Document généré le 2 fév. 2025 12:37

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Impact du changement climatique sur la ressource en eau en milieu semi-aride : exemple du bassin d'Essaouira (Maroc)

Climate change impact on water resource in semi-arid environment: example of Essaouira basin (Morocco)

Salah Ouhamdouch, Mohammed Bahir et Paulà Maria Carreira

Volume 31, numéro 1, 2018

Reçu le 24 janvier 2017, accepté le 24 août 2017

URI : https://id.erudit.org/iderudit/1047050ar
DOI : https://doi.org/10.7202/1047050ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Ouhamdouch, S., Bahir, M. & Carreira, P. M. (2018). Impact du changement climatique sur la ressource en eau en milieu semi-aride : exemple du bassin d'Essaouira (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *31*(1), 13–27. https://doi.org/10.7202/1047050ar

Résumé de l'article

Comme les bassins des zones arides et semi-arides, le bassin d'Essaouira est susceptible d'être à haut risque de pénurie d'eau en raison du changement climatique. Le bassin d'Essaouira qui fait l'objet de cette étude est situé sur la façade atlantique du Maroc au sud-est de la ville d'Essaouira. Il se caractérise par un climat semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 300 mm et des températures moyennes de 20 °C. Vu l'importance de ce bassin dans l'approvisionnement en eau de la ville d'Essaouira et des agglomérations avoisinantes, cet article tente d'étudier l'effet du changement climatique sur la ressource en eau dans cette zone. Une série de cartes piézométriques ont été réalisées (1990-2016). L'étude hydrochimique montre que celles-ci présentent un faciès de type Na-Cl en 1990, 1995 et 2009 et de type Mg-Ca-Cl en 2015. Cette évolution est due aux précipitations exceptionnelles de 2015 ayant déclenché le processus d'échange de bases. Des clichés isotopiques (^{18}O, ^{2}H, ^{3}H, ^{14}C) ont été réalisés lors des campagnes de 1996, 2006 et 2007. La droite météorique locale proche de la droite météorique mondiale caractérisant les précipitations d'origine océanique a été déterminée. Les résultats de ce travail montrent : *i*) l'existence d'une dépression du niveau piézométrique pendant les années sèches (ex. 1995) et une modeste remontée au cours des années pluvieuses (ex. 2004 et 2009), *ii*) une dégradation de la qualité des eaux en s'éloignant de l'oued Ksob (source d'alimentation de l'aquifère) et *iii*) la recharge de l'aquifère dépend des précipitations.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau,

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU EN MILIEU SEMI-ARIDE : EXEMPLE DU BASSIN D'ESSAOUIRA (MAROC)

Climate change impact on water resource in semi-arid environment: example of Essaouira basin (Morocco)

Salah OUHAMDOUCH[1], Mohammed BAHIR[1], Paulà Maria CARREIRA[2]*

[1]Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE), Département de Géologie, École Normale Supérieure-Marrakech, Université Cadi Ayyad, route d'Essaouira, Marrakech, 40000, Maroc
[2]Campus Technologique et Nucléaire, Institut Supérieur Technique, Université Technique de Lisbonne, autoroute Nationale N°10, km 139,7 2695-066 Bobadela LRS, Portugal

Reçu le 24 janvier 2017, accepté le 24 août 2017

RÉSUMÉ

Comme les bassins des zones arides et semi-arides, le bassin d'Essaouira est susceptible d'être à haut risque de pénurie d'eau en raison du changement climatique. Le bassin d'Essaouira qui fait l'objet de cette étude est situé sur la façade atlantique du Maroc au sud-est de la ville d'Essaouira. Il se caractérise par un climat semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 300 mm et des températures moyennes de 20 °C. Vu l'importance de ce bassin dans l'approvisionnement en eau de la ville d'Essaouira et des agglomérations avoisinantes, cet article tente d'étudier l'effet du changement climatique sur la ressource en eau dans cette zone. Une série de cartes piézométriques ont été réalisées (1990-2016). L'étude hydrochimique montre que celles-ci présentent un faciès de type Na-Cl en 1990, 1995 et 2009 et de type Mg-Ca-Cl en 2015. Cette évolution est due aux précipitations exceptionnelles de 2015 ayant déclenché le processus d'échange de bases. Des clichés isotopiques (^{18}O, ^{2}H, ^{3}H, ^{14}C) ont été réalisés lors des campagnes de 1996, 2006 et 2007. La droite météorique locale proche de la droite météorique mondiale caractérisant les précipitations d'origine océanique a été déterminée. Les résultats de ce travail montrent : *i*) l'existence d'une dépression du niveau piézométrique pendant les années sèches (ex. 1995) et une modeste remontée au cours des années pluvieuses (ex. 2004 et 2009), *ii*) une dégradation de la qualité des eaux en s'éloignant de l'oued Ksob (source d'alimentation de l'aquifère) et *iii*) la recharge de l'aquifère dépend des précipitations.

Mots-clés : aquifère, bassin d'Essaouira, changement climatique, hydrochimie, isotopes, piézométrie, réchauffement, semi-aride, ressource en eau.

ABSTRACT

As is the case for basins of arid and semi-arid zones, the Essaouira Basin is likely to be at high risk of water scarcity due to climate change. The Essaouira Basin, which is the subject

*Auteur pour correspondance :
Téléphone : +212 633 250 052
Courriel : salah.ouhamdouch@edu.uca.ma

of this study, is located on the Atlantic coast of Morocco, southeast of the city of Essaouira. It is characterized by a semi-arid climate with annual rainfall of around 300 mm and average temperatures of 20°C. Looking at the importance of this basin for the groundwater supply of the Essaouira City and neighbouring clusters, this article considers the potential effect of climate change on water resources in this area. A series of piezometric maps was prepared (1990-2016) and the hydrochemical study of the water shows that they have a Na-Cl type facies in 1990, 1995 and 2009 and Mg-Ca-Cl type in 2015. This evolution is the result of cation exchange following the exceptional precipitation of 2015. The isotopes ^{18}O, ^{2}H, ^{3}H and ^{14}C were analyzed during the campaigns of 1996, 2006 and 2007. The local meteoric water line close to the global meteoric water line characterizing precipitation of oceanic origin was determined. The results of this work show: *i*) the existence of a depression in the piezometric level during dry years (e.g. 1995) and a modest recovery during wet years (e.g. 2004 and 2009), *ii*) a deterioration of the water quality away from the Wadi Ksob (recharge zone of the aquifer), and *iii*) that the recharge the aquifer depends on rainfall.

Key words: aquifer, climate change, Essaouira basin, hydrochemistry, isotopes, piezometry, semi-arid, water resources.

1. INTRODUCTION

Depuis les années 1950, le climat terrestre a connu des changements représentés, essentiellement par le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, en étroite relation avec l'activité humaine (GIEC, 2013). Parmi les conséquences de ces changements on note pour de nombreux pays : 1) une augmentation de la température, 2) une diminution des précipitations et de la masse des calottes glaciaires, 3) une élévation du niveau de la mer et 4) une raréfaction des ressources en eau. 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 en eau. Au Maroc, le bassin d'Essaouira, qui fait l'objet de cette étude, est affecté depuis plusieurs années se traduisant par la raréfaction de la ressource en eau, l'augmentation de la salinité suite à l'invasion des eaux de mer et l'accentuation de la salinité du sol, dégradant ainsi la qualité de la source en eau.

