

SEAWATER PROBLEM IN THE ALLUVIAL COASTAL AQUIFER OF NADOR, TIPAZA, ALGERIA

A. Bouderbala^{1*}, B. Remini², H. A. Saaed³, A. Younsi⁴

¹Faculté des Sciences de la Nature et de la Terre, Université de Khemis Miliana, Algérie

²Faculté des Sciences de l'eau, Université Saad Dahlab, Blida

³Faculté d'architecture et de génie civil, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef

⁴Laboratoire des Géosciences et techniques de l'Environnement, Faculté des Sciences,
Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, Maroc

Received: 01 February 2021 / Accepted: 24 July 2021 / Published online: 01 September 2021

ABSTRACT

This work focuses to the study of the coastal aquifer of of Tipaza in the north of Algeria, for highlights mechanisms of potential seawater intrusion into groundwater. Tipaza aquifer has been overexploited for irrigation and water supply, which caused a negatively impacts on its water quality. To investigate these impacts, many tools have been carried out as: monitoring of piezometric level and physico-chemical analysis of 24 wells from 2008 to 2012 and pumping tests.

The piezometric map shows the existence of zero meter level inside the plain; which making this area vulnerable to seawater intrusion, where isovalue curves of some chemical parameters are in increasing towards the sea. Results show also a high concentration gradient of some parameters in the first two kilometers, at $1 \text{ mS.cm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ for EC and 600 to 900 $\text{mg.L}^{-1}.\text{km}^{-1}$ for sodium and chlorides respectively.

The hydrochemical study confirme the hypothesis of seawater intrusion in the coastal aquifer of Nador.

Keywords: Coastal aquifer, Seawater intrusion, Piezometry, hydrochemical, Nador plain.

Author Correspondence, e-mail: bouderbala.aek@gmail.com

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v13i3.5>



1. INTRODUCTION

De manière générale, les problèmes posés par l'exploitation d'un aquifère côtier sont complexes car ils associent la notion de quantité à celle de la qualité, d'autant plus que dans ces zones, la demande en eau est en général forte pour l'irrigation et pour l'alimentation [1].

La région étudiée fait partie de ces zones côtières, où l'approvisionnement en eau potable et d'irrigation se fait à partir des eaux de surface et souterraines. Ces dernières forment une nappe généralement captive, circulant dans un aquifère plio-quadernaire, dont l'alimentation s'effectue principalement par les eaux de pluie [2-4]. L'essor démographique et l'intensification des activités socio-économiques nécessitent des besoins en eau de plus en plus croissants. Cela a provoqué un abaissement du niveau de la nappe, dont les eaux deviennent de plus en plus chargées en sels et nitrates. Ces derniers peuvent atteindre par endroit et selon la saison des valeurs anormalement élevées, de 5,5 mS/cm de conductivité électrique, de 1600 et 2500 mg/l respectivement en sodium et chlorures. Ces fortes salinités sont observées dans les deux premiers kilomètres de la Méditerranée, surtout pendant la saison sèche où l'on intensifie l'exploitation de l'aquifère [5]. Elles seraient dues à une potentielle intrusion marine.

Les objectifs de ce travail sont d'évaluer le degré et la nature de la salinité des eaux souterraines étudiées, de déterminer les sources principales de cette salinité, de localiser les secteurs les plus minéralisés et d'identifier les facteurs déterminants dans l'évolution de la minéralisation de la nappe plio-quadernaire. Pour répondre à ces objectifs et résoudre la problématique posée, nous avons combiné plusieurs outils d'étude et réalisés les travaux suivants : suivis semestriels de la piézométrie et de l'hydrochimie de 24 puits depuis 2008 jusqu'à 2012, essais de pompage, 52 sondages électriques verticaux effectués en 2011 et répartis en 11 profils transversaux et plusieurs coupes géoélectriques longitudinales,

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La plaine de Nador fait partie de la grande unité littorale appelée le Sahel d'Alger. Elle est située à 75 km environ à l'Ouest d'Alger. Cette zone est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud et à l'Est par les pentes du Sahel et à l'Ouest par Djebel Chenoua (Fig. 1). Elle est comprise entre les coordonnées Lambert $x_1 = 469.8$ km et $x_2 = 477.2$ km, et $y_1 = 361.5$ km et $y_2 = 367.2$ km).

Cette région est à vocation essentiellement agricole, avec des cultures assez variées telles que les cultures maraichères, les agrumes, les fourrages, les arboricultures, les viticultures et les légumes secs. Elle a aussi un caractère touristique avec des équipements et infrastructure le

long du littoral (patrimoine historique, monuments romains et grecques, plages, baies, falaises,...).

Actuellement, la région connaît aussi un essor démographique important, elle comporte environ 45 000 habitants répartis dans trois villes (Tipaza, Nador et Chenoua plage) et plusieurs localités (Bouizouine, Bourouis, Ettouil, Ouzakou,...).

L'essor démographique et l'intensification des activités socio-économiques (agricoles, touristiques, urbaines,...) nécessitent des besoins en eau de plus en plus croissants. Il est à souligner que l'approvisionnement en eau se fait principalement à partir de l'exploitation des eaux souterraines et des eaux de barrage.

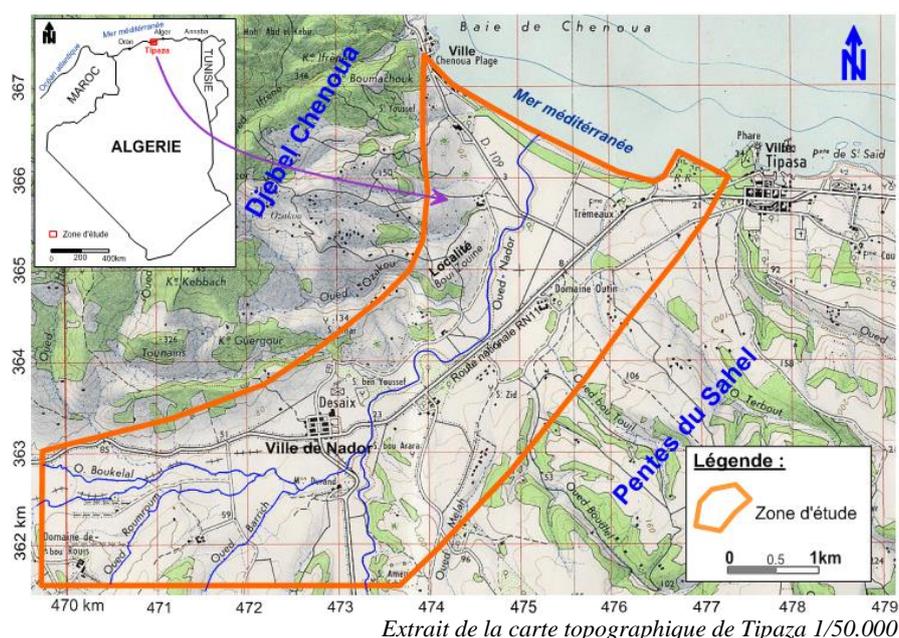


Fig. 1. Situation géographique de la zone d'étude

Sur le plan hydroclimatologique, la région étudiée est traversée par l'Oued Nador, qui a donné son nom à la plaine. C'est un cours d'eau à écoulement quasi permanent vers la mer méditerranéenne. Il est à noter que toutes les eaux usées de la région étudiée et des localités situées en amont de celle-ci, sont déversées dans cet oued.

