

Modèle conceptuel de circulation hydrogéologique au niveau de l'aquifère plioquaternaire de Settat (Maroc) : étude hydrogéochemique

Hydrogeological conceptual model of the Settat aquifer (Morocco): hydrogeochemical study

Namira El Amrani Paaza, Marie Larocque et José Benavente Herrera

Volume 31, numéro 4, 2018

Reçu le 5 mars 2018, accepté le 2 août 2018

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1055597ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1055597ar>

[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

Paaza, N. E. A., Larocque, M. & Herrera, J. B. (2018). Modèle conceptuel de circulation hydrogéologique au niveau de l'aquifère plioquaternaire de Settat (Maroc) : étude hydrogéochemique. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31(4), 401–414. <https://doi.org/10.7202/1055597ar>

Résumé de l'article

La région de Settat a connu durant ces deux dernières décennies une croissance démographique importante et un essor économique majeur par l'implantation d'une zone industrielle. En plus, cette région est connue par son caractère agricole, surtout en cultures céréalières (grenier du Maroc). Cette croissance a été accompagnée par une augmentation des débits des effluents liquides urbains et industriels qui sont directement évacués dans l'oued Boumoussa considéré comme égout à ciel ouvert et qui ont induit une détérioration de la qualité de ces eaux. Tout cela a eu un impact sur l'aquifère de Settat du point de vue hydrodynamique et de qualité des eaux souterraines. Pour pallier à cette problématique, une étude pluridisciplinaire a été menée au moyen de l'analyse physicochimique et de l'analyse des isotopes stables de l'eau. Les études antérieures et les analyses présentées ici révèlent une pollution chimique des eaux de la nappe par les écoulements superficiels de l'oued Boumoussa. Les résultats montrent la présence d'un phénomène d'évaporation de l'eau souterraine ainsi que la présence d'un recyclage des eaux d'irrigation qui se mêlent à la recharge naturelle (précipitation) pour alimenter l'aquifère de Settat. Les résultats ont permis de proposer, sur la base des données physicochimiques et isotopiques, un modèle conceptuel de circulation des eaux au niveau de l'aquifère plioquaternaire de Settat pour une meilleure gestion de la ressource en eau.

MODÈLE CONCEPTUEL DE CIRCULATION HYDROGÉOLOGIQUE AU NIVEAU DE L'AQUIFÈRE PLIOQUATERNAIRE DE SETTAT (MAROC) : ÉTUDE HYDROGÉOCHIMIQUE

Hydrogeological conceptual model of the Settat aquifer (Morocco): hydrogeochemical study

NAMIRA EL AMRANI PAAZA^{1*}, MARIE LAROCQUE², JOSÉ BENAVENTE HERRERA³

¹Département de Géologie Appliquée, Faculté des Sciences et Techniques, Université Hassan 1^{er}, km 3,5, route de Casablanca, BP 577, 26000 Settat, Maroc

²Centre de recherche GÉOTOP et Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université de Québec à Montréal, BP 8888, succursale centre-ville, Montréal (Québec) H3C 3P8, Canada

³Département de Géodynamique, Faculté des Sciences, Université de Grenade, av. del Hospicio, s/n CP 18010, Grenade, Espagne

Reçu le 5 mars 2018, accepté le 2 août 2018

RÉSUMÉ

La région de Settat a connu durant ces deux dernières décennies une croissance démographique importante et un essor économique majeur par l'implantation d'une zone industrielle. En plus, cette région est connue par son caractère agricole, surtout en cultures céréalières (grenier du Maroc). Cette croissance a été accompagnée par une augmentation des débits des effluents liquides urbains et industriels qui sont directement évacués dans l'oued Boumoussa considéré comme égout à ciel ouvert et qui ont induit une détérioration de la qualité de ces eaux. Tout cela a eu un impact sur l'aquifère de Settat du point de vue hydrodynamique et de qualité des eaux souterraines. Pour pallier à cette problématique, une étude pluridisciplinaire a été menée au moyen de l'analyse physicochimique et de l'analyse des isotopes stables de l'eau.

Les études antérieures et les analyses présentées ici révèlent une pollution chimique des eaux de la nappe par les écoulements superficiels de l'oued Boumoussa. Les résultats montrent la présence d'un phénomène d'évaporation de l'eau souterraine ainsi que la présence d'un recyclage des eaux d'irrigation qui se mêlent à la recharge naturelle (précipitation) pour alimenter l'aquifère de Settat. Les résultats ont permis de proposer, sur la base des données physicochimiques et isotopiques, un modèle conceptuel de circulation des eaux au niveau de l'aquifère plioquaternaire de Settat pour une meilleure gestion de la ressource en eau.

Mots-clés : *écoulement souterrain, ressources en eau, hydrochimie, isotopes stables de l'eau, Settat (Maroc).*

*Auteur pour correspondance :
Téléphone : (212) 6 61 952 999
Courriel : namira.elamranipaaza@uhp.ac.ma

ABSTRACT

The Settât region has seen significant population growth and major economic development through the establishment of an industrial area over the past two decades. In addition, this region is known for its agriculture which consists mostly of cereal crops (granary of Morocco). This growth has been accompanied by increased rates of urban and industrial liquid effluents discharged directly in the Boumoussa River which is considered an open sewer and which has led to a deterioration in the quality of this river waters. This situation has had an impact on the hydrodynamic behaviour and groundwater quality of the Settât aquifer. To contribute to alleviate this problem, a multidisciplinary study was conducted using physicochemical analyses and analyses of stable isotopes of water. The previous studies and new analyses reveal a chemical pollution of groundwater by surface flow of the Boumoussa River. The results show a phenomenon of groundwater evaporation, as well as the presence of irrigation return flow which mixes with the Boumoussa River to feed the aquifer. Based on these results, a conceptual model of water flow in the Settât aquifer, based on physicochemical and isotopic data, is proposed to help develop a more sustainable management of water resources.

Key words: *groundwater flow, water resources, water chemistry, stable isotopes of water, Settât (Morocco).*

1. INTRODUCTION

L'utilisation des eaux usées brutes en agriculture est une pratique répandue dans les régions du monde affectées par la pénurie en eau (EL KETTANI *et al.*, 2006). Au Maroc, elle est réalisée d'une manière courante et très ancienne à la périphérie des grandes villes continentales. Elle s'est développée ces dernières années, autour de certaines agglomérations pourvues d'un réseau d'assainissement (JEMALI et KEFATI, 1994). Cette pratique peut être très bénéfique pour la production agricole, car elle est économique, permet d'irriguer les cultures, d'épurer l'eau et de recycler des éléments nutritifs (DERE *et al.*, 2006). Toutefois, elle peut également entraîner des problématiques importantes de pollution de l'eau et des sols, qui peuvent engendrer des risques pour la santé humaine (LAAMARI *et al.*, 2004).

La région de Settât au Maroc, comme plusieurs régions arides en Afrique, fait face à cette problématique depuis plusieurs années. L'oued Boumoussa qui est le principal cours d'eau de la région reçoit des eaux usées domestiques et industrielles de la ville de Settât qui sont évacuées sans traitement préalable

dans l'oued Boumoussa. Le long de son passage, les riverains utilisent l'oued pour l'irrigation des cultures céréalières et fourragères. Les polluants contenus dans ces eaux peuvent donc s'accumuler dans les sols et l'aquifère au niveau de la zone au nord de la ville de Settât. Compte tenu de ceci, il est clair que les risques de dégradation des composantes de l'écosystème et de la santé humaine sont élevés.

Cette problématique a été étudiée dans le cadre du projet Écosystème et santé humaine (financé par le Centre de recherche pour le développement international du Canada et la Fondation Ford des États-Unis). Cette étude (2002-2005) a été menée sur les eaux souterraines et les eaux superficielles de la communauté de Mzamza (plaine de Berrechid) dans le but de déceler l'impact de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation sur l'état de santé de la population. Étant donné l'impact négatif sur la santé de la population mis en évidence dans ce projet (LAAMARI *et al.*, 2004), une station d'épuration et de traitement des eaux usées domestiques par lagunage naturel (STEP) a été mise en place par la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Électricité de la Chaouia (RADEEC) en partenariat avec d'autres organismes nationaux et internationaux et est opérationnelle depuis mai 2007.

En 2009, un projet de recherche entre la Faculté des Sciences et Techniques de Settât et l'Institut de l'Eau de l'Université de Grenade (financé par l'Agence espagnole de coopération internationale pour le développement) a porté sur la contamination des sols et des eaux souterraines par les eaux d'irrigation chargées en contaminants industriels. En 2010, un échantillonnage a été réalisé au niveau des puits, de l'oued Boumoussa et des sources situées sur le plateau de Settât (en amont sur le bassin de l'oued Boumoussa) pour comprendre l'origine de l'eau souterraine qui s'écoule à Settât.