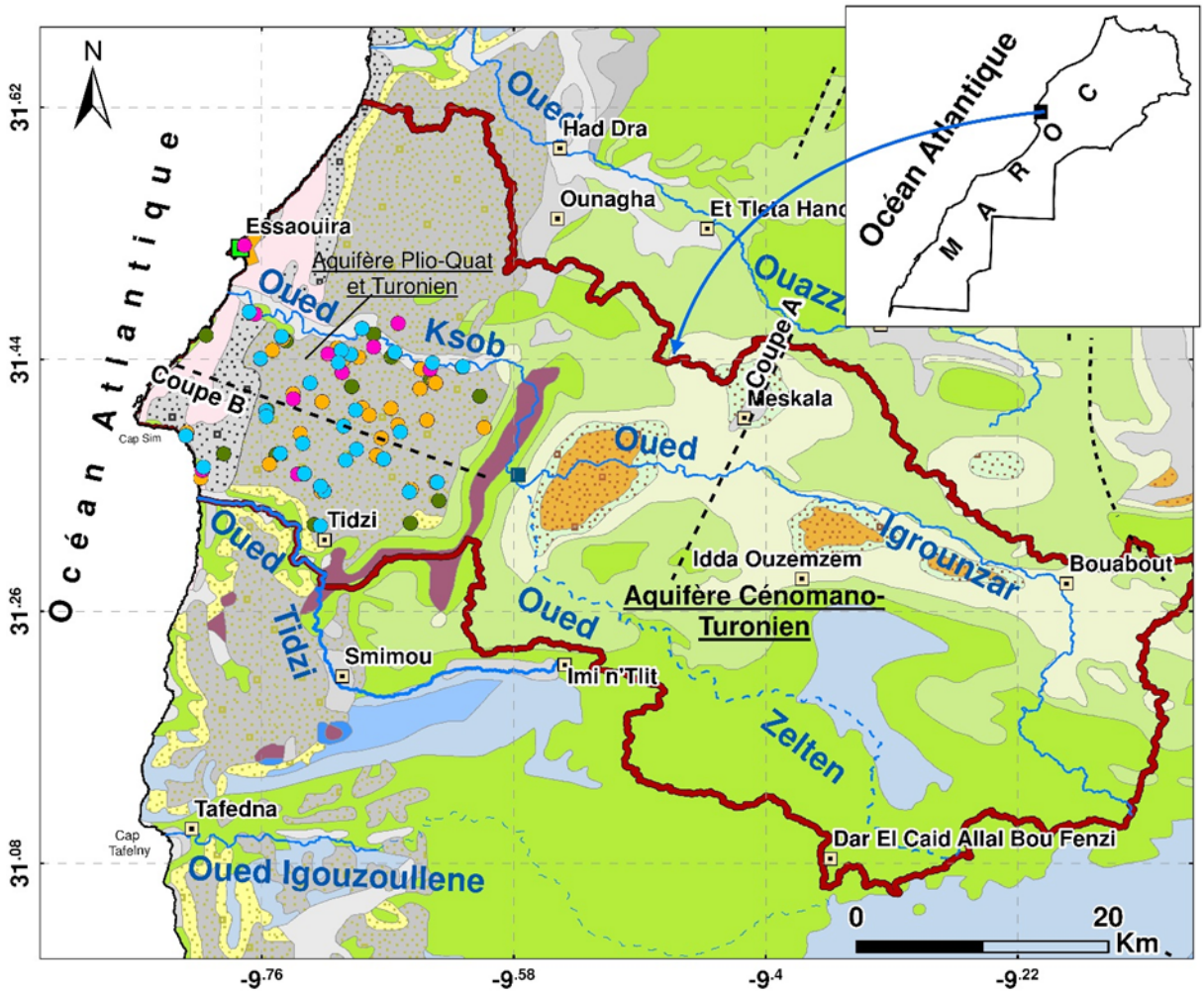
Dans son rapport de septembre 2013, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) affirme que le réchauffement climatique du globe est sans équivoque, ajoutant que l'influence humaine est la cause principale de ce réchauffement. Parmi les résultats de ce réchauffement, on note ceux obtenus pour les facteurs climatiques : 1) la tendance à la hausse de la température moyenne du globe (0,85 °C), 2) l'augmentation des précipitations dans les régions continentales de moyenne latitude de l'hémisphère Nord et dans l'est de l'Amérique du Sud . Par contre, une diminution a été enregistrée au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud (GIEC, 2013).

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; NOUACEUR *et al.*, 2013), accompagnée d'une hausse de température. Selon UNESCO (2010), les lames d'eaux de surface écoulées annuelles moyennes pour la période de 1976 à 2002 sont de 28 % à 36 % plus faibles 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 en Tunisie durant le 20^{e} siècle a été marqué par l'alternance de périodes sèches et de périodes humides. Quant aux températures, une tendance à la hausse de plus d'un degré depuis les années soixante a été observée. 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 mètres cubes, soit une moyenne de 700 $m^3 \cdot a^{-1}$ par habitant, ce qui correspond à une situation de stress hydrique assez élevé. Le nombre d'années en déficit pluviométrique est plus important que le nombre des années excédentaires (DRIOUECH, 2010; DRIOUECH *et al.*, 2013; SEBBAR *et al.*, 2011; STOUR et 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 à 2,5 °C selon les régions).

2. DESCRIPTION DU SITE

2.1 Localisation géographique

Le bassin d'Essaouira est situé sur la façade atlantique du Maroc, à l'extrémité occidentale de la chaîne haute Atlasique. Ce bassin occupe une superficie de 1 827 km^2. Il comprend plusieurs systèmes aquifères dont les structures et les ressources sont souvent mal connues. Les plus importants de ces systèmes aquifères appartiennent à deux unités synclinales : l'unité de Bouabout située dans la partie est du bassin et l'unité synclinale d'Essaouira qui représente la partie ouest du bassin. Ces deux unités sont séparées par le diapir de Tidzi (Figure 1).



Légende :

Géologie

- Echant. 1990
- Echant. 1995
- Echant. 2009
- Echant. 2015
- Ville
- Village
- Barrage Zerrar
- Oued
- Faille
- Zone d'étude

Quaternaire
- Alluvions
- Barkhanes
- Dunes consolidées (q2)
- Dunes consolidées(q2M)
- Facies lacustre ou palustre
- Conglomérats
- Conglomérats et dunes
- Colluvions

Paléogène
- Marnes phosphatées

Crétacé
- Calcaires dolomitiques
- Calcaires dolomitiques phosphatés
- Calcaires lumachelliques et marnes
- Calcaires dolomitiques

Jurassique
- Calcaires dolomitiques
- Calcaires, argiles rouges, dolomites
- Dolomies

Trias
- Argiles rouges salifères

Figure 1. **Situation géographique et carte géologique de la zone d'étude.**
Location and geological map of the study area.

2.2 Cadre géologique et structural

Au niveau du bassin d'Essaouira, les formations du Trias et du Jurassique n'ont que des affleurements très réduits et localisés au cœur d'anticlinaux (Jbel Hadid au nord-ouest, Jbel Amsitène au sud-ouest et diapir de Tidzi), alors que les formations du Tertiaire et du Quaternaire se rencontrent dans les cuvettes synclinales (Figure 1). La formation du Trias est constituée d'argiles rouges salifères, de basaltes doléritiques et de pélites gréseuses. La formation du Jurassique est composée d'une alternance de dépôts carbonatés (calcaires et dolomites) et marneux riches en évaporites (gypses et anhydrites). Les formations du Crétacé et du Quaternaire sont présentées dans la coupe stratigraphique synthétique (Figure 2) (DUFFAUD *et al.*, 1966). D'après celle-ci, le Crétacé inférieur est formé de calcaires et marnes alternant avec quelques niveaux gréseux de 200 m d'épaisseur moyenne; le Crétacé moyen débute par des dépôts marno-gréseux de l'aptien (60 m), suivis de marnes vertes pyriteuses de l'albien (100 m). Les marnes dominent aussi au cénomanien (200 m), elles sont riches en anhydrites et s'intercalent avec des passées de quelques niveaux calcaires. Ces marnes constituent le mur de l'aquifère turonien calcaro-dolomitique à silex, fracturé, de 60 m d'épaisseur en moyenne. Le Crétacé s'achève par des marnes dolomitiques et des calcaires surmontés de marnes grises gypsifères et siliceuses à intercalations gréseuses du Sénonien qui séparent les deux aquifères turonien et plio-quaternaire de la zone synclinale d'Essaouira (DUFFAUD *et al.*, 1966).

Le bassin d'Essaouira est une vaste zone synclinale ouverte sur l'océan atlantique. Il est affecté par plusieurs plissements et accidents qui permettent l'individualisation de nombreuses cuvettes synclinales telles que *i*) la cuvette synclinale de Bouabout occupant la partie amont du bassin, traversée par l'oued Igrounzar, et *ii*) la cuvette synclinale d'Essaouira (partie aval du bassin), les deux sont séparées par le diapir de Tidzi. La partie amont est caractérisée par un aquifère logé dans les calcaires et les calcaires dolomitiques du cénomano-turonien, la base imperméable et le toit du système sont assurés respectivement par les argiles grises du cénomanien inférieur et les marnes blanches sénoniennes (Figure 3a) (BAHIR *et al.*, 2008; CHAMCHATI et BAHIR, 2013). En aval, les ressources en eau souterraine sont contenues dans deux réservoirs principaux. Le réservoir plio-quaternaire à matrice de grès calcaire marin ou dunaire présente une conductivité hydraulique primaire par porosité et renferme une nappe libre importante. Le deuxième réservoir est représenté par le turonien. Celui-ci 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 (Figure 3b) (BAHIR *et al.*, 2013; BAHIR, 2007; JALAL *et al.*, 2001).

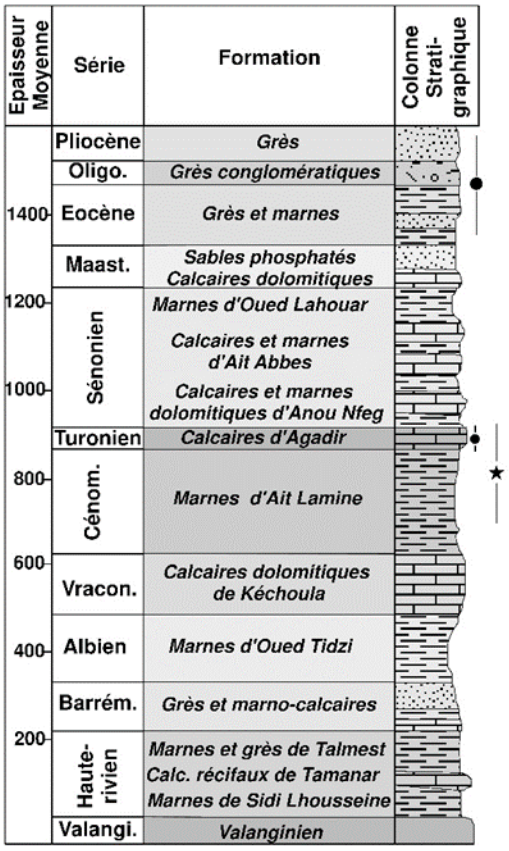


Figure 2. **Coupe stratigraphique synthétique du Crétacé et du Tertiaire de la zone d'étude. Le symbole —●— représente les systèmes aquifères de la partie aval et —★— les systèmes aquifères de la partie amont du bassin d'Essaouira.**
Synthetic stratigraphic cross section of the Cretaceous and Tertiary of the study area. The symbol —●— stands for the downstream aquifer system, and —★— for the upstream aquifer system of the Essaouira basin.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Une série de campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en 1990, 1995, 2000, 2004, 2009, 2015 et 2016 dans le bassin d'Essaouira. La profondeur du niveau d'eau, les conductivités électriques, le pH et les températures ont été mesurés sur le terrain. Les analyses des éléments chimiques ont été effectuées au laboratoire d'hydrogéologie de la faculté des sciences Semlalia de Marrakech. Les anions (Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-) ont été dosés par chromatographie ionique en phase liquide sur un appareil DIONEX relié à un intégrateur électronique, les cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+) par spectrométrie d'absorption atomique sur un appareil VARIAN type 640, et l'alcalinité par pH-metric à l'aide d'une solution d'acide sulfurique.

