

## Évaluation de l'intrusion saline dans la nappe de Foum El Oued, province de Laâyoune, Maroc

*Evaluation of saltwater intrusion in the Foum El Oued coastal aquifer,  
Laâyoune province, Morocco*

**Mohamed EL MOKHTAR<sup>1\*</sup>, Mohamed CHIBOUT<sup>2</sup>, Malika KILI<sup>1</sup>, Bouaâbid EL  
MANSOURI<sup>1</sup>, Jamal CHAO<sup>1</sup>, Sidi Mokhtar EL KANTI<sup>1</sup>, Ahmed NTARMOUCHANT<sup>2</sup>  
& Anasse BENSLIMANE<sup>2</sup>**

1. *Laboratoire des Géosciences des Ressources Naturelles (LGRN), Équipe d'Hydro informatique, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Campus Maâmora, BP.133, 1400 Kenitra, Maroc. \*(mohamed.elmokhtar@yahoo.fr)*
2. *Laboratoire de Géodynamique et Ressources Naturelles (LGRN), Faculté des Sciences Dhar Mahraz, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc.*

**Résumé.** L'aquifère de Foum El Oued est situé dans une zone côtière, à l'Ouest de la ville de Laâyoune. Il s'étend sur une superficie d'environ 250 km<sup>2</sup> et représente une ressource en eau primordiale pour la ville de Laâyoune et les communes voisines. De ce fait il est important de l'étudier et de le préserver. Les prélèvements s'effectuent en grande partie au niveau du champ captant de l'ONEE pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et l'industrie. La salinisation de cette unité hydrogéologique a pour origine principale l'avancée du biseau salin au niveau du champ captant, ainsi probablement d'origine lithologique. Le pompage intensif et la sécheresse entraînent la contamination de cette ressource. L'application du principe de Ghyben-Herzberg qui permet de situer l'interface eau douce-eau salée pour les années 2009 et 2013, a permis de déterminer l'étendue de cette avancée grâce aux données enregistrées par des salinomètres installés dans les périmètres de captages. La position de l'interface eau douce-eau salée est caractérisée par une variation spatio-temporelle irrégulière en rapport avec les périodes d'exploitation de la nappe. Le résultat du présent travail a permis de mettre en évidence l'interface planimétrique entre l'eau salée et celle douce au niveau de cinq forages les plus profonds (737/120, 815/120, 826/120, 1151/120, 1156/120). Cette interface a épousé la forme d'un cône au niveau du forage 1151/120 qui expliquerait bien le phénomène d'upconing, en relation avec la remontée de la salinité.

**Mots clés :** Nappe de Foum El Oued, Interface eau douce-eau salée, intrusion saline, conductivité électrique.

**Abstract.** The Foum El Oued aquifer is located in the coastal Atlantic Ocean in the West of Laayoun City. This aquifer covers an area of 250 Km<sup>2</sup> and represents an essential water resource for Laayoun city and its periphery regions. It is heavily exploited for water supply, agriculture and industry. The pumping is carried out mainly at the level of the perimeter of pumping of the National Office of Drinking Water (ONEE). The salinization of the hydrogeological unit has its main origin in the advancement of the salt-wedge at the level of the pumping perimeter, or lithological origin. Also, the intensive pumping and the dryness involve the contamination of this resource. The application of the principle of Ghyben-Herzberg makes it possible to locate the fresh-water/salt-water interface for 2009 and 2013 and it has allowed determining the extent of this projection thanks to the data recorded by salinometers installed in the sampling perimeter. The freshwater-saltwater interface position is characterized by an irregular space-time variation, namely in keeping with the periods of groundwater pumping. The result of this work has made it possible to highlight the interface between salt-water and fresh-water at the level of the five major drillings (737/120, 815/120, 826/120, 1151/120, 1156/120). This interface has marked a cone at the level of the drilling 1151/120 which will explain the upcoming phenomenon that is due to the water salinity increase.

