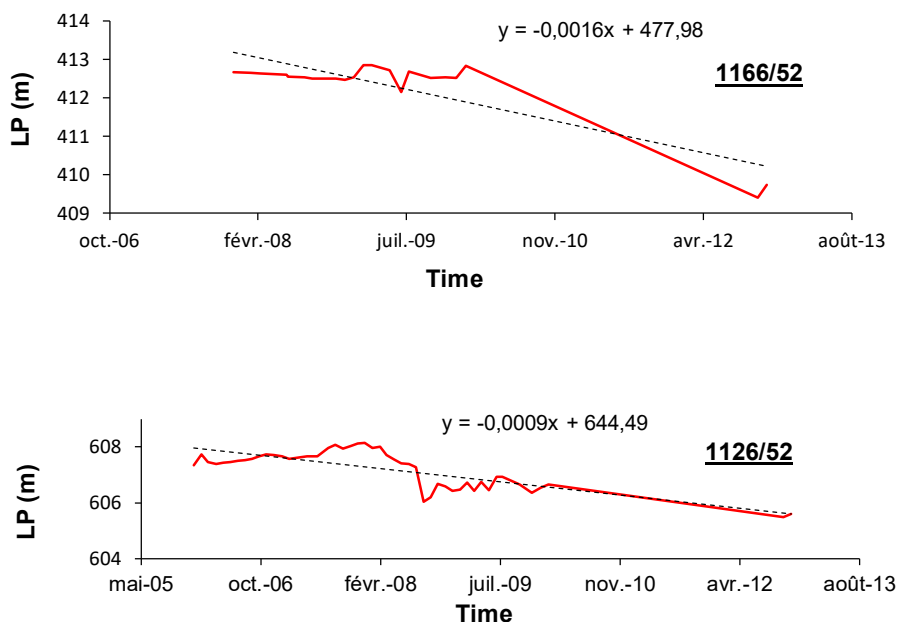


Figure 5 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du point 1166/52 et 1126/52.

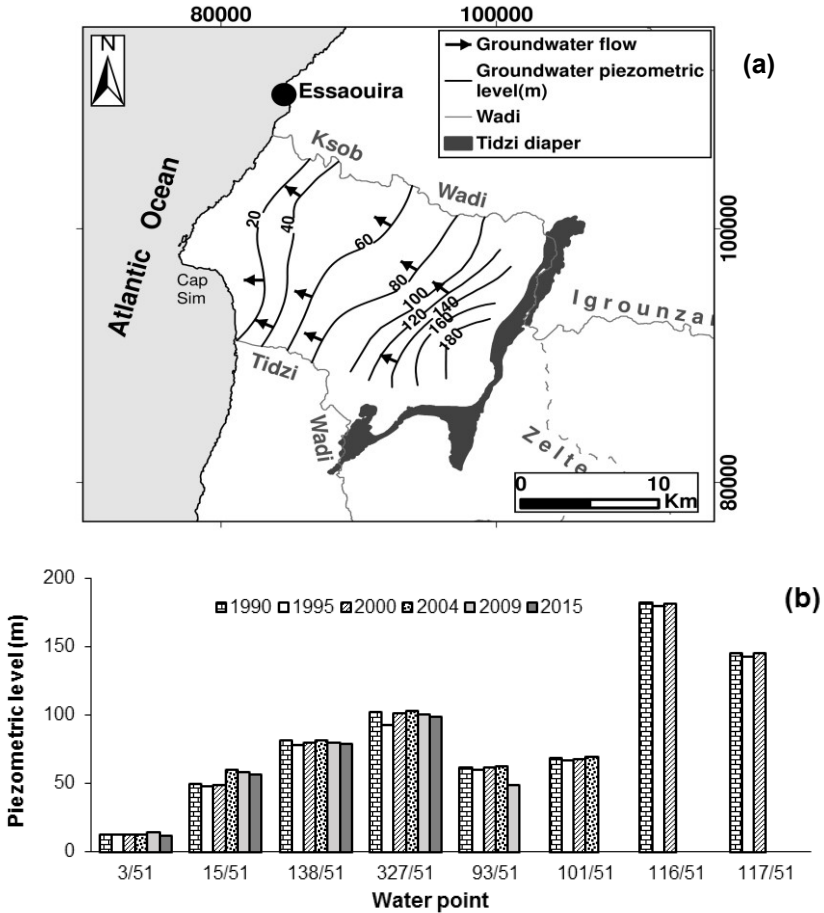


Figure 6 : (a) carte piézométrique type, (b) évolution du niveau piézométrique de l'aquifère plio-quaternaire.