Sur le plan climatique, l'indice d'aridité de DE MARTONNE (1926) a été calculé selon l'équation 1 :

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

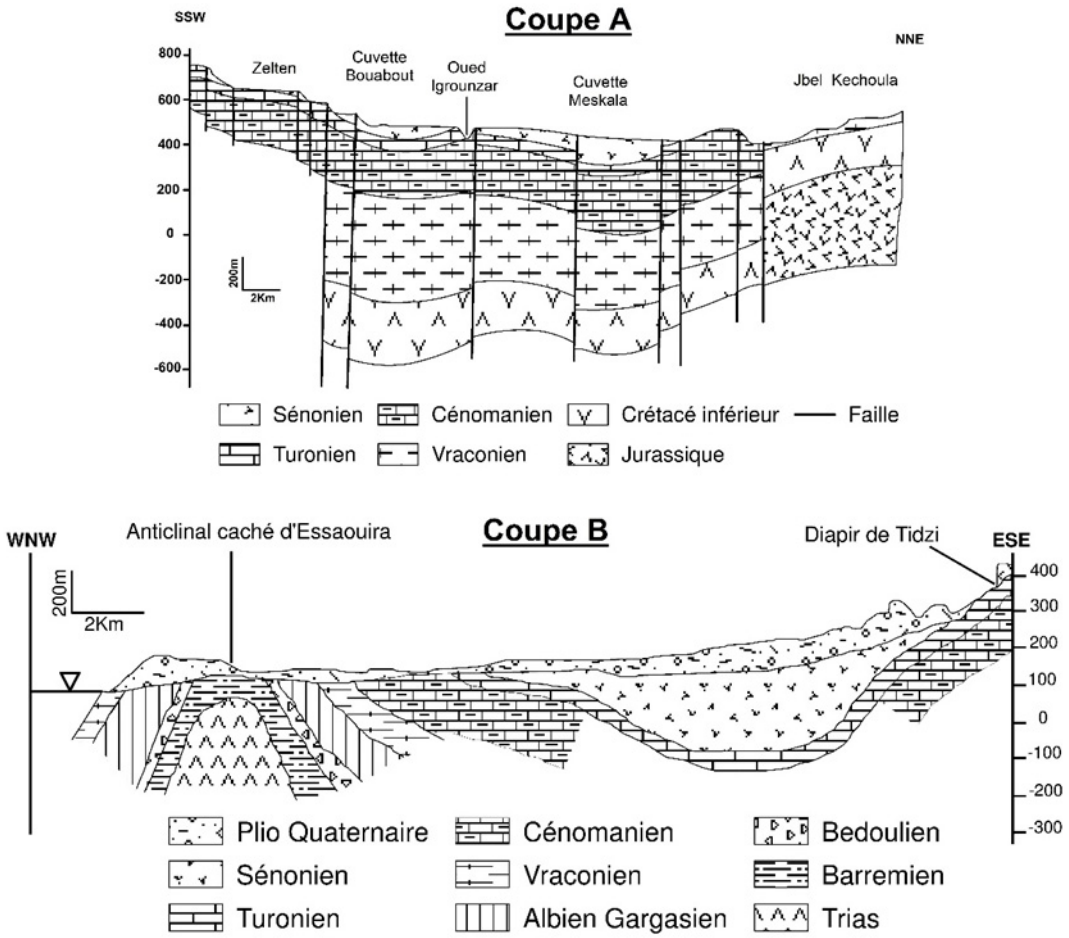


Figure 3. **Coupes géologiques : A) partie amont et B) partie aval de la zone d'étude (localisation *cf.* Figure 1).** ***Geological cross section: A) upstream part and B) downstream part of the study area (location on Figure 1).***

où P correspond à la pluviométrie moyenne annuelle en mm, et T représente la température moyenne annuelle en °C.

Les séries climatologiques ont été examinées pour les tendances et pentes sur une base annuelle en appliquant le test de Mann-Kendall et le test Sen via le logiciel XLSTAT® (version d'essai).

Le test de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) est un test statistique non paramétrique utilisé pour détecter la présence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) au sein d'une série chronologique. Soit la série X_i (x_1, x_2,...x_n), cette méthode définit la normale standard multivariable U_{MK} comme suit (Équation 2) :

$$U_{MK} = \frac{S}{\sqrt{\mathrm{Var}(s)}} \qquad (2)$$

où $S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sgn}(x_j - x_i)$, $\mathrm{Var}(s) = \frac{n(n\text{-}1)(2n+5)}{18}$ et n est le nombre de données de la série.

Dans ce test l'hypothèse nulle H0 « absence de tendance » est acceptée si la valeur p est supérieure au niveau de signification alpha. Le sens de la tendance est défini par le coefficient statistique de Mann-Kendall U_{MK}. Si U_{MK} est positif, la tendance est à la hausse et si U_{MK} est négatif, la tendance est à la baisse.

Les teneurs en oxygène-18 (^{18}O) et deutérium (^{2}H) ont été déterminées par spectrométrie de masse. En utilisant les méthodes proposées par FRIEDMAN (1953) et par EPSTEIN et MAYEDA (1953), chaque échantillon a été analysé trois fois afin d'augmenter la précision. Les valeurs sont exprimées en δ (‰) par rapport au standard international V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water).

Les teneurs en tritium (^{3}H) ont été mesurées par compteur à scintillation liquide suite à un enrichissement par électrolyse des échantillons d'eau (IAEA, 1976; LUCAS et UNTERWEGER, 2000). Ces teneurs s'expriment en unité tritium (UT).

La détermination des teneurs en carbone-13 (^{13}C) et les activités en carbone-14 (^{14}C) ont été effectuées sur le CITD (carbone inorganique total dissous) des eaux souterraines, précipité sur le terrain sous forme de carbone de baryum ($BaCO_3$). Les activités en ^{14}C ont été mesurées en utilisant un compteur à scintillation liquide (PACKARD TRI-CARB 4530). Ces activités s'expriment en pourcentage de carbone moderne (pcm). Les erreurs associées à cette méthode varient avec la quantité du carbone disponible dans chaque échantillon. Elles augmentent lorsque la teneur en ^{14}C est faible. Les valeurs du ^{13}C obtenues dans le CITD par spectrométrie de masse sont exprimées par ‰ à V-PDB (Vienna-PeeDee Betemnite). Les incertitudes analytiques sur les mesures sont de ±0,1 ‰ pour ^{18}O; ±1 ‰ pour ^{2}H; 0,6 UT pour ^{3}H et de 0,1 ‰ pour ^{13}C. Toutes les analyses isotopiques ont été réalisées au sein de l'Institut technologique et nucléaire de Lisbonne au Portugal.

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin d'Essaouira a été approchée par l'étude combinée de l'évolution du niveau piézométrique, des paramètres physicochimiques et par la technique isotopique.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Cadre climatique

Selon l'indice d'aridité de De Martonne (Équation 1), le bassin d'Essaouira est situé dans une zone semi-aride (l'indice varie de 9 à 11,2), caractérisée par des influences océanique (perturbation de l'ouest), continentale et montagnarde. L'aridité est marquée dans le bassin surtout en été, elle est relativement croissante en allant de l'atlantique vers le continent. Cette croissance d'aridité est le résultat de l'éloignement des influences océaniques, où les précipitations diminuent et les écarts thermiques augmentent.

Au niveau de la station Igrounzar, les températures présentent une très importante variation saisonnière. En hiver, les températures minimales peuvent atteindre -11 °C, alors que les maximales sont de l'ordre de 40 °C (période 1986-2004). À partir du diagramme ombrothermique (Figure 4), la saison chaude s'étale du mois de mars jusqu'au mois de novembre, alors que la période humide s'étale de novembre à mars. Les températures montrent une tendance à la hausse avec un réchauffement de l'ordre de 2 °C (période 1986-2004) (Figure 5a). Ceci reste en parfaite cohérence avec la tendance à la hausse au niveau de la température observée à l'échelle globale. Les précipitations varient d'une année à l'autre autour d'une moyenne annuelle de 306 mm (Figure 5b). Pour les séries d'années dépouillées (1940 à 2012), on remarque des années pluvieuses dont la hauteur dépasse largement la moyenne, telles que : 1940-1943, 1946-1947, 1952-1956, 1960-1964, 1982, 1987-1989, 1995-1997, 2005-2006, 2009-2011) et d'autres déficitaires avec la dominance des dernières. L'application du test de tendance de significativité de Mann-Kendall et de correction de la pente de Sen ont montré que la série des précipitations affiche une tendance à la baisse (U_{MK} = -2,65) avec une pente de Sen égale à -1,22. Cependant, les précipitions présentent une irrégularité interannuelle et une tendance générale à la baisse de l'ordre de 12 % depuis le début de la période d'observation.