**Keywords:** Foum El Oued aquifer, freshwater-saltwater interface, saltwater intrusion, electrical conductivity.

### Abridged English version

#### Introduction

The Foum El Oued water aquifer supplies the Laayoun city and it ensures the sustainability of the various economic activities in the region. This resource belongs to a region with a desert climate where the annual rainfall average, between 1993 and 2007, did not exceed a few tens of millimeters. Thus, the infiltration of rainwater is very low and insufficient for recharging the Foum El Oued aquifer. The annual water volume subtracted from the aquifer

during the period 1990-2011, according the National Office of Drinking Water (ONEP) data, is constantly growing and reached approximately 2.52 Mm<sup>3</sup> in 2010-2011. This exploitation was accompanied by a gradual decline of the aquifer and a considerable advancement of the salt-wedge. Thus, the intensive pumping is accompanied by a saltwater increase which to move upwards towards the well. This phenomenon is known as the saltwater upconing. According geological data, the study area is part of the Tarfaya-Laayoun-Dakhla sedimentary basin which has developed during the Mesozoic and the Cenozoic age (Dillon & Sougy 1974, Lehner &

Ruiter 1977). Several authors have highlighted a general description of the structural and regional geology (Triassic to the recent Quaternary age) of this basin (Alia Medina 1945 a et b, Lecointre 1952, Choubert & Ambroggi 1953, Lecointre 1963, Lecointre 1965 a et b, Choubert *et al.* 1966, Martinis & Visintin 1966, Ratschiller 1970). The main geological formations constituting the Foum El Oued aquifer are grouped into four families named: Lower sands, dolomitic limestone and lower sandstone, the upper sands and Plio-Quaternary alluvium of the Saquia Al Hamra Wad (Fig. 2). The Foum Al Wad aquifer groundwater flows into the permeable Plio-Quaternary formations which rest on an impermeable bottom formed by the Miocene gray marls (El Mokhtar *et al.* 2018). It is alluvial phreatic water limited in the East by the right bank and the left bank aquifers of Laayoun city. They are geologically continuous and unrelated hydraulically since their bottom (Upper Cretaceous clays and impermeable marls) appears in the middle of the Saquia Al Hamra Wadi giving birth to some sources of low flow at the Laayoun city level (El Mokhtar *et al.* 2018). The objective of this work is to emphasize the extension and the presence of the saltwater intrusion at the Foum Al Wad perimeter pumping. The use of Ghyben Herzberg piezometric approach (Fig. 1) made it possible to follow the spatio-temporal evolution of the interface between fresh water/salt water and to locate its depth compared with the sea level in drillings the deepest 737/120, 815/120, 826/120, 1151/120 and 1156/120 (Fig. 4, Tab. 1).

#### *Material and methods*

The climatic and hydrogeological data used in this work are gently received from Hydraulic Basin Agency of Sakia Al Hamra and Oued Eddahab (ABHSHOD). They are supplemented by an inventory of groundwater abstraction and recordings of electric conductivity. Water abstraction for drinking water and irrigation were deducted from a survey that we carried out in 2010-2011 (Fig 4), with rigorous monitoring of pumping times and measured flow rates of the installations. Moreover, the work adapts the Aminot & Kérouel (2004) formula to calculate the salinity of water g/l from electric conductivity  $\mu\text{S}/\text{cm}$  and the water temperature in  $^{\circ}\text{C}$ . These two parameters are measured with a high degree of precision by electric probes which equip eight control piezometers located in the pumping wells zone (Fig. 4; Tab. 1). The interface between the sea-water and the fresh-water of Foum El Oued groundwater is determined by applying the Ghyben-Herzberg principle. It corresponds to the transition zone separating the salt-water (35g/l of salinity) from the fresh-water (salinity varies from 1 with 3g/l).