Hydrochimie

Les eaux de l'aquifère plio-quaternaire présentent généralement deux types de faciès chimiques (Fig. 7) : le type Na-Cl pour 1990, 1995 et 2009, et le Mg-Cl et Ca-Cl pour 2015 avec la dominance du premier type. Cette évolution du faciès est le résultat du phénomène d'échange de base suite aux précipitations exceptionnelles qu'a connu cette zone au cours du début du cycle pluvieux de 2015.

Les eaux prélevées en 1990, 1995, 2009 et en 2015 présentent une salinité oscille entre 80 et 3500 mg/L. Celle-ci rendre la qualité des eaux très médiocre durant le cycle sec de 1995 à une modeste amélioration durant le cycle pluvieux de 2015. On observe une dégradation en allant du nord vers le sud et ce en s'éloignant de la zone d'alimentation, constituée par l'oued Ksob, et un séjour de plus en plus long de ces eaux. (Fig. 8). La dégradation de la qualité de la ressource est due, outre le déficit pluviométrique dû aux changements climatiques et à l'activité anthropique.

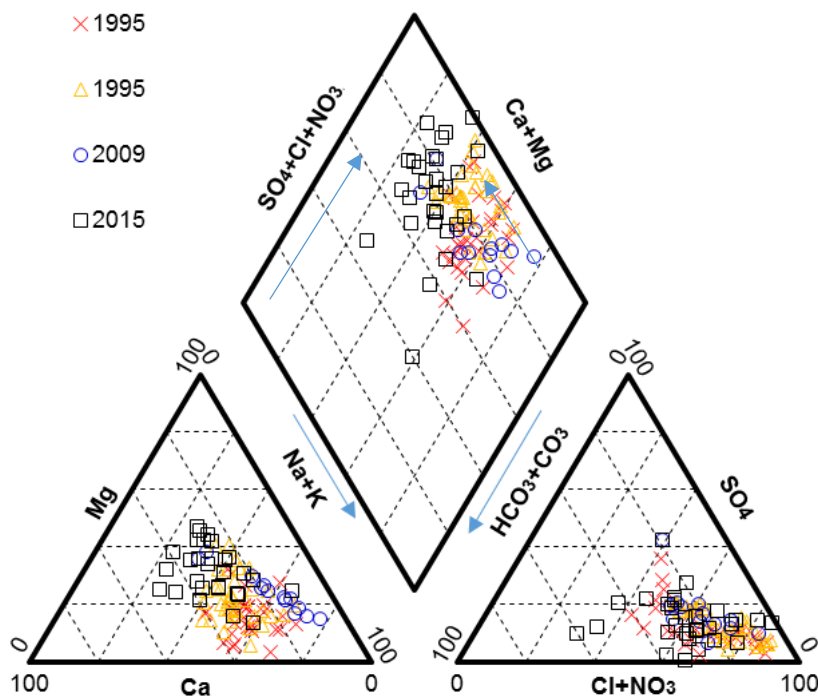


Figure 7 : Diagramme de Piper des eaux de l'aurifère Plio-Quaternaire du bassin d'Essaouira