4.2 Piézométrie

L'évolution de la piézométrie dans le bassin d'Essaouira a été mesurée aussi bien dans sa partie amont (aquifère cénomano-turonien) que dans sa partie aval (aquifère plio-quaternaire).

4.2.1 Nappe cénomano-turonienne

Les campagnes de mesure du niveau piézométrique effectuées de 2006 à 2010 ont permis d'établir les courbes d'évolution du niveau d'eau d'un certain nombre de points d'eau tels que 1126/52 et 1166/52 (Figure 6). La représentation graphique de l'évolution du niveau piézométrique pendant la période 2006-2010 montre une baisse du niveau d'eau en allant du juin 2006 jusqu'en octobre 2008. Par la suite, le niveau d'eau commence à remonter sur une période de huit mois, puis recommence à décliner.

4.2.2 Nappe plio-quaternaire

La figure 7a représente la carte piézométrique type (juin 2015), et 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.

Les campagnes de mesure du niveau piézométrique de la nappe plio-quaternaire durant 1990,1995, 2000, 2004, 2009, 2015 et 2016 ont permis de dresser le graphe de la figure 7b. À partir de celle-ci, une tendance généralisée à la baisse des niveaux piézométriques au sein des points d'eau 3/51; 11/51; 138/51; 149/51; 327/51 est observée, et ce depuis 1990 jusqu'à 2016, confirmant ainsi l'impact du changement climatique sur la ressource. Quant au point 15/51, on observe une remontée due au fait de sa situation dans une dépression topographique drainant les eaux de pluie lors d'averses courtes et intenses qui caractérise un milieu semi-aride.

Cette variation du niveau piézométrique ne peut être expliquée que par l'effet conjugué du changement climatique et de la surexploitation. 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) (BAHIR,

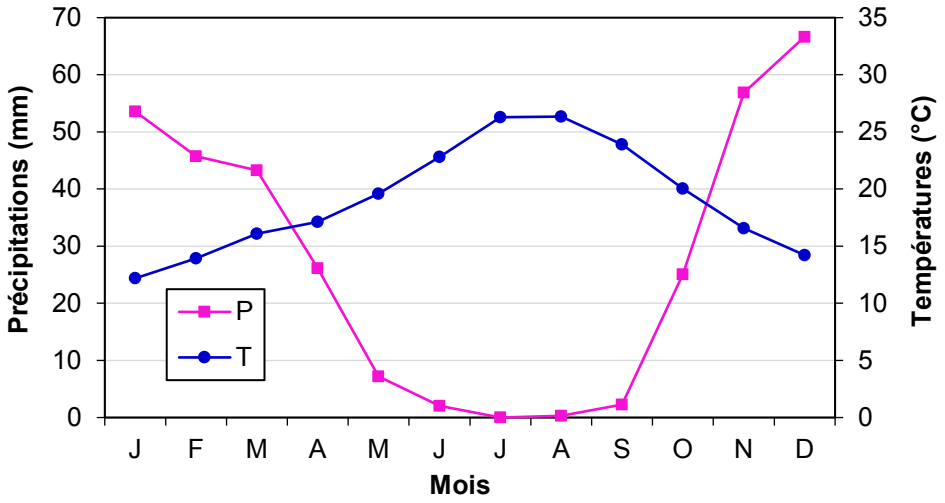


Figure 4. **Diagramme ombrothermique de la station d'Igrounzar (1987-2004).**
Ombrothermic diagram of the Igrounzar station (1987-2004).

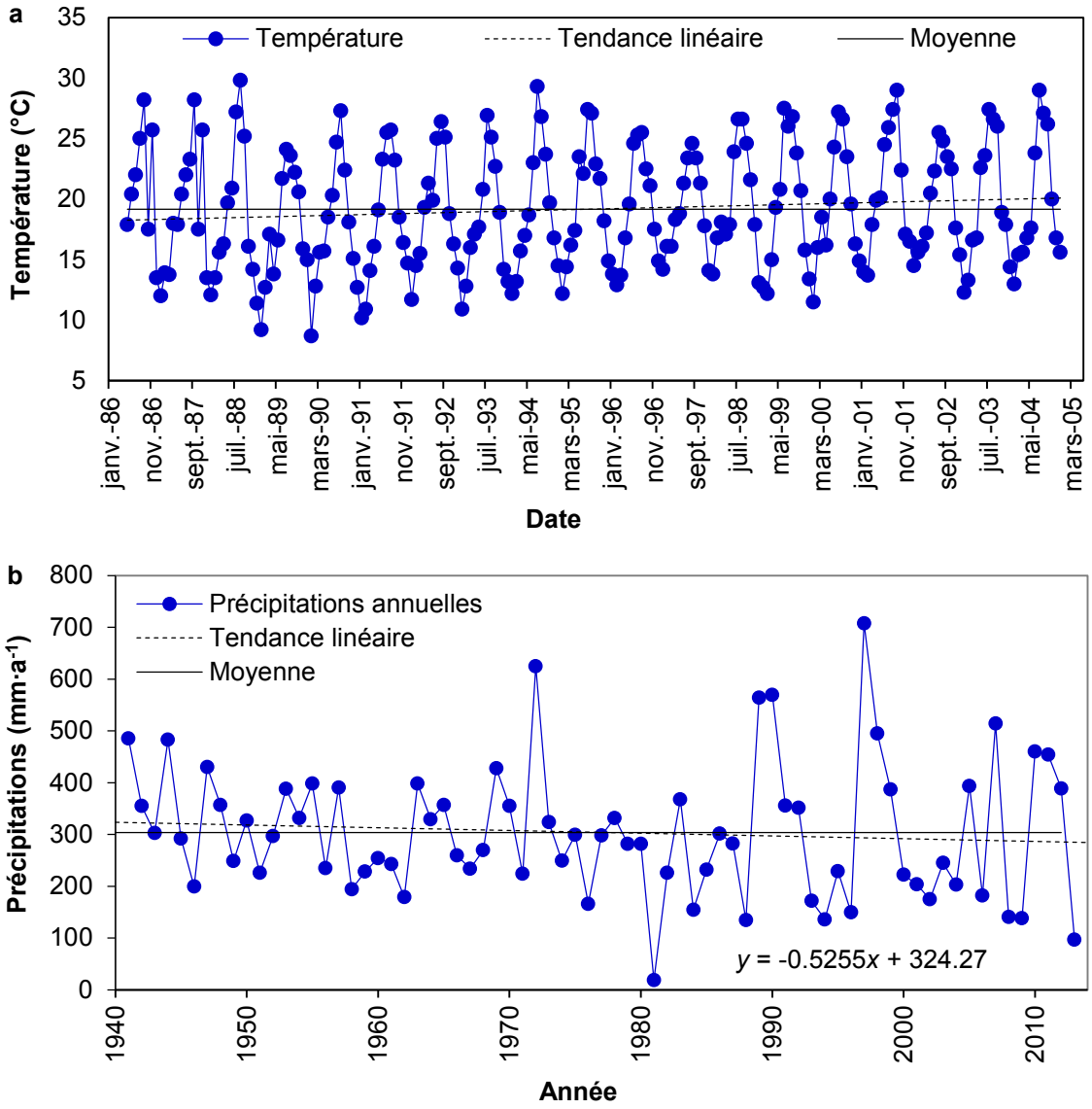


Figure 5. **Variation a) des températures mensuelles et b) des précipitations moyennes annuelles à la station d'Igrounzar.**
Variation in a) monthly temperatures and b) annual rainfall at the Igrounzar station.

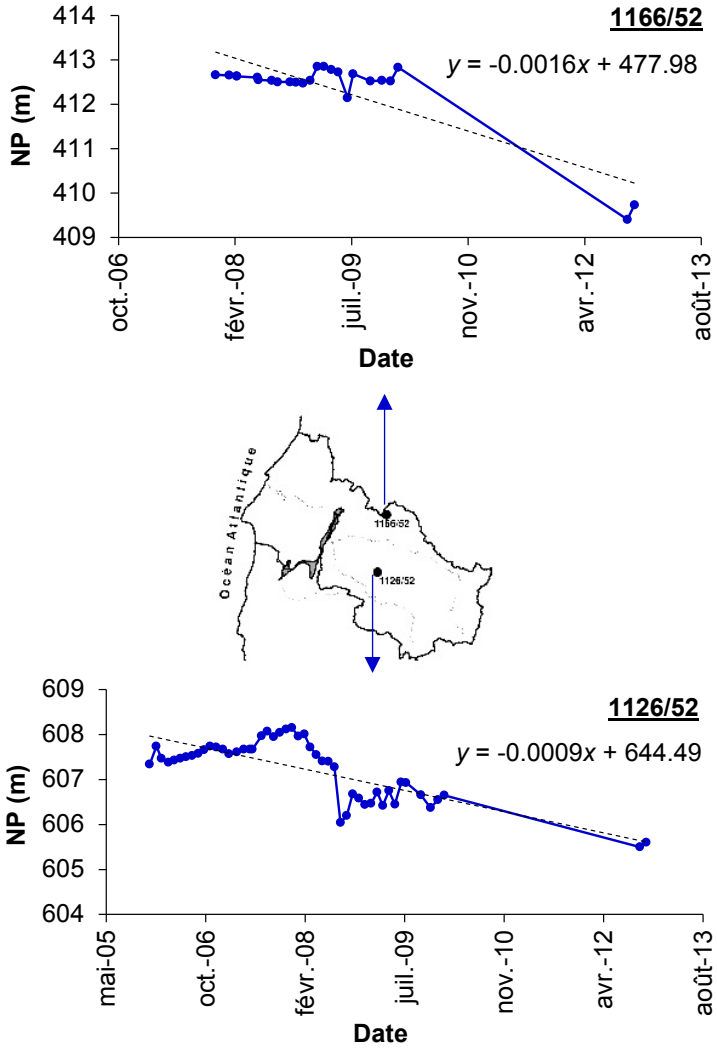


Figure 6. Évolution du niveau piézométrique (NP) dans les puits 1126/52 et 1166/52.
Evolution of the piezometric level in water wells 1126/52 and 1166/52.