#### *Dryness impact on the aquifer's groundwater state*

The climatological data collected from the ABHSHOD revealed that the climate is characterized

by low and irregular rainfall, namely during the period 1997-2007 and maximum value of 154.9 mm was registered in 2005 (Figures 5, 6). The monthly temperature average recorded over the 1976-2003 period varies between a minimal value of  $17.5^{\circ}\text{C}$  marked in January and a maximum value  $26.6^{\circ}\text{C}$  recorded in August (Fig. 7). As result, the temperature and precipitations values reflect a drought which reigns in the area along the year and which could influence the perennial groundwater resources.

#### *Exploitation state of the Foum El Oued aquifer*

Intensive groundwater pumping for the drinking water supply of Laayoun city increases until it reached the value of  $2.52 \text{ Mm}^3$  in 2010. For agriculture and private individuals water extinguished  $2.68 \text{ Mm}^3$  recorded in 2010 (Figures. 8, 10). This pumping caused a decrease on the piezometric head with approximately 0.6m at the drilling 277/120 and 1.56m at the drilling 826/120 (Fig. 9).

#### *The upper edge salinization of Foum El Oued aquifer*

The monitoring of the salinity evolution was carried out at the level of the three controlling piezometers (1151/120, 856/120 and 1135/120). The data collected in this monitoring show an increasing and progressive increase in the NaCl concentration over the 2011-2016 period. The salinity rates evolution are respectively about 22.8%, 25.08% and 6.04%. The highest percentage was recorded in the drilling 856/120 located in the littoral fringe (Fig. 10).

#### *Deep water salinization of the aquifer*

Spatio-temporal monitoring of salinity which represents the very salted water slice (35g) was carried out at the level of the controlling salinometers 815/120, 1156/120, 1151/120, 737/120 and 826/120. The results show a plunge of all the saline layers from 815/120 to 826/120 (Fig. 12). It was found that the spatio-temporal evolution of Ghyben-Herzberg interface carried out between 2000 and 2011 for the five controlling piezometers studied is deeper in the northern part as compared to the southern (Figures 16, 17). The peak recorded at the level of the drilling 1151/120 is due to the groundwater over exploitation. It forms a cone which explains the existence of the upconing phenomenon (as in Fig. 17). For the same period 2000-2009, the piezometer 1151/120, located relatively in the north, presents an increase of the sea water to a depth around 56 m less than that observed in the south of the drilling 737/120. This shows that the sea water starts to appear in-depth around 95m (Fig. 13).

## INTRODUCTION

L'exploitation d'un aquifère côtier est en général délicate et se heurte à un problème de quantité et de qualité (El Mansouri *et al.* 2003). En effet, les changements climatiques accompagnés de sécheresses prolongées peuvent être à l'origine de la rupture de l'interface eau douce-eau salée entraînant l'avancée du biseau salin (Freeze *et al.* 1979). Ainsi, une forte exploitation entraîne une inversion du gradient hydraulique et par conséquent une augmentation de la salinité (Gaaloul *et al.* 2003). Ceci se répercute sur l'évolution spatio-temporelle de la piézométrie et sur la qualité chimique des eaux des aquifères côtiers. Le problème de la salinité des aquifères a fait l'objet de plusieurs travaux, qui ont permis de dégager plusieurs hypothèses : l'exploitation intensive des nappes côtières rend les risques de la contamination par l'eau de mer plus importants (Shtivelman 2000, Panteleit 2001, Pulido 2003), la lithologie des couches (présences d'évaporites) peut expliquer dans certains cas l'origine de la salinisation d'un aquifère et dans d'autres cas, le substratum de l'aquifère peut jouer le rôle de source de salinisation (Krimissa *et al.* 2004). Malheureusement les plaines côtières sont les plus fréquemment contaminées par l'intrusion saline, et la vulnérabilité à la salinisation de l'aquifère est probablement un problème commun entre diffusion moléculaire de NaCl et la densité de l'eau. Selon Chaillou *et al.* (2012), cette salinisation des aquifères côtiers a été étudiée et suivi pratiquement dans tous les continents: sur la côte atlantique américaine (Smith 1988, Barlow 2003, Snyder *et al.* 2004), en Californie (Cardona *et al.* 2004), en Corée (Park *et al.* 2005), au Japon (Hiroshiro *et al.* 2006), aux Pays-Bas (Oude 2001, Post 2004), en Afrique du Nord et autour du bassin Méditerranéen (Paniconi *et al.* 2001, Petalas *et al.* 2006), en France (Barbecot *et al.* 1997, De Montety *et al.* 2008). Les aquifères insulaires des atolls coralliens de l'Océanie ainsi que les Îles méditerranéennes sont aussi sous étroites surveillances (UNESCO 1991, White *et al.* 2010, Kampiotti *et al.* 2002).