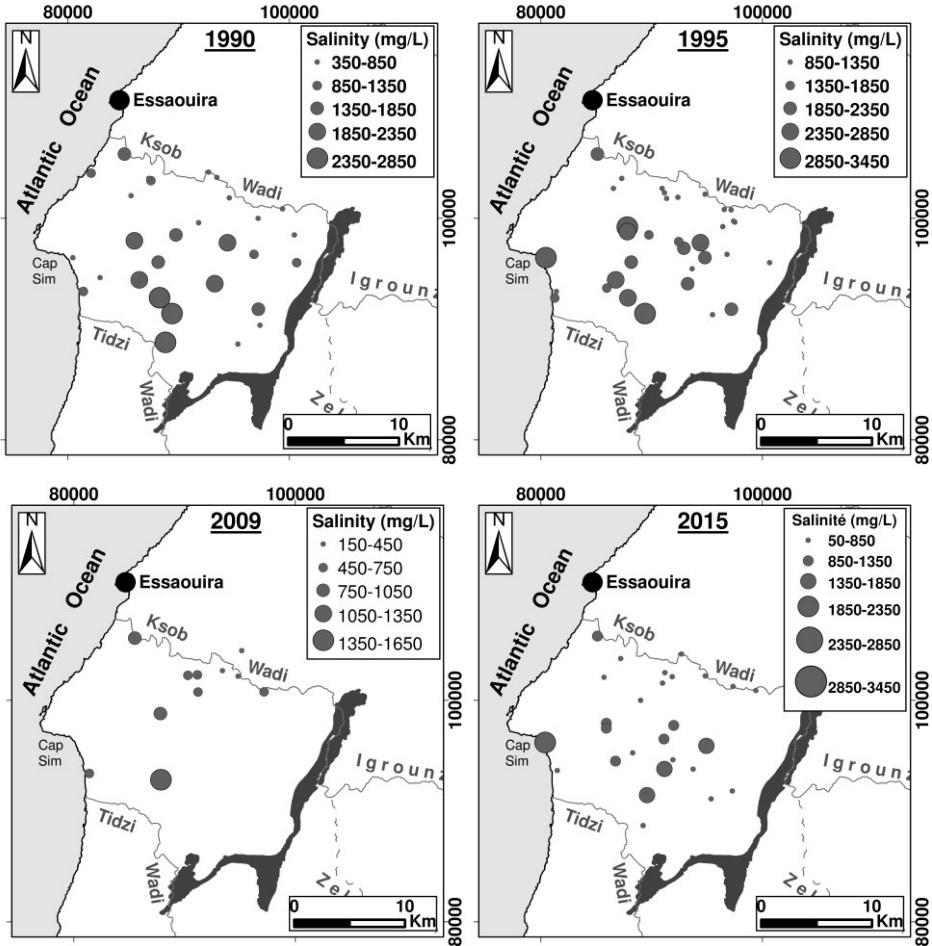


Figure 8 : Distribution spatio-temporelle de la salinité des eaux de l'aquifère Plio-Quaternaire du bassin d'Essaouira.

Isotopie

Les teneurs en isotopes stables des eaux échantillonnées présentent une large gamme de variation. Les teneurs en ^{18}O varient entre $-3,77$ et $-5,74$ ‰ vs. SMOW avec une moyenne de $-4,87$ ‰, et celles en ^2H varient entre $-21,27$ et $-33,66$ ‰ vs. SMOW avec une moyenne de $-28,02$ ‰. Ces valeurs sont rapportées sur le diagramme classique $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 9) qui

présente la droite météorique mondiale (DMM) (Craig, 1961) et la droite météorique locale (DML) (Bahir et al.,2000). Les points représentatifs des eaux de la partie amont et aval de la zone d'étude sont situés près des droites météoriques, ceci reflète une infiltration rapide de pluies récentes non évaporées.

Le tritium est l'isotope radioactif de l'hydrogène. Faisant partie intime de la molécule d'eau, cet isotope est caractérisé par une période de demi-vie de 12,43 ans, d'où son importance dans l'étude des cycles hydrogéologiques relativement courts (Fontes, 1976). Les teneurs en tritium (^3H), ils varient de 0 à 3.2 UT. En général, l'eau avec des teneurs en $^3\text{H} < 1\text{UU}$ est considéré comme ayant un âge pré-1952, date du début des essais thermonucléaires (Mazor, 1991). Cependant, les concentrations de ^3H au-dessus de 1TU indiquent une infiltration récente d'eau. Le diagramme de corrélation ^{18}O - ^3H (Fig. 10) montre que la majorité des échantillons ayant connu la mesure du ^3H sont placés de de la ligne limite (1UT), à l'exception de certains, ce qui reflète les aquifères du bassin d'Essaouira renfermant des eaux récentes et anciennes (avant la date des essais thermonucléaires).

Le carbone-14 est l'isotope radioactif du carbone. Son abondance naturelle est de $1.2 \cdot 10^{-12}$ atomes par rapport à l'atome du carbone ^{12}C . Il constitue un bon chronomètre pour la datation des eaux souterraines dont l'âge varie entre l'actuel et 35 000 ans (Fontes, 1976). Le carbone-13 est un isotope stable peu abondant du carbone. Il est considéré comme un excellent traceur de l'évolution des carbonates dans les eaux souterraines étant donné que son abondance naturelle diffère d'un réservoir à un autre (Clark et Fritz, 1997). L'utilisation conjointe de ^{14}C et ^{13}C permet de calculer l'âge des eaux souterraines pour des situations relativement simples et de détecter d'éventuels échanges de carbone avec l'environnement.