A l'échelle de la région d'étude, la moyenne annuelle des précipitations, calculée à partir des données de la station de Boukourdane (période 1988-2011), est de 540 mm. Quant à la température moyenne enregistrée à cette même, elle est de 17.8 °C.

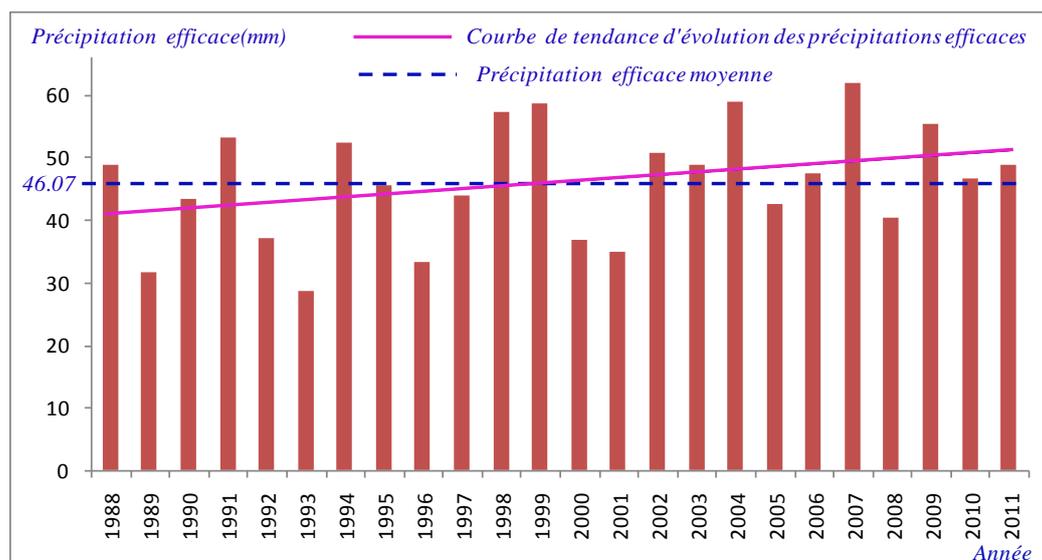


Fig. 2. Variation annuelle des précipitations efficaces (période 1988-2011, station de Boukourdane)

L'évapotranspiration a été estimée par la méthode de Thornthwaite, principalement utilisée en climat semi-aride (cas de notre zone) et basée sur la notion de réserve facilement utilisable (RFU). Cette méthode nous a permis d'estimer l'évapotranspiration réelle à une valeur de 424.06 mm, soit 78.53 % des précipitations moyennes annuelles ($P_{\text{moy.annuel}}$). L'estimation du ruissellement a été effectuée par la formule de Tixeront-Berkaloff, vu le manque de données relatives au débit écoulé en fonction du temps, pour faire la séparation du ruissellement superficiel et l'écoulement de base. L'application de cette formule donne une valeur de 69.9 mm, soit environ 12.94 % des $P_{\text{moy.annuel}}$. L'estimation de l'infiltration efficace (précipitations ou pluies efficaces), a été effectuée à partir du bilan hydrologique dont le calcul a donné une moyenne annuelle de 46.07 mm, soit environ 8.53 % des $P_{\text{moy.annuel}}$ (période 1988-2011).

La figure 2 montre l'évolution interannuelle (1988 à 2011) de la lame d'eau infiltrée (précipitations efficaces) et elle a permis d'identifier deux grandes périodes : une période allant de 1988 à 1998, où l'infiltration efficace est généralement inférieure à la moyenne et une période de 1999 à 2011, plus humide que la première, avec des précipitations efficaces globalement supérieures à la moyenne de 46.07 mm. Cette variation pluviométrique montre une tendance générale vers l'accroissement. Elle montre aussi que l'infiltration efficace varie entre un minimum de 28.54 mm et un maximum de 61.92 mm. Elle en ressort que les pluies efficaces permettant la recharge la plus importante de la nappe d'eau souterraine étudiée, ont été observées en 2007. Il est à signaler ici que cette recharge naturelle de l'aquifère étudié se fait principalement durant l'hiver et le printemps, au niveau des affleurements aquifères. Ces

derniers remontent à la surface du côté de Djebel Chenoua et des pentes du Sahel, là où le substratum se rapproche du sol.

Du point de vue hydrogéologique, les formations géologiques de la région étudiée se présentent du bas vers le haut [6], comme suite (Fig. 3) :

- la série pliocène (Tertiaire) est constituée par des terrains généralement marno-argileux d'âge plaisancien, surmontés par des strates grésocalcaires d'âge astien du Pliocène supérieur. D'une grande épaisseur et d'une perméabilité très faible, les terrains marno-argileux forment le substratum de l'aquifère astien sus-jacent. Celui-ci se caractérise par une bonne perméabilité d'interstices et de fissures, pouvant atteindre $6,83 \cdot 10^{-4}$ m/s, une épaisseur saturée de 46 m et une transmissivité de l'ordre de $2 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Toutes ces caractéristiques font de l'aquifère astien, le réservoir d'eau le plus important et le plus sollicité à l'échelle de toute la région d'étude ;

- la série quaternaire (Calabrien-Villafranchien) est constituée par des dépôts marins grésoconglomératiques moyennement épais (environ 10 m), surmontés par des terrains généralement argileux épais (pouvant atteindre 30 m). Les dépôts grésoconglomératiques présentent une forte perméabilité d'interstices (de l'ordre de 10^{-3} m/s) et une productivité hydrogéologique de l'ordre de 10^{-2} m²/s. Quant aux terrains argileux très peu perméables, ils constituent une sorte de couverture étanche, empêchant toute infiltration d'eau vers les niveaux aquifères sous-jacents. Cette série repose en discordance sur l'astien grésocalcaire et elle est surmontée par des sols limono-sableux, perméables, légers à travailler et fertiles.