La nappe de Foum El Oued approvisionne la ville de Laâyoune en eau potable et assure la pérennité des différentes activités socioéconomiques dans la région. Elle est située au Sud du Maroc au sein d'une zone aride, entre la ville de Laâyoune à l'Ouest et l'Océan Atlantique à l'Est (Fig. 2). Elle est menacée par la sécheresse et la surexploitation (DRH. 2005 et 2011) qui sont à l'origine d'un risque de contamination de la nappe par l'eau salée de la mer (DRH. 2005). Ce phénomène de l'intrusion saline a été établi par une approche géophysique par la tomographie électrique au niveau du champ captant (El Mokhtar *et al.* 2016) et par une approche de modélisation numérique des écoulements à densité variable de la nappe (El Mokhtar *et al.* 2018). En effet, ces problèmes peuvent dégrader la qualité et la

quantité de ses eaux douces. Le volume d'eau annuel soustrait de la nappe pour la période étudiée (1990 à 2010) selon les données de l'AEP, est en croissance permanente et atteint environ 2,52 Mm<sup>3</sup> en 2010. Le pompage intensif crée une remontée de l'eau salée en forme d'un cône appelé phénomène d'upconing.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'état de l'intrusion saline, de suivre l'évolution spatio-temporelle de la salinisation de la nappe côtière de Foum El Oued et de mettre en évidence le phénomène de l'upconing à partir des données fournies par les forages de contrôle de la salinité de l'eau.

### Mécanisme régissant l'interface eau douce/eau salée

La présence de l'eau salée dans les aquifères côtiers est lié à la géométrie de l'aquifère et par la topographie de son substratum imperméable. D'autres facteurs peuvent également contribuer à l'augmentation de la salinité des eaux douces, comme la proximité géographique de la nappe du domaine marin et/ou des eaux salées, la géologie de l'aquifère, les changements climatiques et la surexploitation (Abdelhaleem Saleh 2007, Bouderbala 2015, Fekrache 2015, Chimouni 2017). Le phénomène d'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers poreux a été étudié par Ghyben (1889) et Herzberg (1901) à la fin du XIXe siècle sur la base du principe des équilibres hydrostatiques (Bear *et al.* 1999). L'eau de mer, plus dense que l'eau douce, entre naturellement dans les aquifères côtiers jusqu'à une certaine profondeur (z) en fonction de la charge (h) d'eau douce sus-jacente (Arfib *et al.* 2006) (Fig. 1).

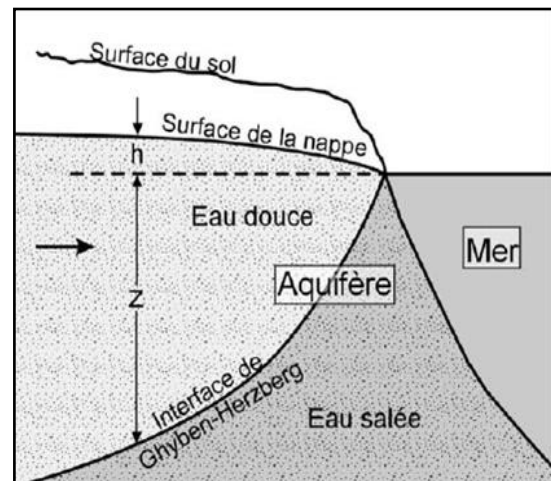


Figure 1. Coupe schématique d'un aquifère poreux contenant une nappe libre en équilibre avec l'eau de mer, suivant le principe de Ghyben-Herzberg (Extrait d'El Mansouri 2003).