L'ensemble des études réalisées depuis 2002 a permis d'obtenir une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère de Settât, mais aucune nouvelle mesure de gestion de l'eau n'a encore été mise en place. L'objectif de ce travail était de réaliser une synthèse des données physicochimiques et isotopiques afin de proposer un modèle conceptuel de circulation des eaux au niveau de l'aquifère plioquaternaire superficiel de Settât au Maroc, notamment pour déceler l'origine des apports à l'aquifère provenant de la surface et de l'aquifère sous-jacent. Cette étude pourra guider les gestionnaires vers une meilleure gestion de l'eau dans la région.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Région d'étude

La région d'étude couvre une superficie de 80 km² au sud de la ville de Casablanca au Maroc (Figure 1). À la sortie de la ville de Settat, l'oued Boumoussa traverse, sur une distance de 8 km, deux localités de la communauté de Mzamza, soit Oulad Boukhalou et Dladla. L'oued Boumoussa est une rivière intermittente et de faible débit, il prend sa naissance en amont dans le plateau de Settat et vient se dessécher à son aval dans la plaine de Berrechid. Lorsqu'il est actif, il s'écoule sur un trajet de 25 km du sud vers le nord, traversant la ville de Settat en longeant la route principale Casablanca-Marrakech.

Le climat est semi-aride méso thermique (25 °C en moyenne) et reçoit une pluviométrie de l'ordre de 325 mm·a⁻¹ (EL ASSAOUI, 2017). L'évapotranspiration potentielle moyenne est de l'ordre 1 182 mm·a⁻¹ (LAAMARI *et al.*, 2004). La saison des pluies s'étend de novembre à mai.

La région est une zone charnière entre le plateau de Settat au sud et la plaine de Berrechid au nord. Cette limite plateau de Settat-plaine de Berrechid témoigne d'une tectonique plioquaternaire par l'existence de failles importantes. Les deux ensembles qui constituent le plateau de Settat et la plaine de Berrechid sont formés de roches sédimentaires sur lesquelles vient se superposer la couverture quaternaire récente. La plaine de Berrechid se caractérise par des affleurements de limons argileux quaternaires ou de grès calcaires pliocènes. Le plateau de Settat se situe dans une cuvette d'âge cénomanien. Les formations marno-calcaires du Cénomanien, affleurant largement sur le plateau de Settat, contiennent une nappe d'eau de faible extension participant en partie à l'alimentation de la nappe plioquaternaire de Berrechid. Leur rôle hydrogéologique est important à l'amont de la plaine où des circulations de type karstique peuvent constituer un relais entre les formations profondes du plateau de Settat et l'aquifère plioquaternaire de la plaine de Berrechid.

La nappe de Berrechid se caractérise au fond de la cuvette de Settat par des niveaux piézométriques élevés qui contribuent à la vulnérabilité de cette ressource aux différentes pollutions de surface. Les limons quaternaires forment la quasi-totalité du recouvrement de la plaine. Peu perméables, ils jouent un rôle hydrogéologique important du fait qu'ils rendent captive la nappe des formations plioquaternaires et qu'ils sont localement à l'origine de petites nappes perchées. À petite échelle, l'absence de flaques d'eau de grande dimension (*daya*) sur la plaine montre toutefois que la conductivité hydraulique de ces limons est suffisamment importante pour permettre une infiltration

des eaux de pluie et donc une alimentation de la nappe à partir de la surface (EL BOUQDAOUI, 1995).

Il ressort de l'analyse de la piézométrie relative à la période de septembre 2003 à octobre 2004 sur l'ensemble des puits que les variations de niveaux piézométriques sont faibles durant cette période (l'écart moyen varie entre 0,20 et 0,68 m). L'alimentation de la nappe semble conditionnée par un apport relativement constant à partir des précipitations (en hiver) et à partir du retour d'irrigation (en été). L'analyse de la piézométrie pour le mois de janvier 2004 (période intermédiaire entre les hautes eaux et l'étiage) (Figure 2) montre que la direction générale d'écoulement de la nappe est sensiblement SE-NO dans le sud de la zone d'étude avec deux dépressions piézométriques au niveau des localités Oulad Boukhalou et Dladla, qui témoignent de l'effet des pompes pour l'irrigation des cultures (EL AMRANI PAAZA *et al.*, 2008).

À hauteur de la ville de Settat, l'oued Boumoussa est canalisé sur 3 km. Sur cette distance, il collecte les eaux d'orages, les eaux usées de la ville (actuellement canalisées en partie, et évacuées vers la STEP) et celles de la zone industrielle. Les unités industrielles doivent toutefois se doter de systèmes de prétraitement pour que leurs rejets aient des teneurs en éléments chimiques pouvant être traités à la STEP et avoir l'autorisation de se brancher dans le réseau d'assainissement municipal. Les établissements industriels de Settat contribuent actuellement au débit total des eaux usées par temps sec de la ville à hauteur de 25 %, ce qui correspond à une proportion importante de la charge polluante globale générée (RADEEC, 2007). Les débits jaugés à l'oued varient de 20 L·s⁻¹ en basses eaux jusqu'à près de 600 L·s⁻¹ en période de crues et en temps de rejets. Cette évolution des débits est accompagnée par une hausse de la salinité de l'eau de rivière; cette salinité des eaux étant fonction du type de rejets, soit domestiques ou industriels. La STEP permet de traiter un volume d'eau estimé à 9 632 m³·j⁻¹ (RADEEC, 2007). La mise en œuvre du lagunage naturel en aval de la ville de Settat a permis de mettre en conformité les effluents de la ville par rapport aux normes de rejets (OMS, 1989), et éventuellement les réutiliser pour les besoins de l'agriculture.

En amont, le parc industriel de Settat comprend essentiellement des usines de textile, une tannerie, des abattoirs et des verreries-cristallerie. On trouve également des usines de fabrication de produits céramiques, de marbre, des plastiques, des équipements électriques et électroniques, des minoteries, des usines de production de margarine, un abattoir de volaille, des boyauderies, une usine de fabrication de clous et une imprimerie (RADDEC, 2006). Les eaux usées industrielles ne peuvent être traitées à la STEP du fait de leur salinité très élevée (conductivité électrique des effluents varie entre 9 000 et 23 000 μS·cm⁻¹) qui pourrait endommager les installations

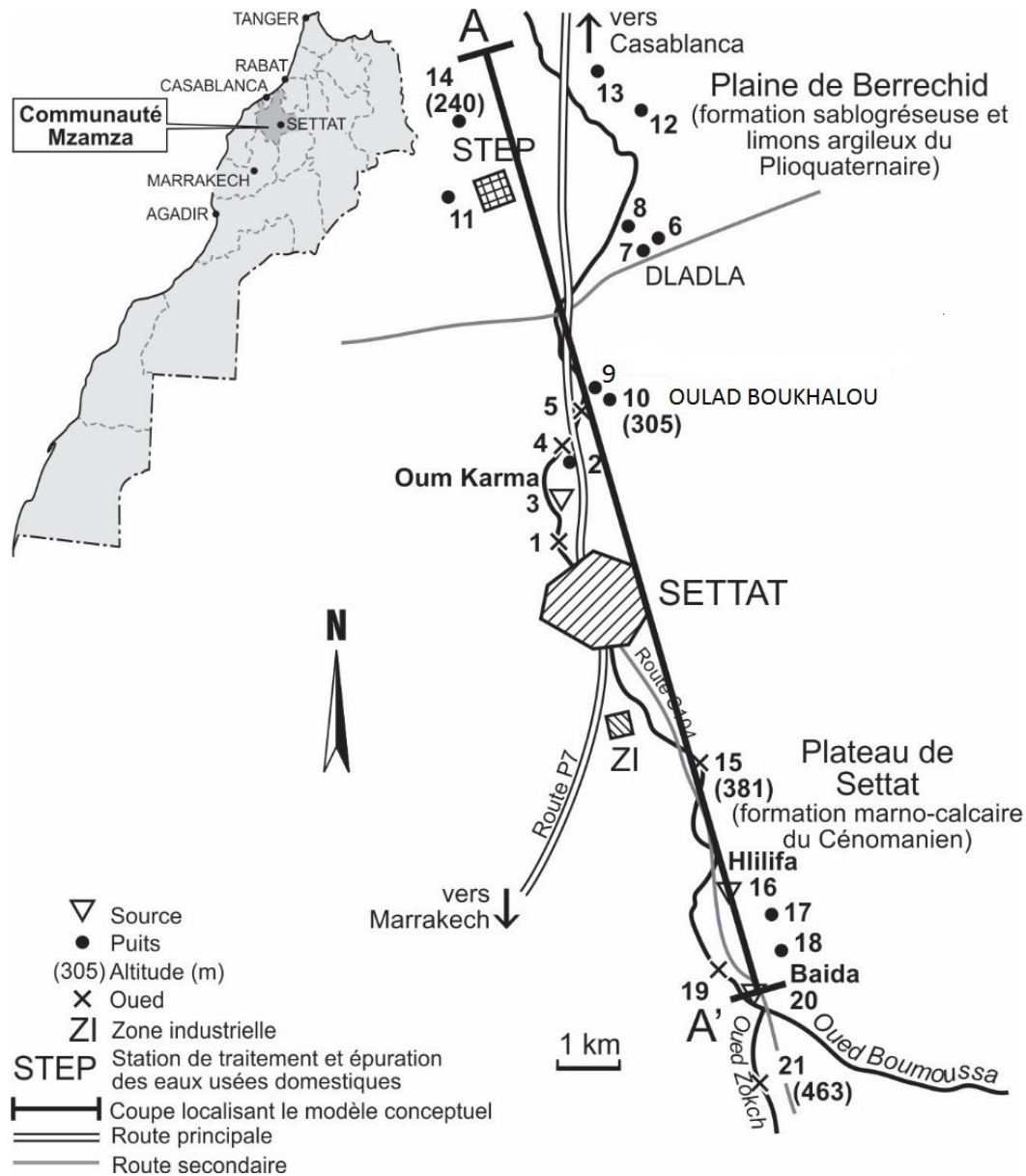


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude et localisation des points de mesure.
Geographic location of the study area and the sampling points.