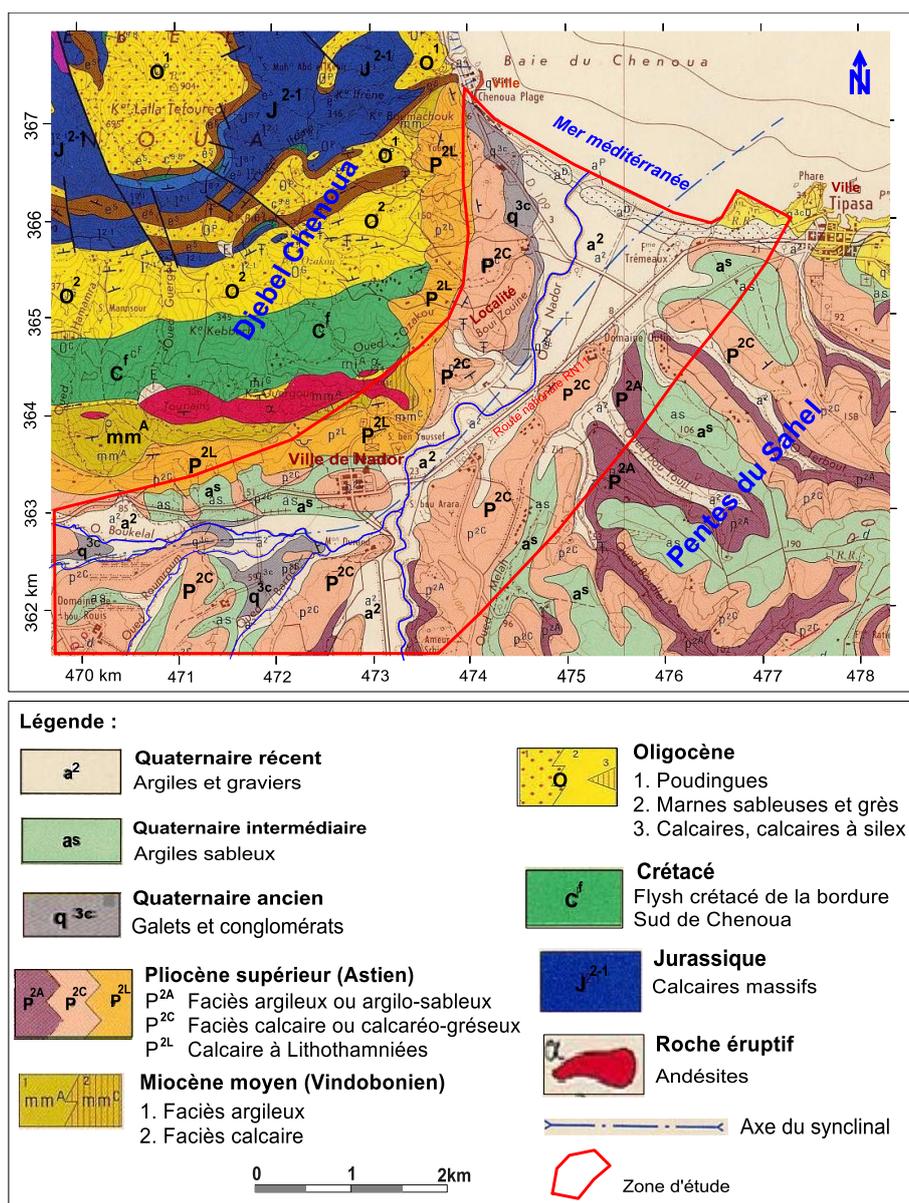


Fig. 3. Carte géologique de la zone d'étude

Il ressort de cette étude géologique et hydrogéologique que l'aquifère de la zone étudiée est bicouche. Il est constitué par les terrains astiens et les niveaux alluviaux (gréso-conglomératiques) du Quaternaire basal. A cet effet, on l'appelle l'aquifère plio-quaternaire, dont l'épaisseur est de l'ordre de 60 m. Il s'agit d'un aquifère renfermant une nappe généralement captive (en charge mais non artésienne), puisqu'il est coiffé, dans son ensemble, par les terrains argileux épais et imperméables du Quaternaire récent. Le substratum de cet aquifère plio-quaternaire correspond aux terrains marno-argileux du Pliocène inférieur, il est fortement plissé, constituant un synclinal penté vers la mer (de direction générale NNE-SSW).

Cela met le biseau d'eau salée en contact direct avec les eaux souterraines et favoriserait un éventuel phénomène d'intrusion marine vers l'aquifère [5].

En ce qui concerne l'analyse piézométrique, nous avons choisi 24 points d'eau, bien répartis sur toute la région étudiée. Les relevés piézométriques ont été effectués de 2008 à 2012, à raison de deux fois par an, aux mois d'avril et de septembre [5]. Dans ce travail, nous n'allons analyser que la carte piézométrique d'avril 2012 (Fig. 4).

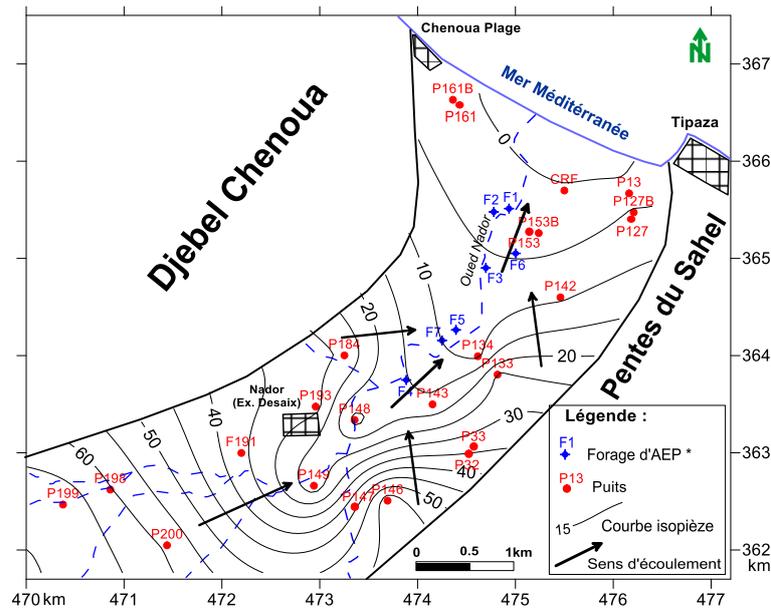


Fig. 4. Carte piézométrique de la nappe plio-quaternaire (Avril 2012)

Cette carte qui représente la distribution spatiale de la charge hydraulique (H en m) de l'aquifère étudié, montre que les lignes d'écoulements d'eau souterraine convergent vers l'axe du sillon synclinal qui constitue l'axe de drainage principal de la nappe plio-quaternaire, surtout dans la moitié amont de la zone d'étude. Dans la partie aval, la nappe s'écoule du Sud Ouest vers le Nord Est, vers la Méditerranée, son exutoire naturel. Concernant la relation hydraulique « nappe-cours d'eau », il est à noter ici que les isopièzes sont plus ou moins perpendiculaires au tracé du cours d'eau (Oued Nador), ce qui dénote l'absence de communication hydraulique entre les deux plans d'eau. Cette carte montre aussi que les isopièzes sont parallèles à la ligne du rivage. Ceci dénote une communication hydraulique "aquifère-Méditerranée".