2007), 101/51 (depuis 2009) (CHAMCHATI, 2014), M3, M5, M7, 93/51 et 103/51 (depuis 2015).

La cuvette synclinale, renfermant un important aquifère turonien, est la plus sollicitée pour l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Essaouira et des agglomérations avoisinantes.

4.3 Hydrochimie

L'étude de la chimie de l'eau a pour but l'identification de son faciès, sa qualité, ainsi que son aptitude à l'irrigation. Le diagramme de Piper montre que les eaux de la nappe plio-quaternaire forment une seule et même famille qui se caractérise par le facies de type Na-Cl en 1990,1995 et en 2009 (MENNANI, 2001; CHAMCHATI et BAHIR, 2011). Or, en 2015, un facies mixte de types Mg-Cl dominant et Ca-Cl est observé (Figure 8). Cette évolution du faciès est le résultat du phénomène d'échange de base (dilution) suite à l'infiltration des précipitations exceptionnelles qu'a connu cette zone au cours du début du cycle pluvieux de 2015. La qualité des eaux varie, en fonction des précipitations. En se basant sur la conductivité électrique et les teneurs en chlorures, cette qualité est très médiocre durant le cycle sec de 1995, mais présente 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'infiltration d'eau de surface, constituée par l'oued Ksob, et un séjour de plus en plus long de ces eaux. (Tableau 1, figures 9 et 10). La dégradation de la qualité de la ressource est due au déficit pluviométrique causé par les changements climatiques et l'activité anthropique.

4.4 Isotopie

Dans le bassin d'Essaouira, le fonctionnement hydrodynamique est fortement influencé par la structure (plis et failles) qui conditionne les écoulements (BAHIR, 2007). En application dans la zone d'étude, les isotopes de la molécule d'eau, l'oxygène-18 (^{18}O), le deutérium (^{2}H) et le tritium (^{3}H), et le carbone-14 (^{14}C) peuvent procurer des éléments de réponse dans la délimitation des aires et des conditions de recharge des aquifères ainsi que leurs relations et leur âge. Les teneurs isotopiques en ^{18}O et ^{2}H des eaux plio-quaternaires sont comprises respectivement entre -3,47 et -4,56 et entre -26,2 et -19 δ ‰ *vs* V-SMOW. Celles des eaux de la nappe turonienne sont comprises entre -4,17 et -4,56 et entre -26,8 et -21,4 δ ‰ *vs* V-SMOW.

La droite de corrélation ^{2}H-^{18}O (Figure 11) d'équation $\delta^{2}H = 7,72 \times \delta^{18}O + 10,53$ ($r^2 = 0,82$) est proche de la droite des eaux météorique mondiale (DMM) de pente 8 avec un excès en ^{2}H voisin de 10 (CRAIG, 1961). Elle caractérise les précipitations d'origine océanique et l'équation de cette droite a été calculée sans tenir compte des points d'eau 390/51, 272/51, 260/51, M42 et oued Ksob identifiés comme évaporés parce qu'ils s'inscrivent au-dessous de la DMM. Le point 272/51 marqué par l'évaporation à l'aquifère plio-quaternaire se trouve au voisinage immédiat de l'oued, ce qui confirme l'alimentation de la nappe par l'oued Ksob déjà mise en évidence dans le quart nord-est du secteur par la piézométrie et la minéralisation plus faible de l'aquifère. La position du point 390/51 captant la nappe turonienne sur le diagramme ^{2}H-^{18}O indique en complément une eau évaporée. Les autres points d'eau analysés s'alignent sur la droite météorique, ce qui laisse apparaitre que l'alimentation des eaux de l'aquifère, notamment celle de l'aquifère turonien s'effectue rapidement sans évaporation notable.

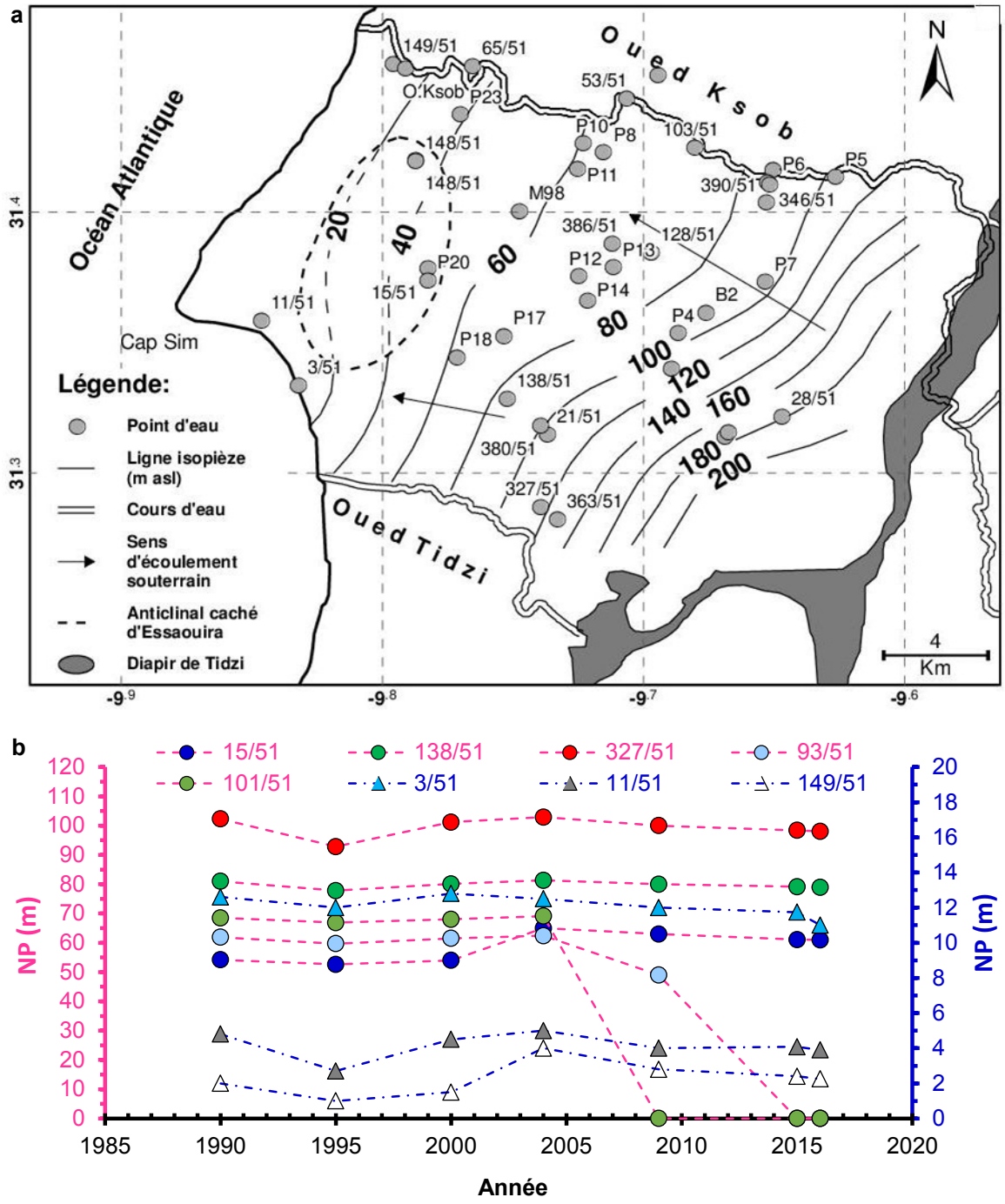


Figure 7. **a) Carte piézométrique type et b) évolution du niveau piézométrique (NP) de la nappe plio-quaternaire en fonction du temps.**
a) Piezometric map type and b) evolution of groundwater level of the Plio-Quaternary aquifer with time.