Figure 1. Schematic section of a porous aquifer containing an unconfined water equilibrium some with the sea water, according to the Ghyben-Herzberg principle (Extracted from El Mansouri 2003).

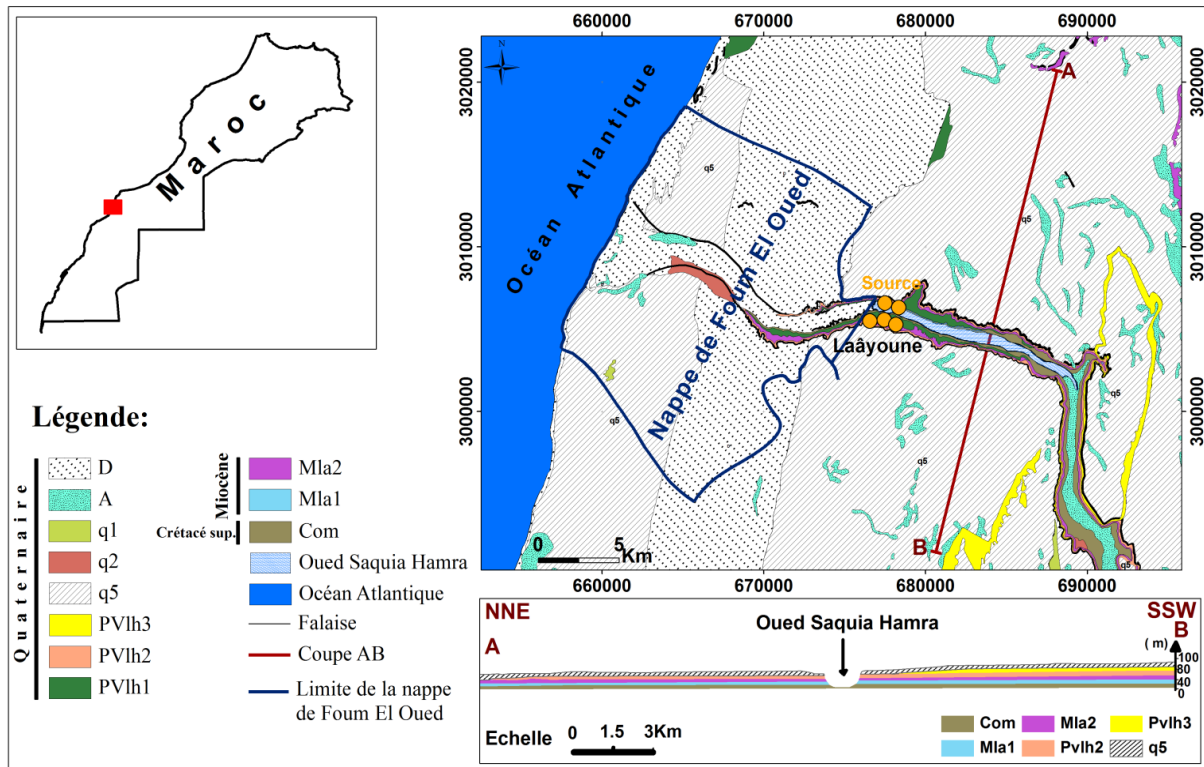


Figure 2. Esquisse de la carte géologique de Laâyoune 1/100000 (MEM. 2002) et coupe géologique AB orientée NNE-SSW; Quaternaire : D : Dunes de sables; A : Limons et évaporites ; q1 : Terrasse alluviale (nommé au Sahara "reg récent") ; q2 : Epandages limoneux et caillouteux de moyenne terrasse, "reg ancien"; q5 : Dalle grés-carbonatée et conglomérat; PVIh3 : Marnes blanchâtres carbonatées; PVIh2 : Lumachelle claire à coquilles de Gastéropodes, Brachiopodes, Pecten et conglomérat à la base; PVIh1 : Lumachelle rousse principalement à coquilles d'Huitres, Gastéropodes ; Miocène : Mla2 : Marnes gréseuses blanchâtres, parfois à silix ; Mla1 : Lumachelle gréseuse marnes sableuses jaunâtres grès et micro conglomérat et alternance de marnes blanchâtres et jaunâtres avec un banc lumachelique ; Crétacé Supérieur : Com : Marnes grisâtres fétides, gypsifères.

Figure 2. Extract of the geological map of Laayoune 1/100000 scale (MEM. 2002) and the geological section AB oriented NNE - SSW. Quaternary: D: Sandhills; A: Silts and evaporates; q1: Alluvial terrace (named in the Sahara "recent reg"); q2: Spreading loamy and stony average terrace, "old reg"; Q5: Slab made of carbonated sandstone and conglomerate; PVIh3: Carbonated whitish marl; PVIh2: Clear lumachelle within shells of gastropods, Brachiopods and conglomerate in the base; PVIh1: Redhead lumachelle mainly within oyster shells and gastropods); Miocene: Mla2: whitish marl sandstone, sometimes with flint; Mla1: Lumachelle, sandy yellowish marls, sandstone, conglomerate, micro alternation of the whitish marls and the yellowish with a bench lumachelic; Upper Cretaceous: Com: Grey marl and gypsum.