L'alimentation de la nappe plio-quaternaire se fait exclusivement par l'infiltration des eaux pluviales au niveau des affleurements des terrains aquifères. L'examen des résultats sur la profondeur de la nappe montre que celle-ci s'écoule à de faibles profondeurs de la surface au

niveau de ces affleurements, en moyenne de 2 m. Ce qui semble favoriser l'alimentation de la nappe, devenant libre, au niveau de ces endroits. Quant à l'alimentation de la nappe par l'oued Nador, elle est en général nulle, vu que le lit de ce cours d'eau est colmaté et imperméable et que les isopièzes sont perpendiculaires au tracé de l'oued Nador. Aussi, il est à signaler ici qu'au niveau des affleurements des terrains aquifères, principalement au niveau des secteurs Nord Ouest de la zone étudiée, l'alimentation de la nappe se ferait aussi par l'infiltration du surplus des eaux d'irrigation. Celles-ci correspondent à des eaux de l'oued Nador et à des eaux usées épurées de la station de Chenoua.

D'une manière générale, plus l'intensité et la fréquence des pompages des eaux souterraines sont intenses, plus la diminution des débits souterrains et l'augmentation de la minéralisation totale des eaux de puits et des forages seraient prononcées. Ainsi dans la zone étudiée, nous assistons actuellement à une réduction des débits d'exploitation, qui sont passés de 80 l/s pendant les années 90 à environ 20 l/s en 2012. Ceci semble augmenter les réserves d'eau souterraine, refouler l'interface "eau douce - eau salée" vers la mer et diminuer la salinité de la nappe étudiée

En conclusion, les réserves d'eau souterraine, la profondeur du niveau piézométrique et la salinité de la nappe dépendent étroitement des débits d'entrée d'eau (pluies efficaces et surplus d'eau d'irrigation) et de ceux de l'exploitation (débits des pompages). Le rapport des entrées et des sorties d'eau déterminera l'ampleur de l'étalement du biseau d'eau salée à l'intérieur du continent. Dans le cadre d'une vision dynamique de l'évolution de la salure de l'aquifère étudié, nous allons simuler l'ensemble des entrées et sorties d'eau de la nappe en relation avec sa salinité, en prenant comme cas concret le puits P153. Le tableau 1 montre cet essai de vision dynamique entre l'année 1993, année la plus sèche, et celle de 2007, année la plus pluvieuse.

Tableau 1. Evolution interannuelle de la piézométrie et de la conductivité électrique du puits P153

Année	Précipitation annuelle/Infiltration efficace (mm)	Débit d'exploitation dans la zone (l/s)	Niveau de la nappe/sol (m)	Conductivité électrique (mS/cm)
1993	334,6 / 28,5	80	- 0,2	7,2
2007	726 / 61,9	20	+ 2,8	4,26

3. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Des suivis périodiques d'analyses physico-chimiques (pH, conductivité électrique, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+}) de 24 puits bien répartis sur toute la zone d'étude (Fig. 4), ont été réalisés de 2008 à 2012, à raison de deux campagnes par an (avril et septembre). Les deux premiers paramètres ont été mesurés immédiatement sur le terrain. Les autres ont été analysés selon les normes AFNOR [7], au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Blida (ANRH), dans les 24 heures qui suivent le prélèvement. L'analyse des Cl^- et HCO_3^- a été faite par volumétrie. Celle de Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} a été effectuée par spectrométrie d'absorption atomique. Celle des NO_3^- et SO_4^{2-} a été réalisée par colorimétrie. La fiabilité de tous les résultats obtenus a été vérifiée à l'aide de la balance ionique de l'eau. Celle-ci montre des pourcentages compris entre -5 et +5 %, ce qui correspond à une fiabilité acceptable pour l'ensemble de nos résultats chimiques.

Dans la suite de cet article, nous n'allons interpréter que les résultats moyens de l'année 2012.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats d'analyses physico-chimiques (Tableau 2) montrent que les conductivités électriques s'échelonnent entre 1,51 et 5,5 mS/cm, les chlorures entre 173 et 2502 mg/l, le sodium entre 97 et 1610 mg/l. Ceci montre que la minéralisation totale des eaux souterraines étudiées, est déterminée surtout par les chlorures et le sodium (faciès chloruré sodique). Sachant que l'origine principale de ces deux ions est marine, ceci semble dénoter une contamination des eaux souterraines côtières par des invasions marines. Ces deux ions peuvent aussi provenir de la dissolution des cristaux de sels de NaCl, constituant les embruns marins. Après leur dépôt sur les sols côtiers, ces cristaux marins, très solubles dans l'eau, sont entraînés jusqu'à la nappe, par les eaux pluviales et d'irrigation.

Concernant l'aspect qualitatif des eaux souterraines, fortement utilisées dans l'alimentation quotidienne surtout des populations rurales, le tableau montre aussi que la majorité des puits analysés dépassent les normes OMS de potabilité [8]: 100% des puits ont une conductivité électrique supérieure à 1,5 mS/cm, 83,4 % dépassent la norme des chlorures, 62,5 % excèdent la norme du sodium et 29,2 % dépassent la norme des nitrates. La présence de ces derniers semble indiquer une contamination de la nappe par les fertilisants azotés utilisés en agriculture. Quant à celle des chlorures et sodium, elle indique plutôt une certaine salinisation de la nappe par des entrées d'eau marine. La consommation humaine de ces eaux chargées en

sels et nitrates pourrait provoquer un certain nombre de maladies (méthémoglobinémie, cancers de l'estomac ou du foie, tension artérielle,...).

Pour la qualité de l'eau souterraine, utilisée dans l'irrigation des cultures, nous avons reportés les 24 puits suivis sur le digramme de Riverside [9].