Plusieurs modèles de correction ont été proposés pour l'estimation des temps de résidence « réels » des eaux souterraines. Cette opération consiste à calculer la valeur de l'activité initiale A_0 et à corriger les phénomènes de mélange et d'échange isotopique entre l'eau et la matrice. Ces modèles se basent sur le fait que le CITD des eaux a pour origine deux sources de carbone : le CO_2 gazeux et les carbonates solides (Clark et Fritz, 1997). Les âges calculés selon le modèle de Tamers (Tamers, 1967) varient de l'actuel jusqu'à 6 236 ans BP (Tableau 1).

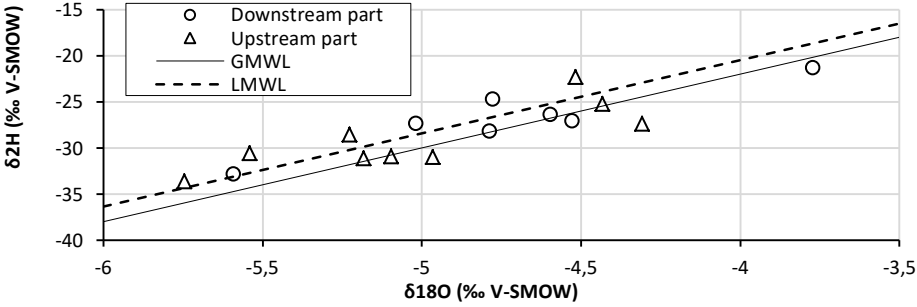


Figure 9 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ des eaux souterraines du bassin d'Essaouira.

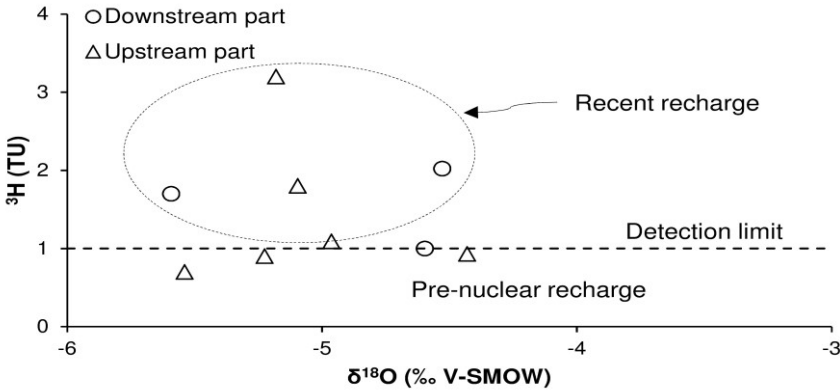


Figure 10 : Diagramme ^3H - $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines du bassin d'Essaouira

Tableau 1 : Calcul de l'activité initiale A0 et de l'âge des eaux souterraines du bassin d'Essaouira.

Echantillon	^{14}C	^{13}C	Age
	pcm	(‰ VPDB)	A0 (pcm) Tamers ans BP
E13	42.37	-7.70	61.1 3033.1
E22	70.93	-6.27	56.8 Actuel
E23	72.07	-8.42	56.7 Actuel
E28	27.03	-8.87	57.4 6236.7
E30	60.97	-10.29	57.7 Actuel
E31	50.9	-8.20	57 935.41
E64	60.7	-9.47	- -

CONCLUSION

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, il est étroitement lié à l'activité humaine. Parmi ses conséquences on cite le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan et la diminution de l'étendu des calottes glaciaires qui engendre à son tour l'élévation du niveau de la mer. En plus de la pression démographique ; les pratiques culturelles et pastorales, les changements climatiques mettent les pays maghrébins (Algérie, Maroc et Tunisie) en situation hydrique inquiétante manifestée par : 1) la sécheresse qui accentue le phénomène de la désertification, 2) accentuation de la salinité du sol et l'abaissement des niveaux piézométriques des nappes phréatiques. Tout ça incite les pays maghrébins d'étoffer la stratégie de la mobilisation accrue des moyens non conventionnels, tels que le dessalement des eaux marines et des eaux saumâtres.

Le bassin d'Essaouira n'a pas été épargné par l'effet du changement climatique. Cet effet se manifeste par : i) une tendance à la hausse des températures avec un réchauffement de l'ordre de 2°C et une tendance généralisée à la baisse des précipitations de 20%. ii) une dépression du niveau piézométrique pendant les années sèches et une modeste remonté au cours des années pluvieuses, avec une tendance générale à la baisse. iii) une dégradation de la qualité des eaux en s'éloignant de l'oued Ksob (source d'alimentation de l'aquifère).