### Modèle mathématique de l'interface

L'eau douce et l'eau de mer étant miscibles en toutes proportions. L'écoulement revêt donc un aspect monophasique justifiable d'une modélisation par la théorie de la dispersion (Bear 1979). En effet, ces deux fluides sont en équilibre hydrostatique dans un milieu homogène et poreux, dans un aquifère unique. De plus, leur contact est supposé être représenté par une interface nette (Chatelier *et al.* 2011). L'égalité des pressions de l'eau douce et l'eau salée est exprimée par la formule de Ghyben-Herzberg suivante :

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \times hf$$

Avec z la profondeur de l'interface au-dessous du niveau de la mer, hf le niveau piézométrique d'eau douce, et  $\rho_f$  et  $\rho_s$  respectivement la densité de l'eau douce (freshwater) et de l'eau salée (saltwater)

(Kashef *et al.* 1983). Ces dernières sont égales respectivement à 1 et 1,025 (Chatelier *et al.* 2011). L'équation au-dessus peut être simplifiée et devient donc :

$$z = 40hf.$$

### LA ZONE D'ETUDE

La nappe phréatique littorale (DRH. 2005 ; DRH. 2007) de Foum El Oued couvre une superficie d'environ 250 km<sup>2</sup>. Elle est limitée vers l'Est, à proximité de la ville de Laâyoune, par une remontée des formations marneuses imperméables du Crétacé supérieur (DRH. 2005) et vers l'Ouest par l'Océan Atlantique. Vers le Nord et le Sud aucune limite géographique n'a été bien identifiée sauf une limite provisoire tracée à partir des données des forages (Fig. 3) mises en place par la Direction Régionale Hydraulique du Sahara (DRH. 2005). La géologie de