Tableau 2. Résultats moyens des analyses physico-chimiques des 24 puits et leur potabilité

	CE (mS/cm)	pH	NO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
Maximum	5,500	7,6	90	586	1350	2502	1610	355	243	7,8
Minimum	1,510	6,7	4	360	113	173	97	32	150	0
Moyenne	2,527	7,2	40,5	446,8	485,9	743,9	445,9	133,8	182,7	2,8
Norme OMS	1,500	6,5-8,5	50	--	200	250	175	150	200	12
% des puits dépassant la norme	100	0	29.2	--	45.8	83.4	62.5	50	20.8	0

La figure 5 montre que les eaux des 24 puits appartiennent aux classes C3S1, C4S3, C4S4 et C5S4 (Fig. 5). Les puits situés dans les 2 premiers kilomètres du rivage, appartiennent aux classes C4S3, C4S4 et C5S4 (environ 33,33 % des points d'eau). Ceci indique que les eaux de ces puits sont fortement minéralisées et elles ne peuvent convenir qu'à des cultures bien tolérantes aux sels. Cette forte minéralisation semble être liée à des intrusions marines surtout dans les secteurs côtiers de la partie Nord Ouest de la zone d'étude. Le reste des puits, soit 66,67 %, appartiennent à la classe C3S1. Ils sont d'une qualité moyenne, utilisables sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité. Ils sont situés au-delà de 2,5 km par rapport à la mer.

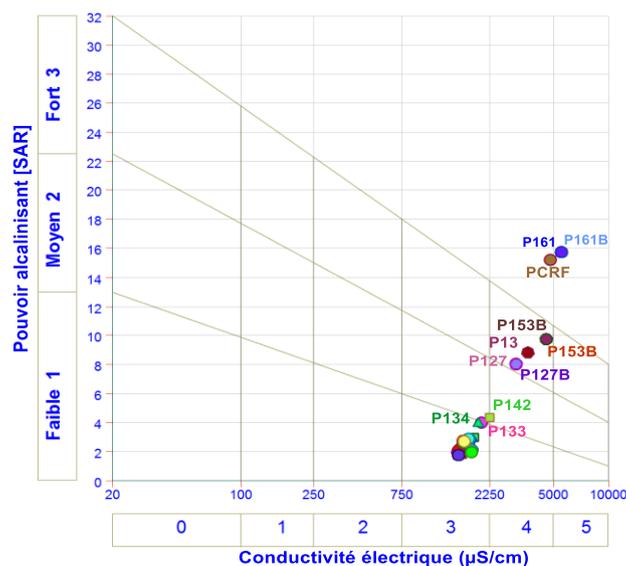


Fig. 5. Représentation des 24 puits suivis sur le diagramme de Riverside (2012)

4.1 Cartes chimiques

Toutes les cartes chimiques dressées depuis 2008 montrent à peu près la même allure, avec cet accroissement des valeurs de l'intérieur de la plaine vers la mer pour atteindre leur maximum à proximité immédiate de celle-ci.

La carte d'iso-conductivité de la figure 6 qui présente la distribution spatiale de la conductivité électrique à l'échelle de toute la zone d'étude, montre que les fortes salinités sont localisées dans les secteurs côtiers situés à moins de deux kilomètres de la mer surtout ceux de la partie Nord Ouest. Dans ces zones, la conductivité électrique (CE à 25 °C) est largement supérieure à 1,5 mS/cm et peut dépasser par endroit et selon la saison, la valeur de 4 mS/cm. Dans les secteurs côtiers, les courbes d'isovaleurs des conductivités électriques accusent un resserrement très marqué à proximité directe de la côte, se traduisant par un gradient de concentration particulièrement élevé dans les deux premiers kilomètres de la mer (de l'ordre de 1 mS/cm/km).

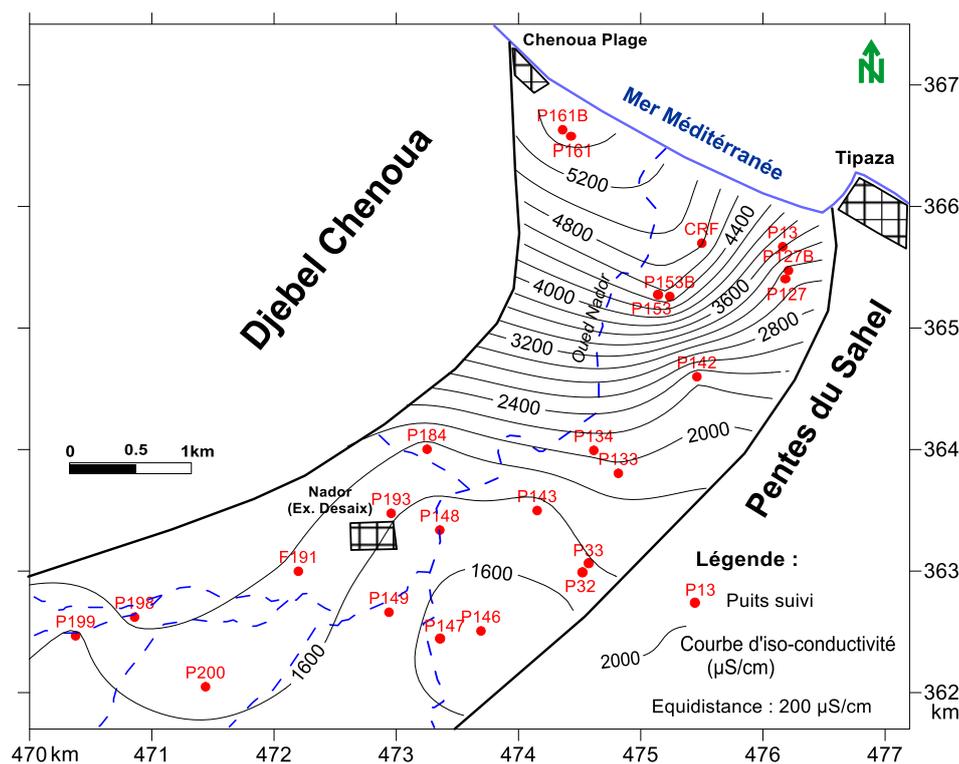


Fig. 6. Carte de distribution spatiale de la conductivité électrique de l'eau (2012)

Les fortes conductivités sont mesurées dans les secteurs côtiers de la partie Nord Ouest où l'on a observé l'existence de l'isopièze 0 m à l'intérieur des terres (Fig. 4) et où les eaux souterraines sont exploitées à une faible profondeur. Cet accroissement important de la CE en

direction de la mer, montre que la source potentielle de ces fortes salinités est liée principalement à des intrusions marines. Celles-ci sont favorisées par la structure du substratum du Pliocène inférieur qui plonge sous le 0 marin et par la surexploitation de l'aquifère surtout pendant la saison sèche. Cependant dans le reste de la région étudiée, la CE ne dépasse pas 2 mS/cm. Dans cette partie, les eaux souterraines sont de qualité assez bonne. Ceci est lié au fait que ces puits sont situés à des distances supérieures à 3 km de la côte.