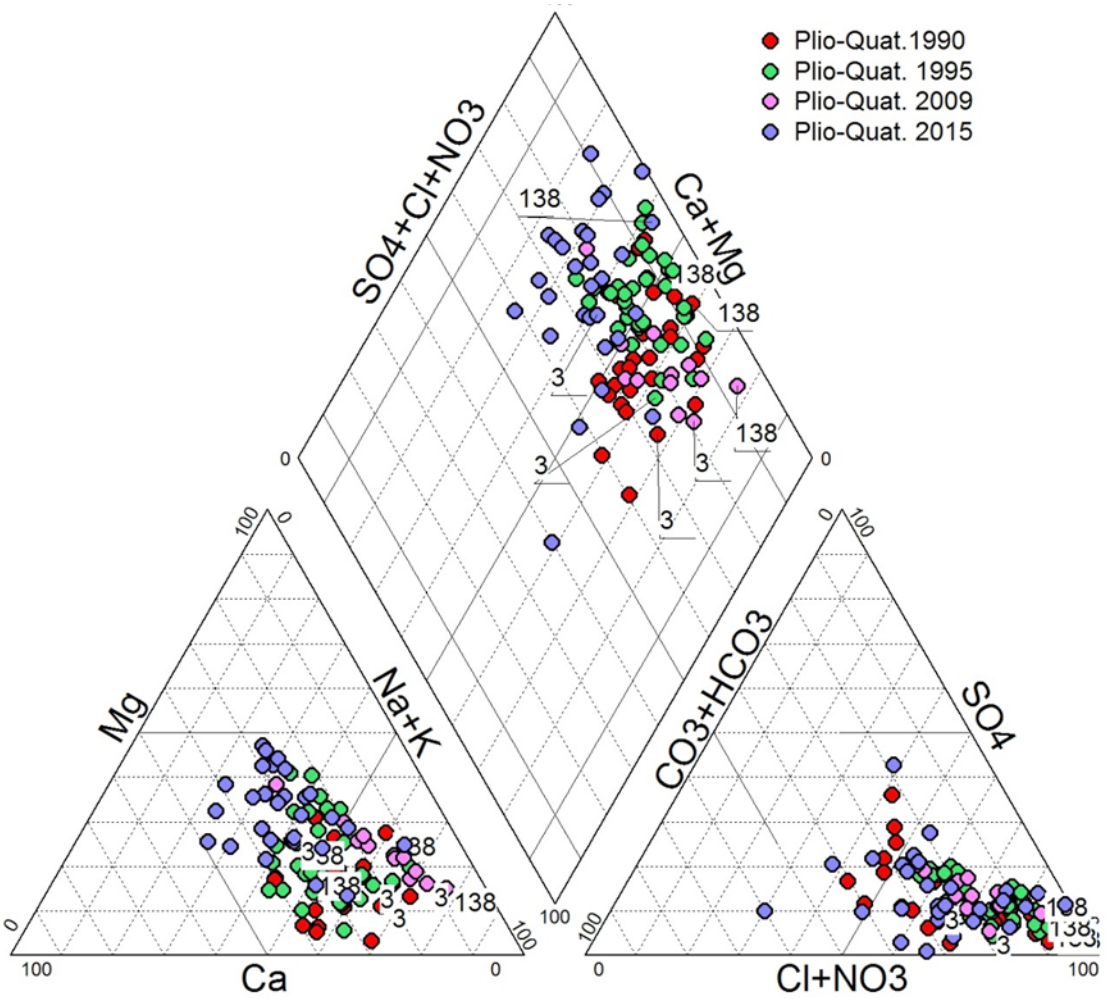


Figure 8. **Faciès chimique des eaux de la nappe plio-quaternaire en 1990, 1995, 2009 et 2015.**
Chemical facies of the Plio-Quaternary aquifer waters in 1990, 1995, 2009, and 2015.

Tableau 1. **Grille simplifiée indiquant la qualité des eaux souterraines au Maroc (source : http://www.water.gov.ma [consultation le 15 janvier 2016]).**
Table 1 ***Simplified groundwater quality in Morocco (source: http://www.water.gov.ma [consulted 15 January 2016]).***

Paramètre de qualité	Conductivité électrique ($\mu s \cdot cm^{-1}$)	Cl^- ($mg \cdot L^{-1}$)
Excellente	<400	<200
Bonne	400-1 300	200-300
Moyenne	1 300-2 700	300-750
Mauvaise	2 700-3 000	750-1 000
Très mauvaise	>3 000	>1 000

Le tritium est un élément radioactif qui entre dans le cycle de l'eau par les précipitations. Sa présence dans les eaux souterraines avec des concentrations supérieures à une unité tritium (UT) signifie une recharge actuelle. Par contre, les eaux ayant des teneurs inférieures à 1 UT sont considérées anciennes avec un âge pré-1952, date des premiers essais nucléaires (MAZOR, 1991; FARID *et al.*, 2013). Un total de 18 échantillons d'eau des aquifères plio-quaternaire et turonien prélevés en 2006 ont été sélectionnés pour le dosage du ^3H (Tableau 2). Les teneurs en ^3H ont varié d'une valeur minimale inférieure à 1 UT et une valeur maximale de 4,4 UT. Les échantillons 11/51, 21/51, 27/51, 148/51, 346/51 et 386/51 dont les teneurs en ^3H sont supérieures à 1 UT sont considérés comme étant des eaux récentes. Alors que les eaux anciennes sont détectées dans le reste des points d'eau tels que 149/51, M98, 15/51, 363/51, 93/51 et M24.

Pour estimer les activités initiales du ^{14}C de ces eaux souterraines, plusieurs modèles ont été testés (Tableau 3). Ces modèles peuvent tenir compte de la dilution chimique du ^{14}C des mélanges isotopiques ou encore des mélanges isotopiques avec échange isotopique. L'analyse du tableau 3 permet de dégager que : les deux points d'eau 65/51 et 386/51 présentent des pourcentages en ^{14}C supérieurs à 85 %, ce qui les rend actuels. Le puits 65/51 situé à proximité de l'oued Ksob, capte les eaux de l'aquifère turonien et approvisionne la ville

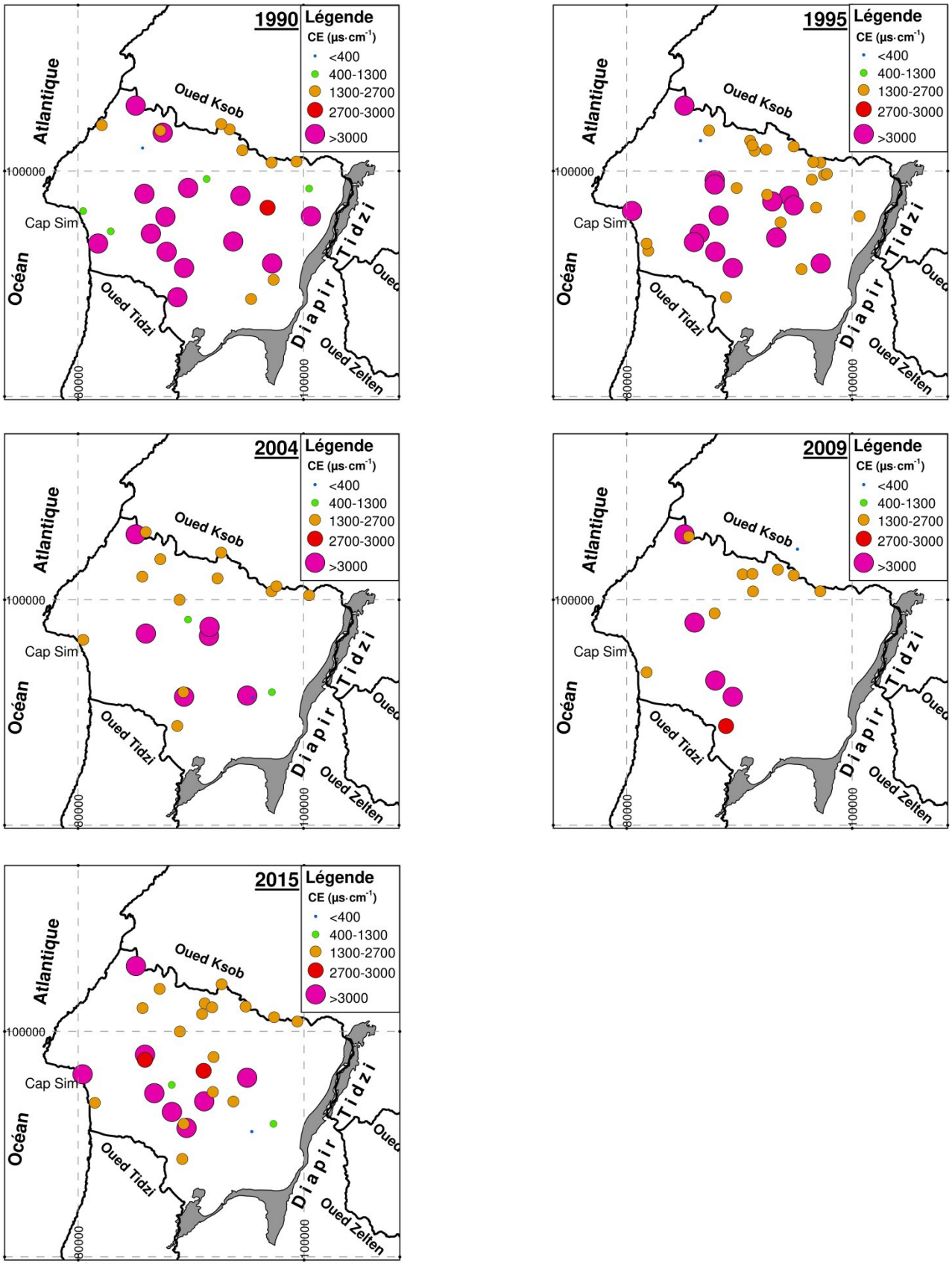


Figure 9. **Distribution spatiotemporelle des conductivités électriques (CE) des eaux de l'aquifère plio-quaternaire (1990-2015).**
Spatio-temporal distribution of electrical conductivities of the Plio-Quaternary aquifer waters (1990-2015).