et inhiber la fonction biologique des bactéries responsables de l'épuration. De même, des teneurs élevées en éléments traces métalliques (Cu, Cr, Pb, Zn, Ni, Fe, Cd et Al) émanant de ces activités industrielles ont été détectés au niveau des eaux usées, eaux souterraines et sols (EL AMRANI PAAZA *et al.*, 2010). Le détournement des eaux usées domestiques vers la STEP a entraîné une diminution significative du débit de l'oued Boumoussa qui s'assèche maintenant à 3 km à l'aval de la ville. Seule la localité d'Oulad Boukhalou peut maintenant utiliser l'eau de l'oued pour l'irrigation. Plus en aval de la zone d'étude, la localité de Dladla doit maintenant utiliser l'eau souterraine pour irriguer; ce recyclage des eaux souterraines chargées en nitrates induit une contamination plus accrue de l'aquifère plioquaternaire par les nitrates.

2.2 Échantillonnage et analyses

Deux périodes d'échantillonnage ont été considérées dans la présente étude, celles de juin 2009 et de novembre 2010. Ces campagnes d'échantillonnage ont permis d'échantillonner 21 stations, c.-à-d. cinq points dans l'oued Boumoussa, 12 puits privés utilisés pour l'approvisionnement et l'irrigation (huit dans le Plioquaternaire et quatre dans le Cénomanien), trois sources (Oum Karma, Hlilifa et Baida) et l'oued Zokch (voir figure 1 pour la localisation des stations). L'échantillonnage de juin 2009 a consisté à prélever, sur la plaine de Berrechid, 14 échantillons d'eau (dix au niveau des puits, trois au niveau de l'oued Boumoussa et la source Oum Karma). L'échantillonnage de novembre 2010 a consisté à prélever, sur le plateau de

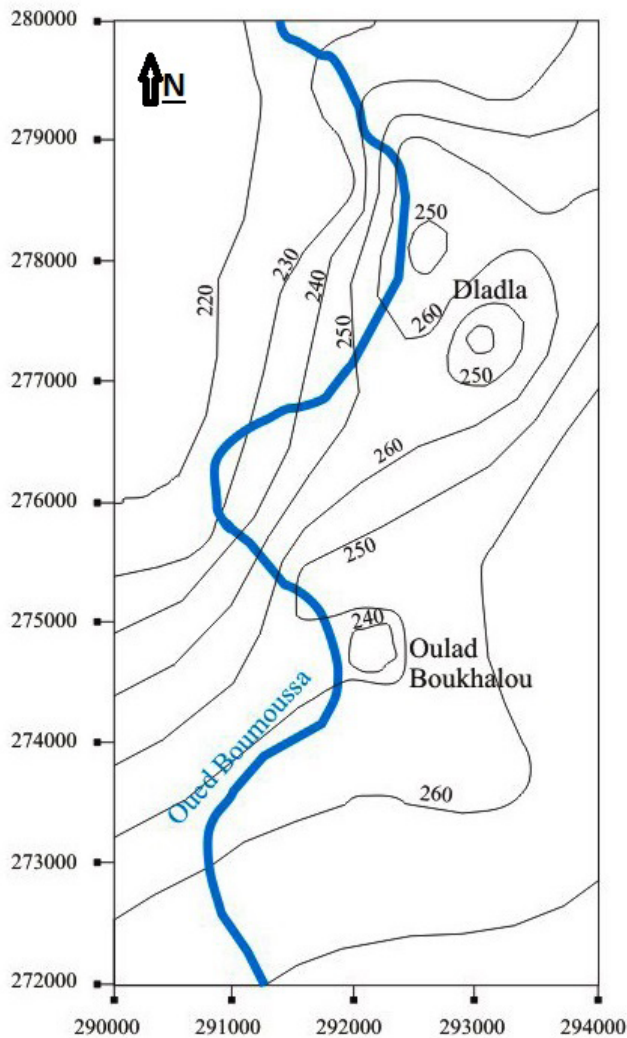


Figure 2. Carte piézométrique de janvier 2004 (EL AMRANI et al., 2008). Carte en coordonnées Lambert; les lignes noires sont des courbes isopièzes (m asl).
Piezometric map of January 2004 (EL AMRANI et al., 2008). Map in Lambert coordinates; black lines correspond to piezometric levels (m asl).

Settat, sept échantillons (deux dans des puits, deux dans l'oued Boumoussa, un dans l'oued Zokch et deux dans des sources (Hlilifa et Baida).

Les forages ont été purgés jusqu'à ce que les paramètres physicochimiques (pH et conductivité électrique) soient stabilisés. Les sources, l'oued Boumoussa et l'oued Zokch ont été échantillonnés par prélèvement direct dans le cours d'eau. Les échantillons mis dans des bouteilles en polyéthylène ont été conservés à 4 °C jusqu'au moment de leur analyse. Les paramètres physicochimiques (conductivité électrique, pH et température) ont été mesurés *in situ*. La profondeur de l'eau par rapport au sol a été mesurée pour l'ensemble des puits.

Les analyses chimiques (ions majeurs, ions azotés et éléments traces métalliques) des échantillons prélevés en 2009

ont été réalisées à la division de l'Unité d'Appui technique à la Recherche scientifique (UATRS) du Centre National de la Recherche Scientifique à Rabat. Les analyses chimiques des échantillons de 2010 ont été réalisées à l'Institut de l'Eau de l'Université de Grenade (Espagne) et ont concerné les ions majeurs et les nitrates. La composition isotopique de l'eau a été analysée en 2009 à l'Alfred-Wegener Institut for Polar and Marine Research, Isotope Laboratory (Research Unit Potsdam, Allemagne), et en 2010 au laboratoire IDES de l'Université Paris-Sud (France), dans les deux cas par équilibration puis mesures par spectrométrie gazeuse. Les teneurs en ^2H et ^{18}O sont exprimées selon la notation conventionnelle δ (‰) par rapport au V-SMOW. Les erreurs analytiques sont de $\pm 1\text{‰}$ et $\pm 0,1\text{‰}$ vs V-SMOW respectivement pour le $\delta^2\text{H}$ et le $\delta^{18}\text{O}$.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Géochimie et types d'eau

La pollution chimique des eaux de la nappe de l'aquifère de Settat par les écoulements superficiels de l'oued Boumoussa et par le recyclage des eaux souterraines pour l'irrigation a été décelée à partir des résultats de la campagne d'analyse physicochimique de 2004. Les eaux souterraines présentaient des niveaux de salinité élevés, plus prononcés dans les périmètres irrigués par les eaux souterraines. Les teneurs en nitrates de l'eau souterraine dépassaient largement la norme de $50 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ préconisée par le Maroc (NORMES MAROCAINES, 2002). Les teneurs en nitrites étaient plus élevées au niveau de la zone d'épandage des eaux usées au nord de la ville de Settat et diminuent vers l'aval. Le plomb, le chrome, le zinc et l'aluminium présentaient des teneurs importantes dans les puits ainsi qu'au niveau des eaux usées, mettant en évidence l'apport des rejets industriels (EL ASLOUJ et al., 2007); ce fait a été observé sur l'oued Moulouya témoignant de l'impact des rejets urbains de la ville de Taourirt au Maroc (EL FOUNTI, 2000, cité par BOUABDLI et al., 2005). Ces valeurs en métaux non tolérées par les normes marocaines pour l'irrigation font que ces eaux soient inaptes à l'irrigation et peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'environnement. Aussi, elles peuvent causer une contamination importante de l'horizon de surface du sol (DERE et al., 2006).