Les cartes des chlorures et sodium de la figure 7 qui montrent la distribution spatiale des teneurs en ces deux éléments, sont caractérisées par des plages de concentrations élevées dans les secteurs côtiers, surtout de la partie Nord Ouest. Des teneurs de 700 à 2500 mg/l en chlorures et de 400 à 1600 mg/l en sodium, sont fréquentes dans ces zones à forte salinité. Dans ces secteurs, on observe également ce resserrement des courbes d'isovaleurs au fur et à mesure que l'on se dirige vers la mer. Cela se traduit par un gradient de concentration élevé dans les deux premiers kilomètres, de l'ordre de 600 à 900 mg/l/km, respectivement en sodium et en chlorures.

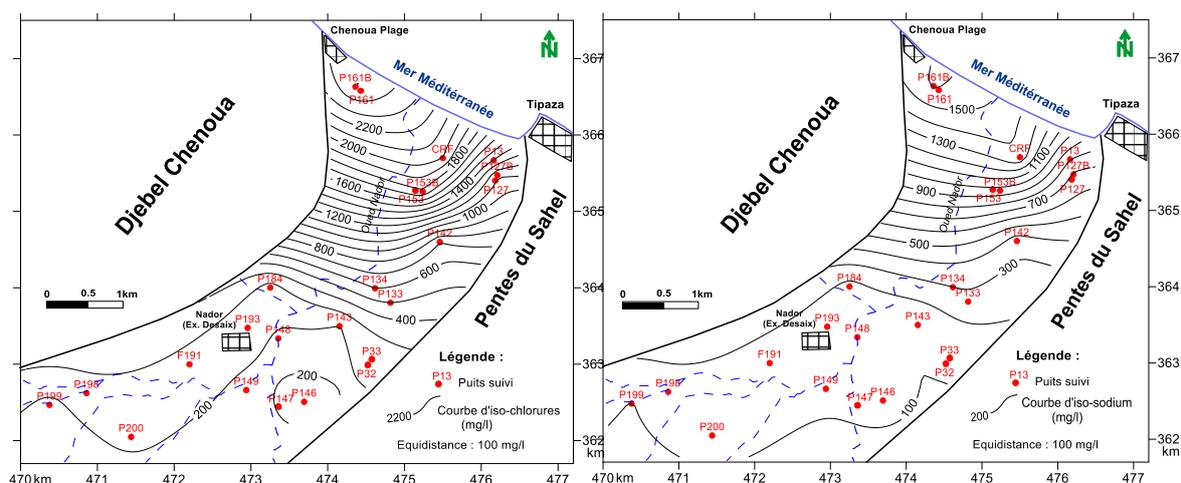


Fig. 7. Cartes de distribution spatiale des chlorures et de sodium (2012)

En conclusion, nous pouvons faire les constatations suivantes :

- les trois cartes précédentes montrent une distribution similaire de la conductivité électrique, des chlorures et sodium, avec un même resserrement des courbes des isovaleurs et une augmentation des valeurs en direction de la mer. Ceci démontre que le faciès des eaux est de type chloruré sodique et que la CE est déterminée surtout par ces deux sels ;
- ce sont toujours les secteurs côtiers où l'on observe les fortes valeurs de CE, Cl^- et Na^+ . Dans ces secteurs sensibles, la source principale des fortes salinités des eaux souterraines étudiées

est l'intrusion marine, surtout dans les deux premiers kilomètres de la mer de la partie Nord Ouest. Cette invasion locale du biseau d'eau salée est favorisée par les facteurs suivants : existence de l'isopièze 0 m à l'intérieur des terres, topographie du substratum pliocène qui plonge en dessous du 0 marin, épaisseur saturée importante en relation avec la structure du socle, surexploitation de la nappe surtout en période sèche où les débits souterrains sont faibles, bonne perméabilité des terrains aquifères plio-quaternaires, ...;

- à l'amont des deux premiers kilomètres de la mer, il existe d'autres sources potentielles de la minéralisation de la nappe étudiée, à savoir : infiltration des eaux d'irrigation de l'oued Nador, réutilisation des eaux usées épurées en agriculture, dissolution de la roche réservoir (carbonatée, magnésienne,...), lessivage des fertilisants azotés et des sels utilisés en agriculture, lessivage des embruns marins par les eaux des pluies et d'irrigation,... [10]. Il est à noter ici que les impacts des embruns marins, non évalués avec exactitude, semblent s'atténuer avec la distance à la mer pour totalement s'annuler au delà de 15 km environ du rivage [11]. Ils sont à l'origine de l'augmentation générale de la salinité au fur et à mesure que l'on se dirige vers la mer. D'autres facteurs peuvent expliquer cette augmentation de la salinité en direction de la Méditerranée, à savoir : la profondeur de la nappe, la situation géographique des zones de recharge de la nappe,...

4.2 Evolution de la chimie en fonction de la distance à la mer

Pour mettre en évidence l'influence de l'éloignement à la côte sur la qualité des eaux souterraines, nous avons choisi un alignement de 6 puits, perpendiculaire à la ligne du rivage et parallèle à l'écoulement de la nappe (Fig. 8).