La complémentarité des approches hydro-climatiques ; hydrodynamique ; hydro-chimiques et isotopiques peut aboutir au diagnostic de l'état de vulnérabilité des aquifères du bassin d'Essaouira face aux changements climatiques. Cependant, la mise au point d'une stratégie d'exploitation rationnelle pourrait donc permettre de valoriser ses eaux tout en sauvegardant ses potentialités à long terme. Ainsi que le recours à des ressources non conventionnelles tels que les eaux de mer dessalées pour l'alimentation en eau potable ou les eaux usées épurées pour l'agriculture doivent être considérées actuellement comme une priorité afin d'éviter de déclencher des situations de pénurie d'eau.

REFERENCES

BABQIQI A. (2014). Changements Climatiques au Maroc : Etude du cas de la Région de Marrakech Tensift Al Haouz et implications sur l'agriculture à l'horizon 2030. *Thèse de doctorat, Université cadí Ayyad, Maroc, 143 pp*

- BAHIR M. (2007). Isotopes et ressources en eaux en zones-arides et semi-arides : exemple du bassin d'Essaouira, 175 pp.
- BAHIR M, MENNANI A, JALAL M, YOUNI N., (2000), Contribution à l'étude des ressources hydriques du bassin synclinal d'Essaouira (Maroc). *Estudios Geologicos*, 56: 185-195.
- BAHIR M., EL MOUKHYAR R., CHAMCHATI H., CHKIR N. (2013). Using geochemical indicators and isotopic to investigate groundwater: The case of the Essaouira aquifers system (Mogador, Morocco). *Proceedings of 2013 International Conference on Advances and Challenges in Porous Media Sousse. Tunisia*. 26-28 April. 2013: 112-121.
- BATES, B. C., Z. W. KUNDZEWICZ, S. WU ET J. P. PALUTIKOF., (2008). Le changement climatique et l'eau. *Document technique VI du GIEC*. Genève. 236 pp.
- CLARK I. et P. FRITZ (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York, USA.
- CRAIG H. (1961). Standards for reporting concentration of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Science*. 133 : 1833-1834.
- DRIOUECH F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse. 163 pp.
- DRIOUECH F., BEN RACHED S. AND EL HAIRECH T. (2013). Climate Variability and Change in North African Countries, (Mannava V.K. Sivakumar, Rattan Lal, R. Selvaraju, I. Hamdan, Eds.). Springer, 161-172. doi: 10.1007/978-94-007-6751-5_9.
- DUFFAUD F., BRUN L. ET PLANCHOT B. (1966). Bassin du sud-ouest marocain. In : Reyre (ed), bassin sédimentaire du littoral africain. *Ass.Serv. Géol.Africain*. 1er partie, Paris, P.5.
- FONTES J.C. (1976). Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse Doct. d'État, Univ. Paris VI, 208 p.
- JALAL M., BAHIR M., MENNANI A. (2001). Pollution nitrée des eaux souterraines du bassin synclinal d'Essaouira (Maroc) (Nitrate in groundwater of the Essaouira Synclinal Basin, Morocco). *Journal of environmental hydrology*. Vol. 9 : 1-10.
- G.I.E.C. (2013). Changements climatiques 2013 les éléments scientifiques- résumé à l'intention des décideurs : 1-34. www.climatechange2013.org.
- MAZOR E. (1991). Applied chemical and isotopic groundwater hydrology. *Open University Press*, Buckingham, 282pp.
- NOUACEUR Z. LAIGNEL B., TURKI I. (2013). Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien. *Physio-géo* vol 7 : 307-323.
- SEBBAR A. BADRI W., FOUGRACH H., HSAINE M., SALOUI A. (2011). Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse* vol. 22, n°3 : 139-148. doi: 10.1684/sec.2011.0313.

- SINAN M., BOUSSETTA M., EL RHERARI A. (2009). Changements climatiques : causes et conséquences sur le climat et les ressources en eau. *Revue HTE*, 142 : 21-30.
- STOUR L. & AGOUMI A. (2009). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécol. Appl.* Tome 16 : 215–232. doi: 10.1051/hydro/2009003.
- TAMERS M.A. (1967). Radiocarbon ages of groundwater in an arid zone unconfined aquifer. Dans : *Isotope Techniques in the Hydrological Cycle. Papers presented at a symposium at the University of Illinois, 10-12 novembre, Stout G.E. (Éditeur). Geophys. Monogr. Ser., 11, 143-152.*
- UNESCO. (2010). Changement climatique enjeux et perspectives au Maghreb. *Geb-environnement*, 258 pp.