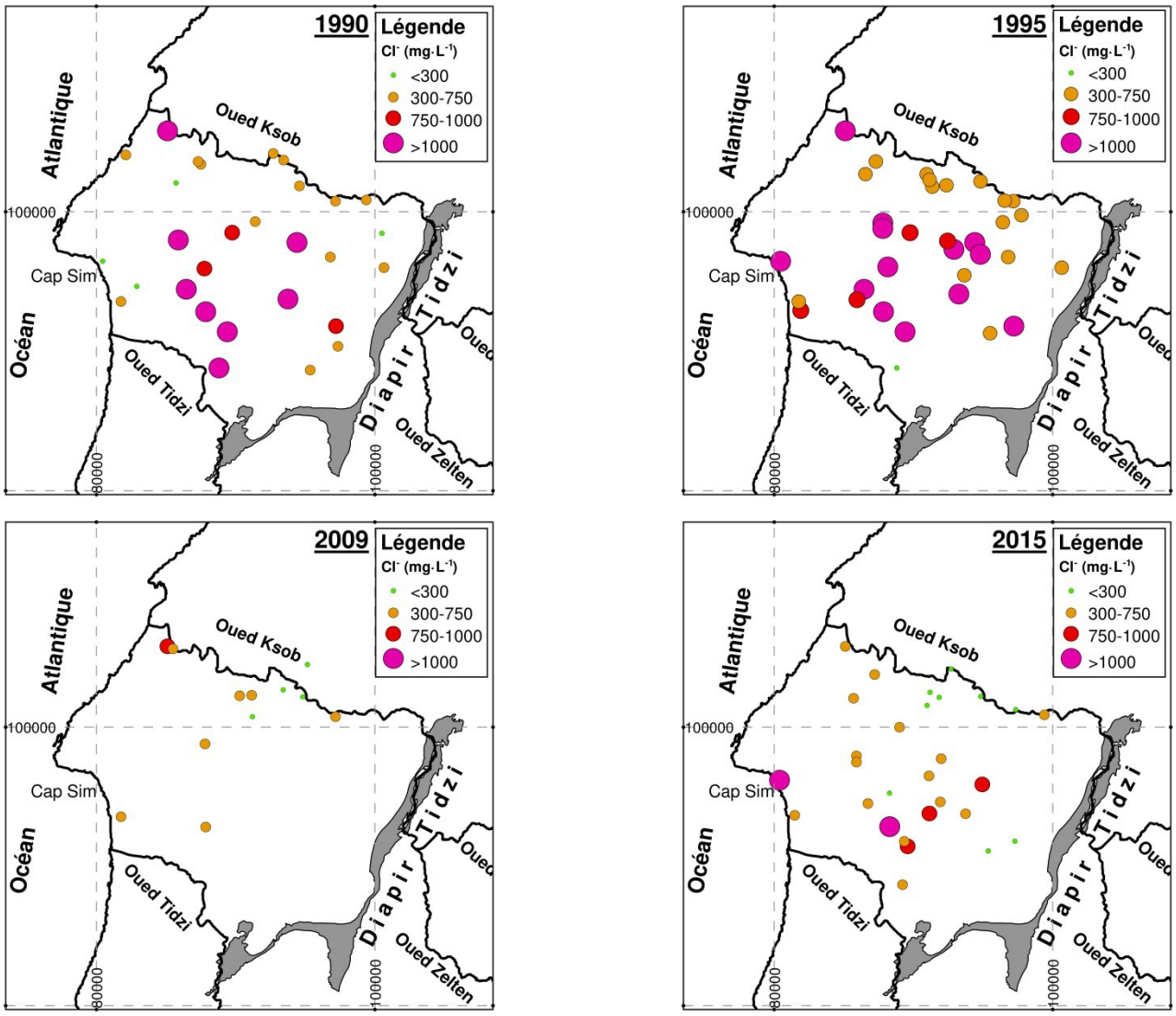


Figure 10. **Distribution spatiotemporelle des concentrations en chlorures des eaux de l'aquifère plio-quaternaire (1990-2015).**
Spatio-temporal distribution of chloride concentrations in the Plio-Quaternary aquifer waters (1990-2015).

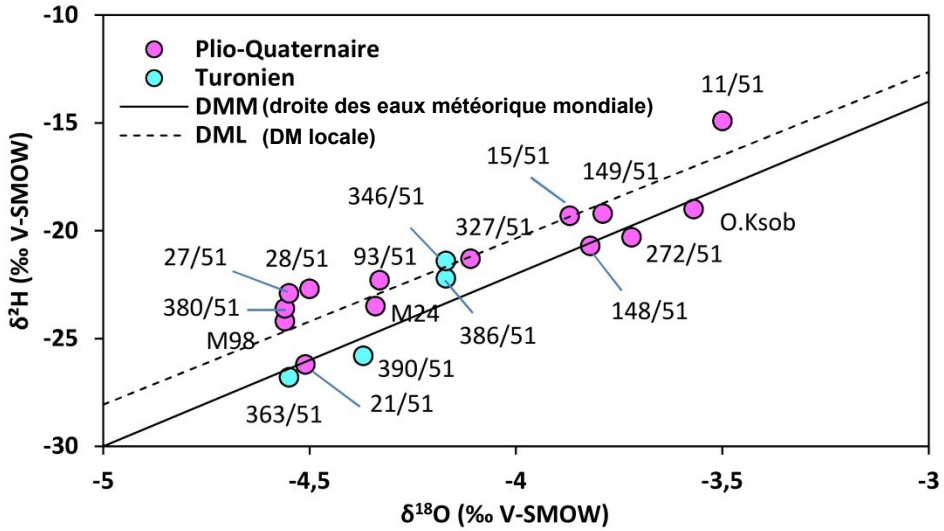


Figure 11. **Corrélation ^{2}H-^{18}O dans les eaux souterraines de la zone synclinale d'Essaouira (2006).**
Correlation of ^{2}H-^{18}O in the groundwater of the synclinal area of Essaouira (2006).

Tableau 2. Composition isotopique des eaux de la cuvette synclinale d'Essaouira (campagne 2006) avec plio-quaternaire (PQ) et turonien (T) (localisation *cf.* Figure 7a).

Table 2 ***Isotopic composition of groundwater samples in the synclinal bowl of Essaouira (2006 campaign) with Plio-Quaternary (PQ) and Turonian (T) (location on Figure 7a).***

Échantillon	*X* (m)	*Y* (m)	*Z* (m)	$\delta^{18}O$ (‰ V-SMOW)[a]	$\delta^{2}H$ (‰ V-SMOW)	^{3}H (UT)[b]	Aquifère
149/51	85 100	105 800	40	-3,79	-19,2	3,8	PQ
386/51	92 000	98 650	105	-4,17	-22,2	2	T
M98	89 000	100 000	125	-4,56	-24,2	4,4	PQ
15/51	86 000	97 000	70	-3,87	-19,3	3,2	PQ
11/51	80 450	96 450	8	-3,5	-14,9	2,8	PQ
21/51	89 400	91 400	89,6	-4,51	-26,2	<2	PQ
380/51	89 350	91 800	135	-4,56	-23,6	2,7	PQ
363/51	89 750	88 200	150	-4,55	-26,8	2,1	T
327/51	88 800	88 800	130	-4,11	-21,3	4,2	PQ
27/51	95 500	91 300	208	-4,55	-22,9	<2	PQ
M24	95 000	91 500	200	-4,34	-23,5	2	PQ
28/51	97 200	91 800	225	-4,5	-22,7	2,6	PQ
148/51	85 700	102 050	60	-3,82	-20,7	3,2	PQ
Oued Ksob	85 500	105 620	22	-3,57	-19	–	–
93/51	923 700	101 900	98	-4,33	-22,3	<2	PQ
390/51	97 000	100 000	105,5	-4,37	-25,8	2	T
272/51	97 170	100 760	105,5	-3,72	-20,3	<2	PQ
346/51	97 270	100 700	105	-4,17	-21,4	3,8	T

[a] Par rapport au standard international Vienna-Standard Mean Ocean Water (V-SMOW)

[b] Unité tritium

Tableau 3. Calcul de l'activité initiale du ^{14}C et de l'âge des eaux souterraines de la zone côtière d'Essaouira (campagnes 1996 et 2007) selon différents modèles.