Les cartes de distributions spatiales des conductivités électriques de 2004 (Figure 3a) et 2009 (Figure 3b), correspondant à la période avant et après la mise en place de la STEP (janvier 2004 et juin 2009, respectivement), montrent que la salinité des eaux souterraines a augmenté au sud de la zone étudiée (Oulad Boukhalou). Ceci s'explique par la présence d'irrigation par les eaux acheminées par l'oued

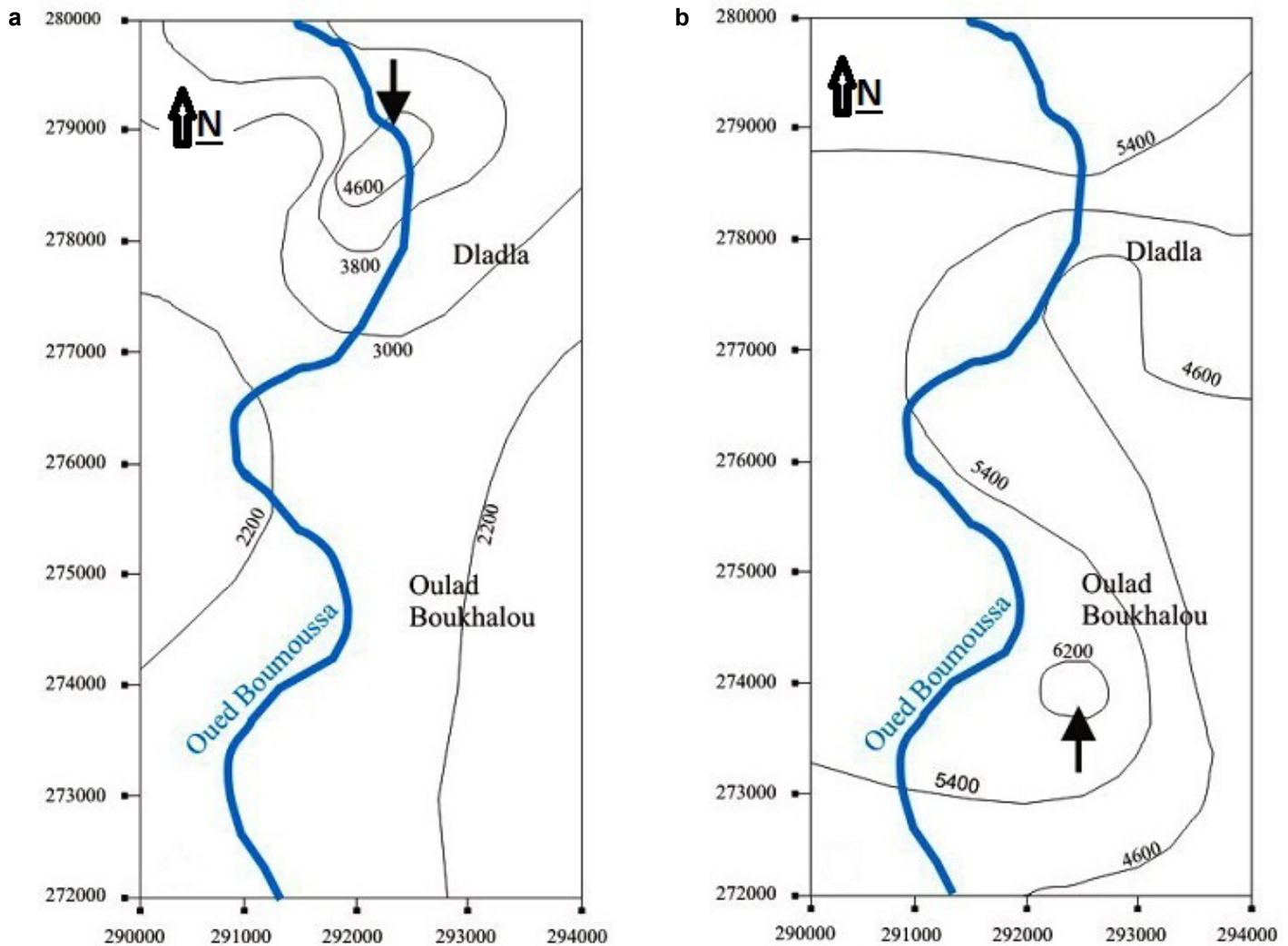


Figure 3. Cartes d'isoconductivité pour a) janvier 2004 et b) juin 2009 (EL AMRANI *et al.*, 2011). Cartes en coordonnées Lambert; les lignes noires sont des courbes d'isoconductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

*Iso-conductivity maps for a) January 2004 and b) June 2009 (EL AMRANI *et al.*, 2011). Maps in Lambert coordinates; black lines correspond to iso-conductivity levels ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).*

contaminé par les effluents industriels qui ne sont plus dilués par les rejets domestiques acheminés vers la STEP depuis 2007.

Le diagramme de Piper élaboré à partir des analyses physicochimiques de 2009 et 2010 montre trois nuages de points (Figure 4, Tableau 1). Un premier groupement (I) à faciès sodique bicarbonaté sulfaté et chloruré est composé des eaux de l'oued Boumoussa (eaux usées [1, 4 et 5] et de la source [3]). Un deuxième groupement (II) à faciès sodique chloruré, est composé de puits captant le plioquatenaire (2, 6, 7, 8, 9, 10 et 12) où probablement il y a échange cationique calcium/sodium ou le calcium est retenu lors du passage des eaux au travers d'une formation argileuse (les argiles étant de bons échangeurs d'ions) (BANTON et BANGOY, 1997; TAUPIN *et al.*, 2009; FEHDI *et al.*, 2009). Le troisième groupement (III) à faciès calcique magnésien sodique et chloruré correspond aux puits situés les plus à l'aval sur la zone d'étude et les plus profonds. Comme ils présentent le même faciès que les puits

(17 et 18) et les sources (16 et 20) situés sur le plateau de Settat, ces puits (11 et 13) captent probablement le cénomanien marno-calcaire et aussi ces eaux présentent un rapport Ca/SO_4 supérieur à 1 ce qui montre qu'on a une dissolution des minéraux carbonatés (environnement calcaire). Le mélange entre les eaux de surface et les eaux souterraines est observé au niveau des diagrammes anionique et cationique, dans le sens de la flèche, par un enrichissement des eaux souterraines en chlorures et une diminution en calcium (puits 2, 9, 10, 6, 7, 8). De même une évaporation avant infiltration dans les zones irriguées peut induire un enrichissement en NaCl, ce phénomène a été observé par STRAUCH *et al.* (2006) dans les eaux superficielles et souterraines dans l'aquifère fracturé du bassin versant de l'Elqui dans la région des Andes au Chili.

De même, les puits à niveaux piézométriques élevés présentent les teneurs en nitrates les plus faibles, alors que les puits à niveaux piézométriques bas enregistrent des teneurs en

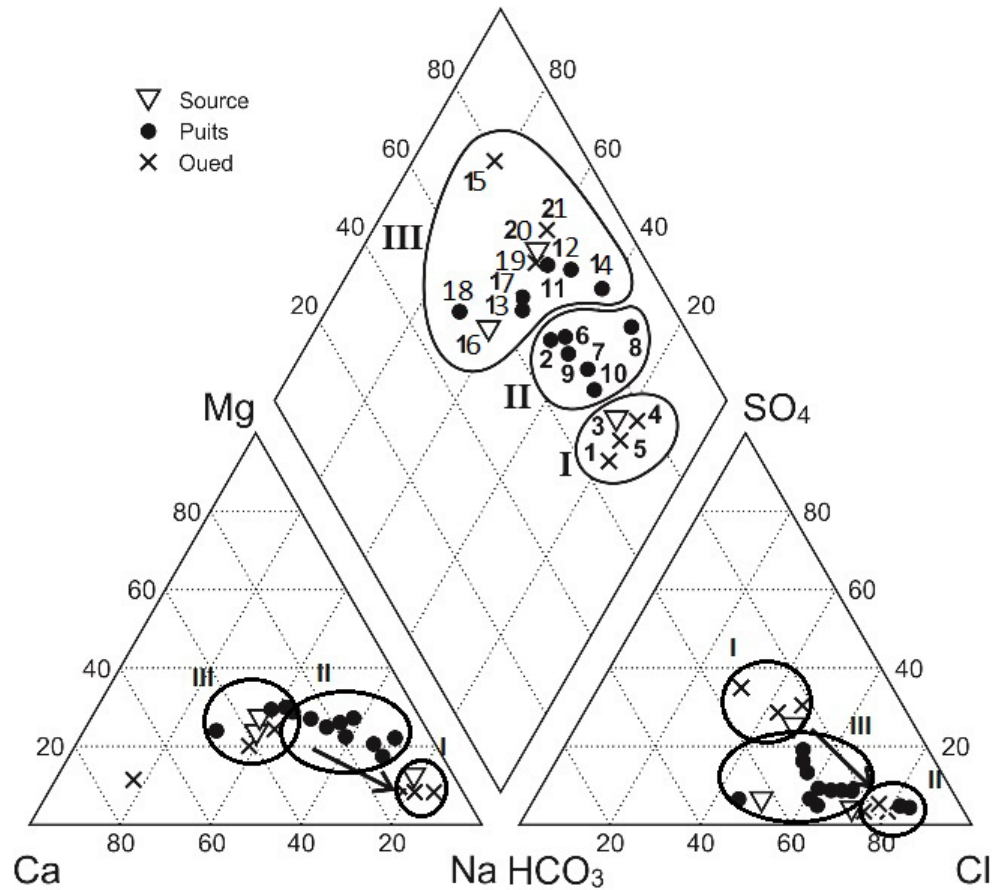


Figure 4. Diagramme de Piper distinguant les types de faciès obtenus lors de la campagne de 2009-2010. Les flèches indiquent le mélange entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les cercles indiquent les groupements de points à faciès hydrochimique distinct : I) faciès sodique bicarbonaté sulfaté, II) faciès sodique chloruré et III) faciès calcique magnésien chloruré.