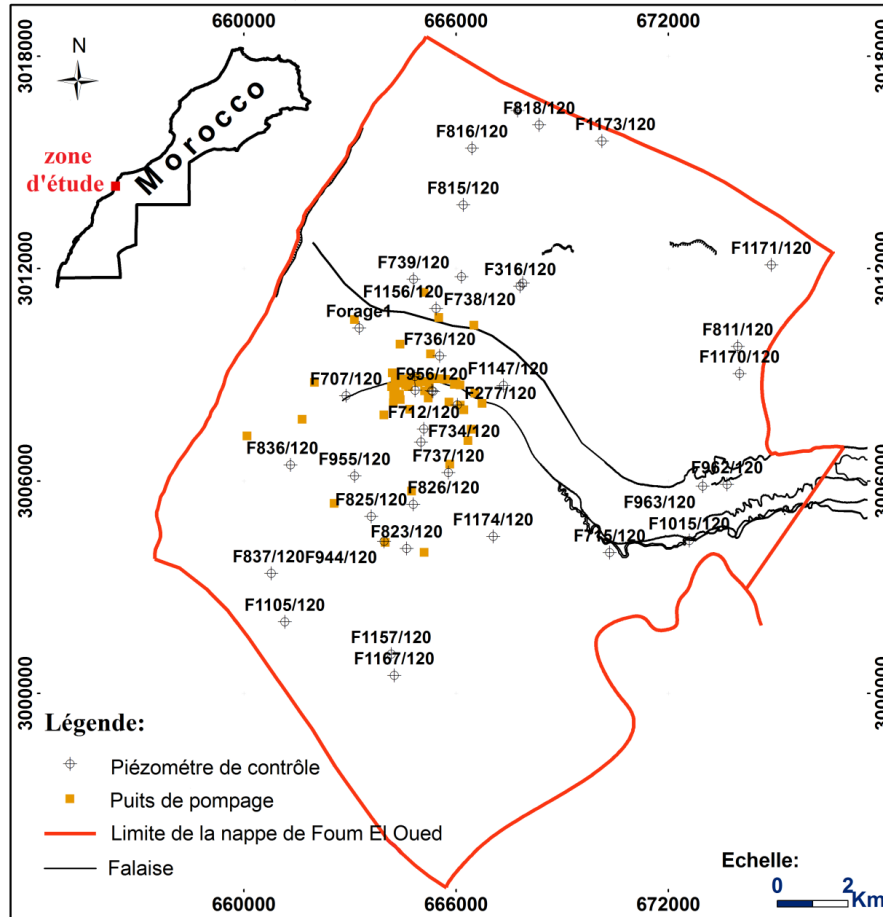


Figure 3. Répartition des forages et puits d'exploitation dans la nappe de Foum El Oued.  
 Figure 3. Distribution of the boreholes and the wells in the Foum El Oued water-table.

Tableau 1. Périodes de mesures de la salinométrie de la nappe de Foum El Oued.  
 Table 1. Measurements periods for Foum El Oued salinity.

N° IRE des salinomètres	Période de mesure
277/120	2000-2009 et 2011
707/120	2000-2005 et 2007-2009
734/120	2000-2005 et 2007-2009
735/120	2000-2005 et 2007-2009
737/120	2000-2005 et 2007-2013
739/120	2000-2005 et 2007-2009
815/120	2000-2005 et 2007-2013
826/120	2000-2005 et 2007-2013
1147/120	2005 et 2007-2009
1151/120	2004-2009 et 2011-2013
1156/120	2004-2005 et 2007-2013

la zone d'étude appartient au bassin sédimentaire Saharien du Sud Maroc. Elle est constituée des formations alluviales décrites dans les rapports de la DRH en 2003 sous une nomenclature simplifiée "Bassin méso-cénozoïque de Tarfaya-Laâyoune-Dakhla" (Dillon & Sougy 1974, Lehner & Ruitter 1977). Plusieurs auteurs ont travaillé sur divers aspects de la géologie régionale et structurale de ce bassin sédimentaire (Alia Medina 1945a, Alia Medina 1945b, Lecointre 1952, Choubert & Ambroggi 1953,

Lecointre 1963, Lecointre 1965a, Lecointre 1965b, Choubert *et al.* 1966, Martinis & Visintin 1966, Ratschiller 1970) en se basant sur les données des forages pétroliers et celles des études sismiques réalisées par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG 1961). Ces différents ont décrit la stratigraphie du bassin sédimentaire s'étalant entre le Trias et le Quaternaire récent. Selon ces travaux, les principales formations géologiques constituant l'aquifère de Foum El Oued d'âge Plio-Quaternaire sont constitués