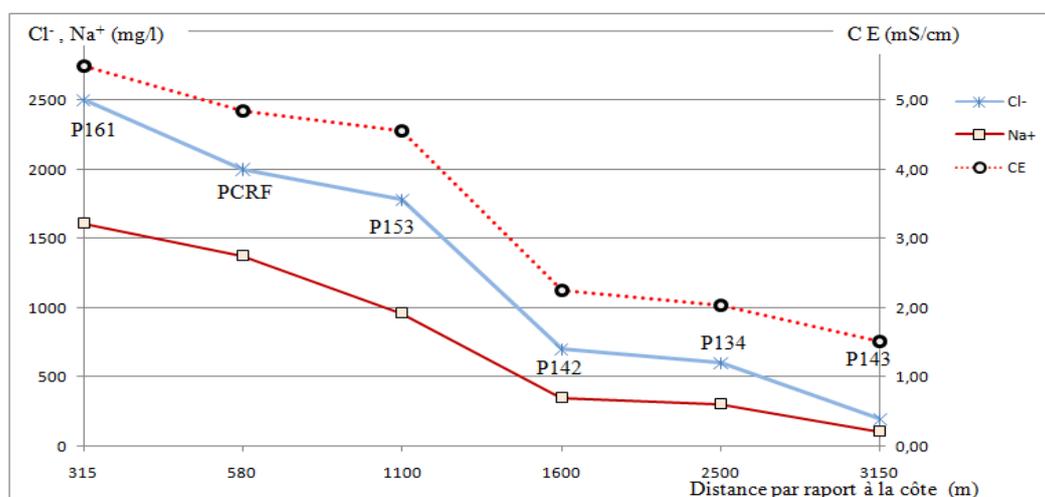


Fig. 8. Evolution de la CE, Cl⁻ et Na⁺ en fonction de la distance à la mer

Cette figure montre une chute importante de la conductivité électrique et des sels de chlorures et du sodium. Cette chute est très marquée dans les deux premiers kilomètres de la côte : on passe de 5,5 à 2,05 mS/cm pour la CE, de 2500 à 600 mg/l pour les chlorures et de 1610 à 300 mg/l pour le sodium. Ceci indique des intrusions marines dans ces secteurs, qui ont engendré un mélange entre les eaux marines et les eaux douces et par conséquent une salinisation des ces dernières.

4.3 Evolution de la chimie en fonction du pompage et des pluies

La figure 10 montre que la conductivité électrique des puits côtiers diminue lors des périodes très pluvieuses où l'exploitation est pratiquement nulle et où le niveau de la nappe est très proche de la surface et vice versa. A titre d'exemple, nous allons examiner de près l'évolution de la conductivité électrique et de la profondeur du puits P153 en fonction des pluies et des pompages (Fig. 9, tableau 3). Il en ressort qu'en 1993, les pluies précipitées et les débits des pompages étaient respectivement de l'ordre de 334,6 mm et 80 l/s, cela avait des répercussions négatives sur le niveau piézométrique (une baisse jusqu'à - 0,2 m) et sur la conductivité électrique (augmentation jusqu'à 7,2 mS/cm). Quant à l'année 2007, très pluvieuse (726 mm) avec une réduction de l'exploitation (20 l/s), le niveau de la nappe a accusé une montée de +2,8 m (devenu supérieur au zéro marin) et la conductivité a diminué jusqu'à la valeur de 4,26 mS/cm (soit -2,94 mS/cm). Ceci montre bien les effets conjugués de l'exploitation et de l'alimentation par les pluies sur la quantité et la qualité de la ressource en eau souterraine. De manière générale, les pluies efficaces engendrent un rehaussement piézométrique important et une dilution de tous les sels en solution dans la nappe. D'autres effets positifs des pluies sur la nappe peuvent être cités : l'augmentation de l'épaisseur saturée de l'aquifère, la disparition par endroits de l'isopièze 0 m permettant de limiter la progression du biseau d'eau salée vers l'intérieur les terres,...

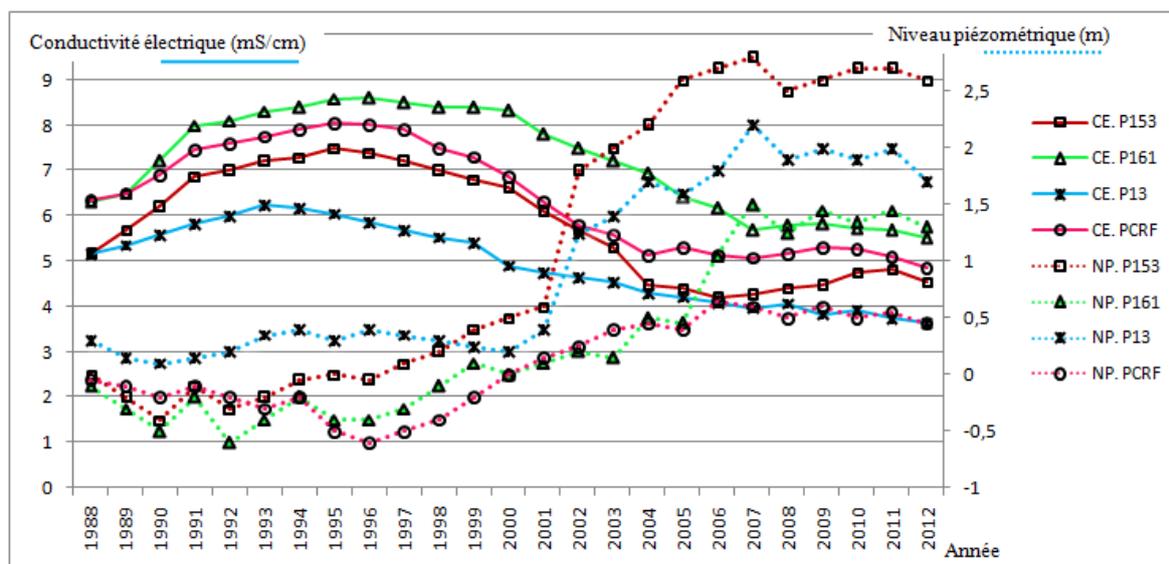


Fig. 9. Evolution annuelle de la conductivité électrique de la nappe et du niveau piézométrique (période 1988-2012)

Dans le cadre de ce travail, nous avons aussi effectué 3 essais de pompage sur les puits P13, P153 et P161, dans le but d'examiner l'effet de l'exploitation sur la conductivité électrique et sur la profondeur de l'eau souterraine, avant et après un pompage de 12 heures.

Il en ressort que le niveau de la nappe plio-quaternaire subit un rabattement important entre -2,35 et -2,93 m et que la minéralisation totale de l'eau accuse des hausses entre +0,38 et +1,84 mS/cm. C'est le puits P161 le plus proche de la mer (315 m) qui a montré l'augmentation la plus importante. Ceci plaide en faveur d'une salinisation des eaux souterraines par des entrées d'eau marine, accentuées par le pompage.

Tableau 3. Evolution de la conductivité électrique en mS/cm en fonction du pompage

	P13		P153		P161	
	N. piézo. (m)	CE (mS/cm)	N. piézo. (m)	CE (mS/cm)	N. piézo. (m)	CE (mS/cm)
Avant pompage	+1,72	3,74	+2,62	4,83	+1,34	5,69
12 heures de pompage	-0,85	4,90	+0,27	5,21	-1,59	7,53
Différence	-2,57	+1,16	-2,35	+0,38	-2,93	+1,84

Il ressort de ces essais, que sous l'effet de l'exploitation par des pompages intenses et fréquents, la zone de transition eau douce/eau salée subit un déplacement vers l'intérieur des terres ainsi qu'une remontée vers les crépines des motopompes des puits en exploitation

« phénomène d'Upconing ». Cela a pour conséquence une salinisation de l'eau pompée, qui dépend étroitement du débit d'exploitation et de la distance du point d'eau à la côte.