Piper diagram distinguishing the types of facies obtained during the 2009-2010 campaign. Arrows indicate the mixing of surface water and groundwater. The circles indicate the groups of points with distinct hydrochemical facies (I, II and III).

nitrate les plus élevées (supérieures à 50 mg.L⁻¹) (Figure 5), ces derniers sont situés dans la zone irriguée par les eaux souterraines (Dladla). La présence des ions nitrates dans les niveaux aquifères profonds confirme l'infiltration des eaux depuis les niveaux aquifères superficiels vers des niveaux plus profonds (TRABELSI *et al.*, 2005); aussi, un recyclage des eaux d'irrigation provenant des eaux souterraines (puits) se fait plus patent à ce niveau de la nappe. Les concentrations plus faibles dans les puits plus superficiels pourraient s'expliquer par des écoulements préférentiels rapides entre la zone non saturée et la zone saturée.

3.2 Isotopes stables de l'eau

La composition de l'eau en isotopes stables permet de mieux comprendre le fonctionnement des aquifères, facilitant ainsi la gestion de la ressource en eau. Généralement, l'eau conserve sa

signature isotopique sauf si elle est diluée ou mélangée avec des eaux d'une autre composition isotopique (FONTES 1980). Cependant, ce type d'investigation nécessite au préalable une bonne connaissance du signal isotopique véhiculé par la pluie (CELLE-JEANTONA *et al.*, 2001). La composition isotopique des précipitations locales n'étant pas disponible, la droite des eaux météoriques mondiales est utilisée.

Les stations représentatives du plateau de Settat s'alignent sur une droite d'évaporation de pente 6,81 sous la droite météorique mondiale (GMWL) (Figure 6). Les stations de la plaine de Berrechid se répartissent sur une droite d'évaporation de pente 2,60, ce qui témoigne que ces eaux ont subi une évaporation avant d'atteindre les niveaux aquifères par infiltration (CLARK et FRITZ, 1997). Des résultats similaires ont été observés au niveau de l'aquifère de Takesla en Tunisie (TRABELSI *et al.*, 2005), de Souss (BOUCHAOU *et al.*, 2008) et de Tadla (BOUCHAOU *et al.*, 2009) au Maroc. Il est

Tableau 1. Résultats analytiques des campagnes d'échantillonnage de juin 2009 et novembre 2010.
 Table 1. Analytical results of the June 2009 and November 2010 sampling campaigns.

Site	Type ^a	Aquifère	Date de prélèvement	Niveau piézométrique (m snm) ^b	Conductivité électrique (mS·cm ⁻¹)	pH	Na (mg·L ⁻¹)	K (mg·L ⁻¹)	Mg (mg·L ⁻¹)	Ca (mg·L ⁻¹)	Cl (mg·L ⁻¹)	SO ₄ (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ (mg·L ⁻¹)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)
1	OB	–	Juin 2009	–	5,28	7,75	800	28	43	86	578	859	1 040	1	–	–
2	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	330,65	3,90	7,05	352	8	85	126	596	99	510	113	-3,96	-25,78
3	OK	–	Juin 2009	309	6,70	6,89	1 075	13	83	119	884	644	835	19	-3,60	-26,50
4	OB	–	Juin 2009	–	6,30	8,70	950	34	50	91	775	681	647	–	–	–
5	OB	–	Juin 2009	–	7,10	7,77	1 278	28	66	139	937	832	1 040	1	-3,09	-24,03
6	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	231,64	4,00	7,25	381	4	92	112	690	146	541	109	-3,65	-25,58
7	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	–	5,00	6,90	549	–	89	105	839	162	587	148	-3,36	-24,69
8	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	221,19	6,80	7,58	784	–	131	86	1 506	117	395	100	-3,39	-23,45
9	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	286,22	4,50	7,01	472	9	94	135	768	253	673	35	-3,17	-23,44
10	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	294,72	6,50	6,86	802	6	105	137	1 017	504	897	22	-2,85	-24,00
11	Puits	Cénomanién	Juin 2009	232,75	4,40	7,22	331	5	96	145	888	68	343	59	-3,47	-24,65
12	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	280,47	4,93	7,02	504	5	102	143	796	292	707	35	-3,18	-24,47
13	Puits	Cénomanién	Juin 2009	288,33	2,70	7,30	180	4	63	103	419	49	382	58	-4,16	-27,04
14	Puits	Plioquatenaire	Juin 2009	216,08	6,70	7,51	635	4	154	147	1506	114	407	91	-3,42	-23,92
15	OB	–	Nov. 2010	–	2,10	8,10	121	–	39	424	427	30	193	–	-2,92	-17,90
16	AH	Cénomanién	Nov. 2010	412	2,00	7,67	138	8	42	96	301	661	444	–	-3,86	-25,00
17	Puits	Cénomanién	Nov. 2010	416,50	2,39	7,22	145	1	54	86	414	51	360	–	-4,07	-28,00
18	Puits	Cénomanién	Nov. 2010	421,20	1,45	7,42	69	2	29	96	177	37	318	–	-4,54	-29,30
19	OB	–	Nov. 2010	–	2,00	8,12	105	1	32	75	372	24	196	–	-2,94	-20,00
20	AB	Cénomanién	Nov. 2010	420	2,46	7,42	138	1	42	118	506	31	276	–	-3,55	-23,80
21	OZ	–	Nov. 2010	–	2,00	8,25	158	1	44	148	620	432	234	–	-3,41	-21,60

^a OB : oued Boumoussa; OK: source Oum Karma; AH : source Ain Hllilfa; AB : source Ain Baida; OZ : oued Zokch

^b Mètres au-dessus du niveau de la mer

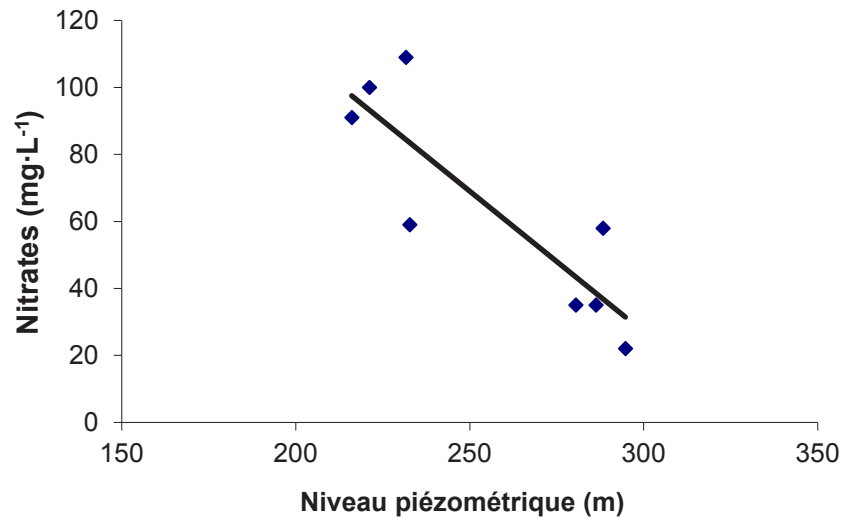


Figure 5. Relation entre les niveaux piézométriques et les concentrations en nitrates.
Relationship between piezometric levels and nitrate concentrations.

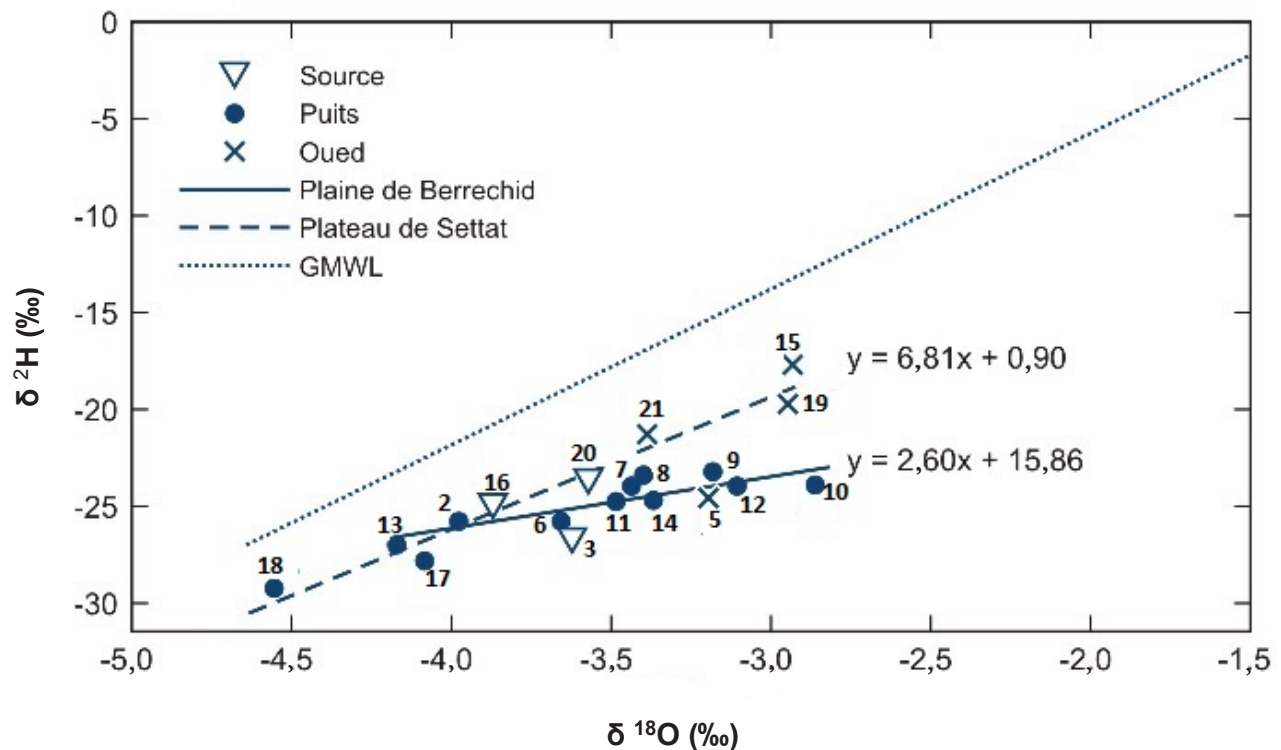


Figure 6. Composition en isotopes stables de l'eau des échantillons étudiés.
Stable isotope composition in the water samples studied.