Table 3 ***Calculation of the initial ^{14}C activity and groundwater age in the coastal area of Essaouira (1996 and 2007 campaigns) according to different models.***

Point d'eau	Tamers		Pearson		Fontes & Garnier		AIEA		Evans	
	A0[a] (pcm)	Âge (an)	A0 (pcm)	Âge (an)	A0 (pcm)	Âge (an)	A0 (pcm)	Âge (an)	A0 (pcm)	Âge (an)
Campagne 1996										
65/51	53,6	actuel	46,7	actuel	46,4	actuel	76,5	actuel	44,6	actuel
390/51	54,5	4 267	44,8	2 646	44,3	2 558	70,9	6 445	42	2 128
386/51	53	actuel	49	actuel	48,9	actuel	79,9	actuel	47	actuel
380/51	53	23 739	42,9	21 984	42,4	21 891	68,2	25 829	40,1	21 443
M98	52,8	actuel	44,3	actuel	44	actuel	72,9	actuel	42,2	actuel
A. Aghbalou	53,4	actuel	47,6	actuel	47,4	actuel	77,6	624	45,5	actuel
218/51	55,3	actuel	47,1	actuel	46,8	actuel	77,3	994	45,1	actuel
Campagne 2007										
Ait Brahim	61,1	3 033	36,7	actuel	35,6	actuel	59,7	2 832	36,0	actuel
389/51	56,8	actuel	29,8	actuel	28,7	actuel	48	actuel	26,7	actuel
128/51	56,7	actuel	40,1	actuel	39,5	actuel	65,9	actuel	37,8	actuel

[a]A0 : Activité initiale en ^{14}C du carbone minéral total dissous lors de la recharge de l'aquifère (pcm : % carbone moderne)

d'Essaouira en eau potable. Ce puits présente une teneur en ^{18}O de -4,53, valeur intermédiaire entre la teneur isotopique de -4 des eaux plio-quaternaires et -5 des eaux turoniennes, indiquant un apport d'eaux turoniennes par pompage de l'aquifère plio-quaternaire. Le forage 386/51 captant les eaux de l'aquifère turonien alimente en eau potable l'aérodrome de la ville d'Essaouira. Le forage M98 à une teneur en ^{14}C de 80 % montre une alimentation antérieure aux essais nucléaires des années 1952 et son âge radiocarbone ne peut pas dépasser quelques centaines d'années quel que soit le modèle d'interprétation utilisé. Le forage 390/51 captant les eaux de l'aquifère turonien, alimente la ville d'Essaouira avec un débit de 60 $L \cdot s^{-1}$, soit 50 % des besoins en eau. L'eau de ce forage a un âge radiocarbone de l'ordre de 6 500 ans d'après le modèle de

l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), un peu inférieur, mais toujours de plusieurs milliers d'années selon les autres modèles. Ceci indique une eau très ancienne qui est en train de s'épuiser. Le forage 380/51 captant les eaux de l'aquifère turonien se trouve de la même situation avec un âge radiocarbone supérieur à 20 000 ans quel que soit le modèle utilisé, indiquant par là également le faible taux de renouvellement de la nappe turonienne. Le puits Ait Brahim captant le plio-quaternaire a un âge radiocarbone 2 831 ans selon le modèle de l'AIEA. L'activité actuelle en ^{14}C de la source Aghbalou qui provient de l'aquifère barrémien-aptien, alimentant en eau potable et abreuvant le cheptel d'une population de 10 000 habitants avec un débit de 30 $L{\cdot}s^{-1}$, présente une teneur en tritium inférieure à 1 UT. L'eau de ce puits est donc antérieure aux essais nucléaires et son âge radiocarbone est de quelques centaines d'années quel que soit le modèle.

5. CONCLUSION

Comme les autres bassins des zones côtières, le bassin d'Essaouira n'a pas été épargné par l'effet du changement climatique qui s'ajoute à l'effet de la surexploitation des eaux souterraines. 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 remontée au cours des années pluvieuses, avec une tendance générale à la baisse et *iii*) une dégradation de la qualité des eaux en s'éloignant de l'oued Ksob (source d'infiltration d'eau de surface dans l'aquifère). Les résultats isotopiques ont montré que la recharge de l'aquifère dépend des précipitations et que le renouvellement de l'aquifère turonien est faible.

La complémentarité des approches hydroclimatiques, hydrodynamiques, hydrochimiques et isotopiques ont abouti au diagnostic de l'état de vulnérabilité des aquifères du bassin d'Essaouira face au changement climatique. Cependant, la mise au point d'une stratégie d'exploitation rationnelle permettrait de valoriser ses eaux tout en sauvegardant ses potentialités à long terme. Ainsi, le recours à des ressources non conventionnelles, telles que les eaux de mer dessalées pour l'alimentation en eau potable ou les eaux usées épurées pour l'agriculture, doit être considéré comme une priorité afin d'éviter le déclenchement d'une situation sérieuse de pénurie en eau.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée au sein du Laboratoire 3GEOLAB de la faculté des Sciences Semlalia de Marrakech, Université Cadi Ayyad en collaboration avec l'École Normale Supérieure de Marrakech et l'Institut technologique et nucléaire de Sacavém au Portugal (ITN). Nos remerciements vont aux agents de l'Agence du Bassin Hydraulique Tensift qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Nous remercions également le groupe de recherche de la professeure Paulà Carreira à l'ITN au Portugal qui a réalisé les analyses isotopiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BABQIQI A. (2014). *Changements climatiques au Maroc : Étude du cas de la région de Marrakech Tensift Al Haouz et implications sur l'agriculture à l'horizon 2030*. Thèse de doctorat, Univ. Cadi Ayyad, Maroc, 143 p.

BAHIR M. (2007). *Isotopes et ressources en eaux en zones-arides et semi-arides : exemple du bassin d'Essaouira*. El Watania, Tunisie, 175 p.

BAHIR M., P. CARREIRA, M. OLIVEIRA DA SILVA et P. FERNANDES (2008). Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geológicos*, 64 (1), 61-73.

BAHIR M. et H. CHAMCHATI (2011). Caractérisation du système aquifère plio-quaternaire et turonien (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Conférence GeoHydro Québec*, 28-31 août 2011, Québec, Canada, pp. 1-6.

BAHIR M., R. EL MOUKHYAR, H. CHAMCHATI et N. CHKIR (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*, 26-28 avril 2013, Sousse,Tunisie, pp.112-121.

CHAMCHATI H. (2014). *Évaluation et protection des ressources en eau en zones semi-arides : exemple du bassin d'Essaouira*. Thèse de doctorat, Univ. Cadi Ayyad, Maroc, 143 p.

CHAMCHATI H. et M. BAHIR (2011). Contribution of climate change on water resources in semi-aride areas: example of the Essaouira basin. *Geographia Technica*, 1, 1-8.

CHAMCHATI H. et M. BAHIR (2013). Potential hydrogeological, environment and vulnerability to pollution of the Plio-Quaternary aquifers of the coastal basin of Essaouira (Morocco). *J. Environ. Earth Sci.*, 3 (10), 170-185.

CRAIG H. (1961). Standards for reporting concentration of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Science*, 133, 1833-1834.

DE MARTONNE E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Météorologie*, 2, 449-458.

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, Univ. Toulouse, France, 163 p.

DRIOUECH F., S. BEN RACHED et T. EL HAIRECH (2013). Climate variability and change in North African countries. Dans : *Climate change and food security in West Asia and North Africa*. SIVAKUMAR M.V.K., R. LAL, R. SELVARAJU et I. HAMDAN (éd.), Springer, Chap. 9, pp.161-172.

DUFFAUD F., L. BRUN et B. PLANCHOT (1966). Bassin du sud-ouest marocain. Dans : *Bassin sédimentaire du littoral africain*. REYRE (éd.), Paris, France, Vol. 9, p. 18.

EPSTEIN S. et T. MAYEDA (1953). Variation of O^{18} content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4 (5), 213-224.

FARID I., R. TRABELSI, K. ZOUARI, K. ABID et M. AYACHI (2013). Deciphering the interaction between quaternary and continental Sabkhas aquifers in Central Tunisia using hydrochemical and isotopic tools. *Environ. Earth Sci.*, 70 (7), 3289-3309.

FRIEDMAN I. (1953). Deuterium content of natural waters and other substances. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 89-103.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC) (2013). *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs*. GIEC, Suisse, 34 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (1976). *Procedure and technique critique for tritium enrichment by electrolysis at IAEA laboratory*. Isotope Hydrology Laboratory, Technical Procedure Note No 19, INIS-XA-734, Vienne, Autriche, 42 p.

JALAL M., M. BAHIR et A. MENNANI (2001). Pollution nitratée des eaux souterraines du bassin synclinal d'Essaouira (Maroc). *J. Environ. Hydrol.*, 9, 1-10.

KENDALL M.G. (1975). Multivariate nonparametric tests for trend in water quality. *Water Resour. Bull.*, 24 (3), 505-512.

LUCAS L.L. et M.P. UNTERWEGER (2000). Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Natl. Inst. Technol.*, 105, 541-549.

MAZOR E. (1991). *Applied chemical and isotopic groundwater hydrology.* Open University Press, Buckingham, Royaume-Uni, 282 pp.

MANN H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrical*, 13, 245-259.

MENNANI A. (2001). *Apports de l'hydrochimie et de l'isotopie à la connaissance du fonctionnement des aquifères de la zone côtière d'Essaouira (Maroc occidental).* Thèse de doctorat, Univ. Cadi Ayyad, Maroc, 152 p.

NOUACEUR Z., B. LAIGNEL et I. TURKI (2013). Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien. *Physio-géo*, 7, 307-323.

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'EDUCATION, LA SCIENCE ET LA CULTURE (UNESCO) (2010). *Changement climatique enjeux et perspectives au Maghreb*. Rabat, Geb-Environnement, Maroc, 258 p.

SEBBAR A., W. BADRI, H. FOUGRACH, M. HSAINE et A. SALOUI (2011). Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse*, 22, (3), 139-148.

SINAN M., M. BOUSSETTA et A. EL RHERARI (2009). Changements climatiques : causes et conséquences sur le climat et les ressources en eau. *Revue HTE*, 142, 21-30.

STOUR L. et A. AGOUMI (2009). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécol. Appl.*, 16, 215-232.