5. CONCLUSION

L'utilisation des traceurs hydrogéochimiques (CE, Cl⁻, Na⁺,...) a montré une meilleure adaptation de ces outils à un aquifère côtier, vulnérable et surexploité, en zone agricole et semi-aride. Combinée à d'autres outils de l'hydrogéologie, de la piézométrie, de la géoélectrique et de l'hydroclimatologie, elle a permis de vérifier notre hypothèse de départ sur la source potentielle et principale des fortes salinités.

Dans les deux premiers kilomètres de la mer, surtout de la partie Nord Ouest, où l'on note la présence de l'isopièze 0 m à l'intérieur de la plaine, la source potentielle des fortes salinités correspond aux intrusions de la nappe par des eaux marines. Ces invasions marines sont favorisées par des pompages intensifs et fréquents dans cet aquifère, par la bonne perméabilité de ce dernier et par la côte du substratum inférieure au zéro marin.

A des distances supérieures à 2 km de la côte, les sources potentielles de la salinité liée surtout aux chlorures, seraient plutôt naturelles (embruns marins lessivés par les eaux d'infiltration, lixiviation de la roche réservoir,...) et anthropiques (fertilisants et sels agricoles lessivés par les eaux de pluies et d'irrigation, réutilisation des eaux usées épurées en agriculture,...).

L'étude de la source potentielle des fortes salinités liée aux intrusions marines, a montré que dans les deux premiers kilomètres surtout de la partie Nord Ouest, on note une augmentation importante de la charge saline en direction de la mer (900 mg/l/km pour les chlorures, 600 mg/l/km pour le sodium et 1 mS/cm/km pour la CE). Les cartes chimiques et les graphiques dressés montrent la même évolution, c'est à dire que la salinité augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la mer.

L'évolution spatio-temporelle de la quantité et de la qualité des eaux souterraines est conditionnée par plusieurs paramètres déterminants, à savoir : les pluies (effet de dilution), les pompages dans la nappe (abaissement piézométrique), la topographie du substratum (contact « nappe-biseau salé »), la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère (entrées d'eau marine), la distance du puits par rapport à la mer (degré de mélange « eau douce – eau marine »), l'affleurement des terrains aquifères (alimentation de la nappe et infiltration des eaux de drainage), la profondeur de la nappe (alimentation de la nappe, infiltration des eaux de drainage, évaporation),...

Un certain nombre de recommandations et perspectives peuvent être proposées afin de réduire la salinisation des eaux souterraines par les intrusions marines : arrêt immédiat de nouveaux creusements de puits dans les secteurs côtiers surtout de la partie Nord Ouest, installation de réseau de piézomètres le long de la côte pour contrôler la progression du biseau d'eau salée vers les terres, réalisation d'enquêtes exhaustives pour estimer les superficies irriguées et les débits des pompages, adoption de nouvelles techniques d'irrigation (le goutte à goutte par exemple), examen des possibilités de recharge de la nappe par les eaux usées épurées, essais de modélisation mathématique de l'aquifère pour simuler les écoulements souterrains et la propagation des polluants marins vers la nappe.

ETUDE DU PROBLEME DE L'INTRUSION MARINE DANS LA NAPPE ALLUVIALE COTIERE DE NADOR, TIPAZA, ALGERIE

RESUME

L'objectif de ce travail qui porte sur l'aquifère côtier de Tipaza (Nord algérien), est de mettre en évidence les mécanismes d'une potentielle intrusion marine vers la nappe plio-quadernaire. Celle-ci est fortement exploitée dans l'irrigation et l'alimentation, ce qui s'est répercuté négativement sur sa qualité. A cet effet, nous avons effectué des suivis piézométriques et hydrochimiques de 24 puits entre 2008 à 2012.

L'analyse piézométrique a montré l'existence de l'isopièze 0 m à l'intérieur des terres, ce qui fait de ces zones, des secteurs sensibles à l'intrusion marine, où les courbes d'isovaleurs de certains paramètres chimiques montrent un resserrement en direction de la mer. Cela se traduit par un gradient de concentration élevé dans les deux premiers kilomètres, de 1 mS/cm/km en CE et de 600 à 900 mg/l/km respectivement en sodium et chlorures. L'étude hydrochimique a bien permis de vérifier l'hypothèse d'une intrusion marine vers l'aquifère côtier de Nador.

Mots-clés : Aquifère côtier, Intrusion marine, Piézométrie, hydrochimie, plaine de Nador.

6. REFERENCES

- [1] Bouderbala A, Remini B, Pulido-Bosch A 2014. Hydrogeological characterization of the Nador Plio-Quaternary aquifer, Tipaza (Algeria), *Boletin Geologico y Minero* 125(1): 77-89.
- [2] Mesbah M. 1981. Contribution à l'étude hydrogéologique de la basse vallée de l'Oued Nador, Tipaza. Thèse de Doctorat 3^ocycle IST/ Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Algérie 236pages.
- [3] Haouchine A. 1993. Simulation numérique des transferts de masse en milieu poreux, méthodologie et exemple d'une intrusion marine dans un aquifère côtier. Thèse de Magister, IST / Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Algérie. 110pages.
- [4] Tifour Y. 2000. Intrusion des eaux salées dans les eaux douces dans les nappes côtières. Approches hydrodynamiques, exemple du champ de captage de Tipaza. Thèse de Magister de l'université de Blida 122pages.
- [5] Bouderbala A., Remini B. 2014. Geophysical Approach for Assessment of Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Wadi Nador (Tipaza, Algeria), *Acta geophysica*, 62(6), 1352-1372.
- [6] Ayme A & Flandrin J. 1965. Notice explicative de la carte géologique de Tipaza 1/50,000.
- [7] AFNOR. 1994. Recueil des normes françaises: qualité des eaux. Environnement, Paris.
- [8] OMS. 2008. Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization, Geneva, Switzerland. 564p
- [9] Richards LA. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Edit. US Department of Agriculture, Agricultural Handbook n°60, Washington (USA), 160pages.
- [10] Kouzana L, Ben Mammou A, Gaaloul N. 2007. Intrusion marine and salinization of coastal groundwater (Korba, Cap-Bon, Tunisia). *Journal of Geo-Eco-Trop*, 31: 57-70.
- [11] Younsi A, Lhadi EK, Mania J. 1997. Mise en évidence de l'intrusion marine vers la nappe de la province d'El Jadida. *IAHS* 244: 115-122.

How to cite this article:

Bouderbala A, Remini B, Saaed HA, Younsi A. Seawater problem in the alluvial coastal aquifer of nador, tipaza, algeria. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2021, 13(3), 1224-1241.