intéressant de noter que l'enrichissement des eaux souterraines en $\delta^{18}\text{O}$ est plus remarquable pour les eaux à salinité élevée, ce qui reflète l'effet de l'évaporation. Les puits ayant les niveaux piézométriques les plus élevés présentent également les signatures en $\delta^{18}\text{O}$ les plus enrichies, ce qui reflète l'importance de l'évaporation à partir de la zone non saturée. Aussi, faut-il noter que ces eaux voient leur salinité s'accroître à cause de

l'effet anthropique de l'infiltration des eaux usées industrielles à salinité élevée déversées directement dans l'oued Boumoussa.

Le déplacement des points relatifs aux eaux souterraines par rapport à la GMWL offre une réelle estimation de la recharge par les précipitations. Cela a été possible grâce aux analyses isotopiques en appliquant la méthode d'ALLISON

et al. (1984) basée sur celle de CRAIG (1961). La méthode d'ALLISON *et al.* (1984) consiste à estimer la recharge (R en $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) à partir de la déviation des eaux souterraines par rapport à la droite météorique par l'une des formules empiriques soit par le $\delta^{18}\text{O} = 3/\sqrt{R}$ ou le $\delta^2\text{H} = 22/\sqrt{R}$. En appliquant cette méthode, la recharge par les précipitations au niveau de la plaine de Berrechid a été estimée à $3,36 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Dans notre cas, la recharge par les précipitations est faible, ce qui est observé aussi par l'éloignement des points par rapport à la GWML (Figure 6), mais on remarque aussi que les points relatifs à l'oued Boumoussa (15, 19) au niveau du plateau de Settât sont les plus proches de la GWML, ce qui reflète l'apport important par les précipitations à ce niveau; cela a été confirmé par la valeur estimée de la recharge par les précipitations de $20 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ au niveau du plateau de Settât.

YIN *et al.* (2011) ont appliqué cette même méthode d'ALLISON *et al.* (1984) et la méthode du bilan de masse en chlorures pour évaluer la recharge au niveau de l'aquifère crétacé dans le plateau d'Ordos (Chine) et ils ont trouvé que la méthode d'ALLISON *et al.* (1984) donne une valeur de la recharge beaucoup plus faible comparativement avec la valeur évaluée par la méthode de bilan de masse en chlorures. Il est à signaler que la méthode d'ALLISON *et al.* (1984) est une formule empirique développée pour l'aquifère en sable du Bao's groupe (Chine) dans des conditions hydroclimatiques différentes; nonobstant, elle donne une idée sur la dimension de la recharge.

Au niveau de la plaine de Berrechid, la recharge par les eaux d'irrigation est significativement plus importante; cette zone étant irriguée par les eaux souterraines et par les eaux de la rivière contenant les effluents liquides industriels, ce qui est montré par le déplacement des points par rapport à la GWML qui ne peut être qu'un reflet du mélange des différents types de recharge à la nappe (LAROCQUE et PHARAND, 2010; ZOUARI *et al.*, 2011). Ce processus de mélange est aussi observable et indiqué par les flèches sur les triangles anionique et cationique du diagramme de Piper de la figure 4 où les eaux souterraines s'enrichissent en chlorures et en sodium et s'appauvrissent en calcium dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines.

Comme il a été signalé, l'enrichissement des eaux souterraines en $\delta^{18}\text{O}$ est plus remarquable pour les eaux à salinité élevée. Trois groupements de points se distinguent lorsque les conductivités électriques sont comparées aux compositions en $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 7a). Le premier groupement (G1) concerne les échantillons pris dans les puits profonds (Cénomaniens) qui sont moins enrichis en $\delta^{18}\text{O}$, le deuxième groupement (G2) concerne les échantillons pris dans les puits superficiels (Plioquaternaire) plus enrichis en $\delta^{18}\text{O}$ (évaporation et mélange) et le troisième groupement (G3) est relatif aux échantillons

du Plioquaternaire, plus enrichis en $\delta^{18}\text{O}$ et aux valeurs de conductivités électriques les plus élevées. Les puits où les niveaux piézométriques sont les plus élevés présentent les $\delta^{18}\text{O}$ les plus importants (Figure 7b), ce qui reflète une évaporation à partir de la zone non saturée beaucoup plus importante et que l'évaporation est d'autant plus importante que les eaux sont prélevées près de la surface (ADORNI-BRACCISI *et al.*, 2001), ce qui a été rencontré dans de nombreuses études par un enrichissement isotopique affectant les eaux souterraines quand le niveau piézométrique se rapproche de la surface (ALLISON, 1995; IAEA, 1983).

3.3 Modèle conceptuel de l'écoulement

Un modèle conceptuel a été développé à partir de l'ensemble des résultats, et intègre les aspects hydrogéochimiques (Figure 8). Les résultats de l'étude physicochimique montrent que les eaux souterraines présentent des conductivités électriques élevées et que celles-ci sont plus élevées dans les périmètres irrigués par les eaux de la rivière Boumoussa, ce qui indique l'infiltration vers l'aquifère d'une eau de surface formée principalement de rejets industriels très chargés en contaminants. La présence de nitrates dans les puits à niveau piézométrique bas confirme la possibilité d'une recharge de l'aquifère régional par une eau ayant percolé à travers le sol agricole fertilisé. Aussi la lithologie des formations traversées contribue à donner un faciès particulier aux eaux souterraines. Trois types de faciès sont distingués :

- groupe (I) à faciès sodique bicarbonaté sulfaté et chloruré, est composé des eaux de l'oued Boumoussa et de la source Oum Karma au niveau de la plaine;
- groupe (II) à faciès sodique chloruré, est composé de puits captant le Plioquaternaire;
- groupe (III) à faciès calcique magnésien sodique et chloruré correspond aux puits situés les plus à l'aval sur la plaine et les plus profonds et les puits et sources situés sur le plateau de Settât qui captent le Cénomaniens marno-calcaire.

De même, le modèle proposé peut aider à une meilleure gestion de la ressource en eau dans cette région par une revalorisation des eaux épurées de la STEP dans les besoins de l'industrie et de l'agriculture et par une utilisation des eaux souterraines dans les besoins en approvisionnement en eau potable.

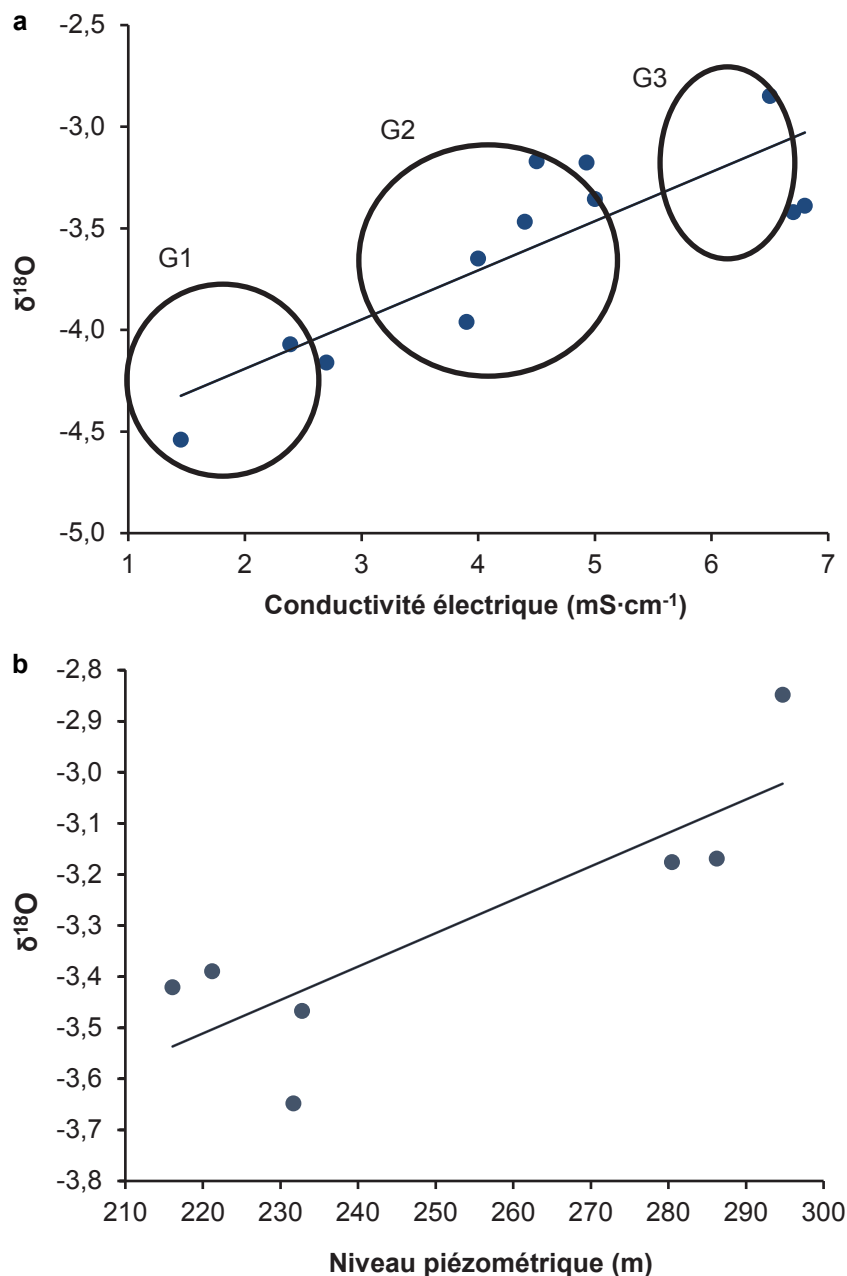


Figure 7. Relations entre les compositions en $\delta^{18}\text{O}$ et a) les conductivités électriques et b) les niveaux piézométriques. G1 : échantillons pris dans les puits profonds (Cénomanien) qui sont moins enrichis en $\delta^{18}\text{O}$; G2 : échantillons pris dans les puits superficiels (Plioquaternaire) plus enrichis en $\delta^{18}\text{O}$ (évaporation et mélange) et G3 : échantillons du Plioquaternaire, plus enrichis en $\delta^{18}\text{O}$ et aux valeurs de conductivité électrique les plus élevées.

Relationship between compositions in $\delta^{18}\text{O}$ and a) electrical conductivity and b) piezometric levels. G1: samples taken in deep wells (Cenomanian) which are less enriched in $\delta^{18}\text{O}$; G2: samples taken from superficial wells (Plioquaternary) enriched in $\delta^{18}\text{O}$ (evaporation and mixing) and G3: Plioquaternary samples, more enriched in $\delta^{18}\text{O}$ and with the highest electrical conductivity.

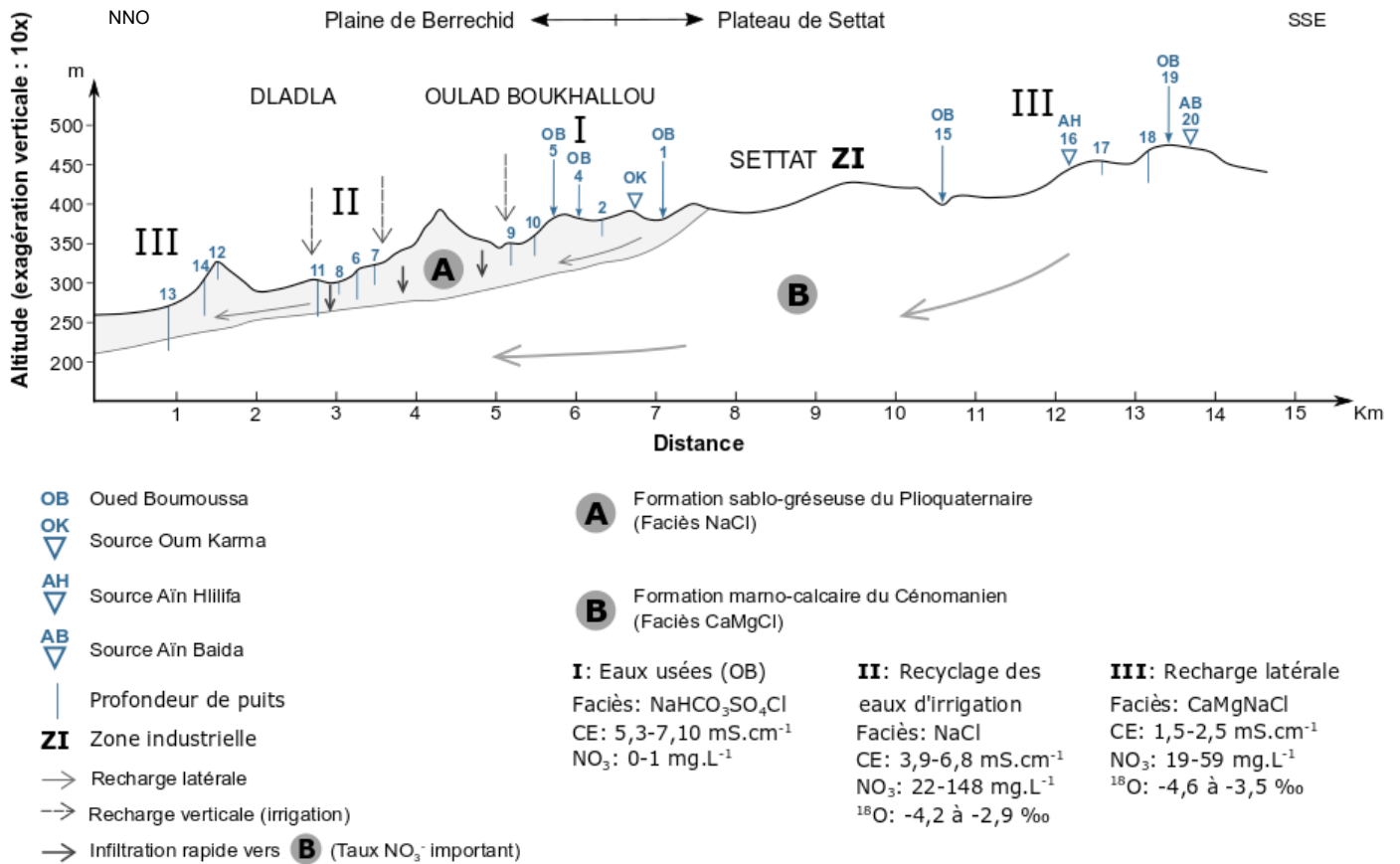


Figure 8. Coupe schématique du modèle conceptuel de circulation hydrogéologique de la zone d'étude.
Schematic cross-section representing the conceptual hydrogeological model of the study area.

4. CONCLUSION

La croissance économique et démographique de la région de Settat a été accompagnée par une augmentation des débits des effluents liquides urbains et industriels qui sont directement évacués dans l'oued Boumoussa et qui ont induit une détérioration de la qualité de ces eaux superficielles et souterraines. L'objectif de ce travail était de réaliser une synthèse des données physicochimiques et isotopiques afin de proposer un modèle conceptuel de circulation des eaux au niveau de l'aquifère plioquaternaire superficiel de Settat au Maroc, notamment pour déceler l'origine des apports à l'aquifère provenant de la surface et de l'aquifère sous-jacent.

Les résultats confirment le comportement hydrodynamique et hydrogéochimique des eaux souterraines. L'enrichissement des eaux souterraines en $\delta^{18}\text{O}$ est plus remarquable pour les eaux à salinité élevée, ce qui reflète l'effet de l'évaporation. Les puits ayant les niveaux piézométriques les plus élevés présentent également les signatures en $\delta^{18}\text{O}$ les plus enrichies, ce qui reflète l'importance de l'évaporation à partir de la zone non saturée. Aussi faut-il noter que ces eaux voient aussi leur salinité s'accroître à cause de l'effet anthropique de l'infiltration des

eaux usées industrielles à salinité élevée déversées directement dans l'oued Boumoussa. Au niveau de la nappe de Settat, la recharge naturelle par les précipitations est faible, ce qui se traduit par l'alignement des compositions isotopiques de l'eau souterraine sur une droite de pente inférieure à celle de la droite météorique mondiale. Le déplacement des points par rapport à celle-ci peut aussi être un reflet du mélange de la recharge naturelle avec la recharge par les eaux d'irrigation (provenant de la rivière Boumoussa et des eaux souterraines surtout à l'aval de la zone d'étude au niveau de la localité Dladla) et par les eaux provenant de l'aquifère cénomanien du plateau de Settat.

Le modèle proposé peut aider à une meilleure gestion de la ressource en eau par une revalorisation des eaux épurées de la STEP dans les besoins de l'industrie et de l'agriculture et par une utilisation des eaux souterraines provenant du Cénomanien, vu leur meilleure qualité, dans les besoins en eau potable.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier vivement le Centre de recherche pour le développement international du Canada (CRDI) et la Fondation Ford (États-Unis) pour le financement du projet Écosanté n°100771-004 entre l'Institut National de Recherche Agronomique de Settat (INRA) et le CRDI (Évaluation de l'impact de l'utilisation des eaux usées en agriculture sur l'écosystème et sur la santé humaine de la communauté Mzamza [Settat, Maroc]) et l'Agence Espagnole de Coopération Internationale et Développement (AECID) pour le financement du projet n° A/020106/08 entre la Faculté des Sciences et Techniques de Settat et l'Institut de l'Eau de l'Université de Grenade (Estudio de la contaminación de suelos y de aguas subterráneas por aguas residuales industriales utilizadas en agricultura [caracterización experimental en el municipio de Mzamza, Settat, Marruecos]). Nous remercions également le docteur Hanno Meyer, de l'Alfred Wegener Institut (Potsdam, Allemagne) et le professeur Florent Barbecot de l'UQAM (Québec, Canada) pour la réalisation des analyses isotopiques. Nous tenons aussi à remercier vivement le réviseur pour toutes les suggestions et les commentaires qui ont poussés notre réflexion sur le sujet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADORNI-BRACCISI A., S. ACUTIS, S. MERLO et G.M. ZUPPI (2001). Application des techniques physiques, géochimiques et isotopiques pour l'évaluation de l'infiltration sous climat tempéré. *Rev. Sci. Eau*, 14, 243-263.

ALLISON G.B. (1995). Stable isotope in soil and water studies. *Symposium international à la mémoire de Jean Charles Fontes sur l'hydrologie et la géochimie isotopique*. 1-2 juin 1995, Paris, France, Comptes rendus, pp. 22-38.

ALLISON G.B., C.G. BARNES, M.W. HUGHES et F.W.J. LEANEY (1984). Effect of climate and vegetation on oxygen-18 and deuterium profiles in soils. *Isotope Hydrology 1983. IAEA Symposium 270*, septembre 1983, Vienne, Autriche, pp. 105-123.

BANTON O. et L.M. BANGOY (1997). *Hydrogéologie : multiscience environnementale des eaux souterraines*. Universités Francophones, PUQ/AUPELF, France, 460 p.

BOUABDLI L., N. SAIDI, S. M'RABET, J. ESCARRE et M. LEBLANC (2005). Oued Moulouya : vecteur de transport des métaux lourds (Maroc). *Rev. Sci. Eau*, 18, 199-213.

BOUCHAOU L., J.L. MICHELOT, A. VENGOSH, Y. HSISSOU, M. QURTOBI, C.B. GAYE, T.D. BULLEN et G.M. ZUPPI (2008). Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco. *J. Hydrol.*, 352, 267-287.

BOUCHAOU L., J.L. MICHELOT, M. QURTOBI, N. ZINE, C.B. GAYE, P.K. AGGARWAL, H. MARAH, A. ZEROUALI, H. TALEB et A. VENGOSH (2009). Origin and residence time of groundwater in the Tadmra basin (Morocco) using multiple isotopic and geochemical tools. *J. Hydrol.*, 379, 323-338.

CELLE-JEANTONA H., K. ZOUARI, Y. TRAVIA et A. DAOUD (2001). Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 333, 625-631.

CLARK I. et P. FRITZ (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, New York (NY), États-Unis, 328 p.

CRAIG H. (1961). Isotope variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.

DERE C., I. LAMY, F. VANOORT, D. BAIZE et S. CORNU (2006). Reconstitution des apports en éléments traces métalliques et bilan de leur migration dans un Luvisol sableux soumis à 100 ans d'irrigation massive par des eaux usées brutes. *C. R. Geoscience*, 338, 565-573.

EL AMRANI PAAZA N., S. KHOLTEI, J. EL ASLOUJ et A. BOUZIDI (2008). Détérioration de la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza suite à l'irrigation à partir des rejets polluants domestiques et industriels de la ville de Settat (Maroc). *Les 33^{èmes} journées scientifiques du GFNH : Impact de l'usage du sol sur les ressources en eau souterraine*, 19-20 novembre 2008, Avignon, France, Bulletin du GFHN, N° 54, pp. 45-50.

EL AMRANI PAAZA N., A. ROCHDI, J. BENAVENTE, V.M. ROBLES, C. ALMECIJA, M.C. HIDALGO, W. MARTIN et A. BOUZIDI (2010). Soil and groundwater contamination by irrigation with industrial wastewater (Settat, Morocco). *Congrès international Gestion intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement durable (GIRE3D)*, mars 2010, Agadir, Maroc, Recueil des résumés, 218 p.

EL ASLOUJ J., S. KHOLTEI, N. EL AMRANI PAAZA et A. HILALI (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Rev. Sci. Eau*, 20, 309-321.

- EL ASSAOUI N. (2017). *Contribution à l'étude méthodologique de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines: cas de la nappe de Berrechid*. Thèse de doctorat, Univ. Hassan II, Maroc, 167 p.
- EL BOUQDAOUI K. (1995). *Étude géologique et géotechnique de la ville de Settât. Cartographie géotechnique et substances utiles de la province de Settât*. Thèse de doctorat, Univ. Mohammed V, Maroc, 107 p.
- EL FOUNTI L. (2000). *Évaluation de la qualité physico-chimique et métallique dans le bassin versant de la Moulouya*. Mémoire de DEA, Univ. Ibn Tofeïl, Maroc, 59 p.
- EL KETTANI S., E.M. AZZOUZI et A. MAATA (2006). Prévalence de *Giardia intestinalis* chez une population rurale utilisant les eaux usées à des fins agricoles à Settât, Maroc. *Médecine et maladies infectieuses*, 36, 322-328.
- FEHDI C.H., A.E.K. ROUABHIA, F. BAALI et A. BOUDOUKHA (2009). The hydrogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, Northeastern Algeria. *Environ. Geol.*, 58, 1611-1620.
- FONTES J.C. (1980). Environmental isotopes in groundwater hydrology. Dans : *Handbook of environmental isotope geochemistry*. FRITZ P et J.C. FONTES (éd.), Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 545 p.
- JEMALI O. et A. KEFATI (1994). *Réutilisation des eaux usées au Maroc*. Forum de la gestion et de la demande en eau. Ministère de l'Agriculture, Rabat, Maroc.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (1983). *Guidebook on nuclear techniques in hydrology*. IAEA Technical Reports Series, N° 91, Vienne, Autriche, 439 p.
- LAAMARI A., S. EL KETANI, A. BOUZIDI et A. TANJI (2004). *Évaluation de l'impact de l'utilisation des eaux usées en agriculture sur l'écosystème et la santé humaine de la communauté Mzamza, Settât, Maroc*. Projet INRA/CRDI N° 100771-004, rapport d'activité, septembre 2002 - avril 2004, 118 p.
- LAROCQUE M. et M.C. PHARAND (2010). Dynamique de l'écoulement souterrain et vulnérabilité d'un aquifère du piémont appalachien (Québec, Canada). *Rev. Sci. Eau*, 23, 73-88.
- NORMES MAROCAINES (2002). *Bulletin officiel N° 5062, 30 Ramadan 1423 fixant les normes de potabilités à la consommation humaine*. Rabat, Maroc, 3 p.
- ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE (OMS) (1989). *L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquiculture : recommandations à visées sanitaires*. OMS, Genève, Suisse, 84 p.
- RÉGIE AUTONOME DE DISTRIBUTION DE L'EAU ET DE L'ÉLECTRICITÉ DE LA CHAOUIA (RADEEC) (2006). *Rejets urbains de la ville de Settât*. Rapport interne, Maroc, 8 p.
- RÉGIE AUTONOME DE DISTRIBUTION DE L'EAU ET DE L'ÉLECTRICITÉ DE LA CHAOUIA (RADEEC) (2007). *Étude et assistance technique pour la sensibilisation des industriels de la ville de Settât*. Rapport interne, Maroc, 79 p.
- STRAUCH G., J. OYARZUN, M. FIEBIG-WITTMACK, E. GONZALEZ et S.M. WEISE (2006). Contributions of the different water sources to the Elqui River runoff (northern Chile) evaluated by H/O isotopes. *Isot. Environ. Healt. S.*, 42, 303-322.
- TAUPIN J.D., L.E. TORO et M.C. VARGAS (2009). Étude géochimique et isotopique des aquifères dans la zone de Maicao (Colombie). *Hydrolog. Sci. J.*, 54, 538-555.
- TRABELSI R., K. ZOUARI et M.N. OUESLATI (2005). Contribution des méthodes hydrochimique et isotopiques à la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de Takelsa (Cap Bon) Tunisie. *2^{ème} Congrès Méditerranéen Ressources en eau dans le bassin Méditerranéen (WATMED 2)*, 14-17 novembre 2005, Marrakech, Maroc, Recueil des résumés, 202 p.
- YIN L., G. HOU, X. SU, D. WANG, J. DONG, Y. HAO et X. WANG (2011). Isotopes (δD and $\delta^{18}O$) in precipitation, groundwater and surface water in the Ordos plateau, China: implications with respect to groundwater recharge and circulation. *Hydrogeol. J.*, 19, 429-443.
- ZOUARI K., R. TRABELSI et N. CHKIR (2011). Using geochemical indicators to investigate groundwater mixing and residence time in the aquifer system of Djefara of Medenine (Southeastern Tunisia). *Hydrogeol. J.*, 19, 209-219.