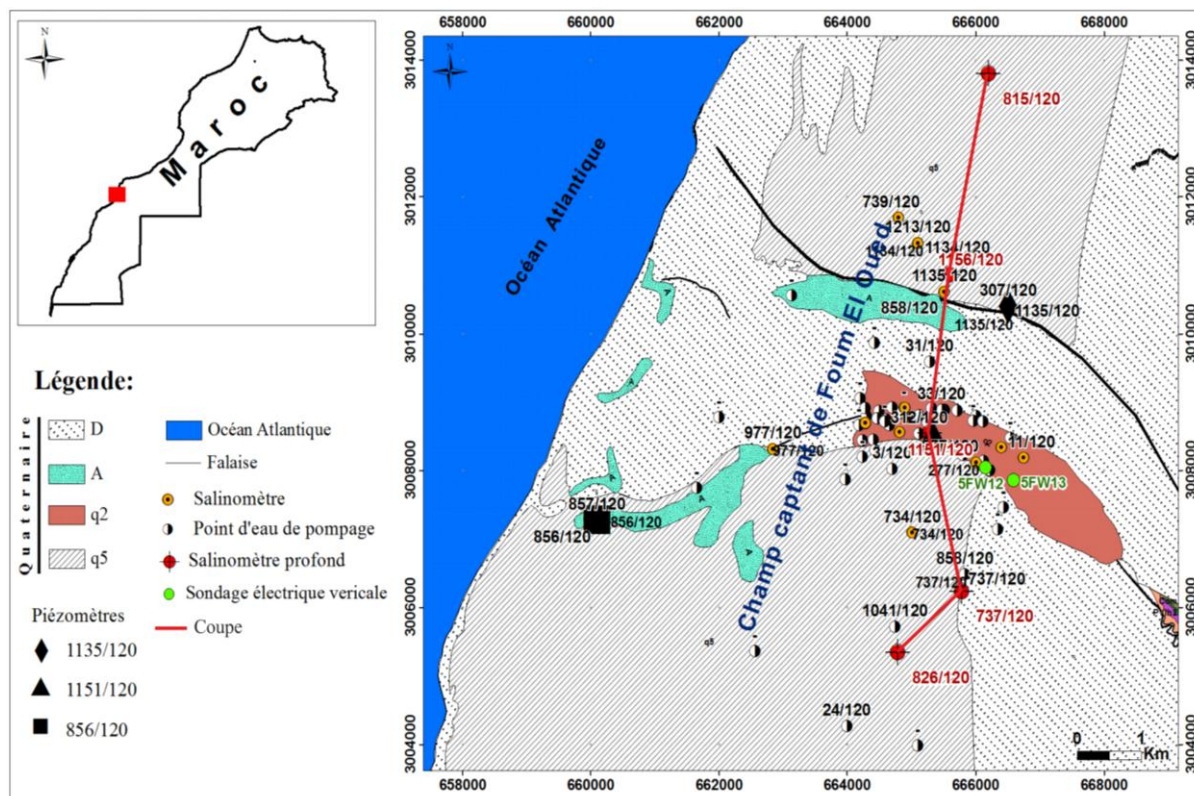


Figure 4. Localisation des points d'eau inventoriés lors de l'enquête 2010-2011, piézomètres et salinomètres.

Figure 4. Localization of the water points inventoried during 2010-2011, piezometers and salinometers.

par les marnes du Crétacé supérieur et les marnes grises du Miocène: les sables inférieurs, les calcaires dolomitiques et les grès inférieurs, les sables supérieurs et enfin les alluvions plio-quaternaires de l'oued Saquia El Hamra (Fig. 2). La nappe de Foug El Oued circule dans des formations perméables du Plio-Quaternaire qui reposent en discordance sur le substratum imperméable marneux du Miocène (DRH. 2003). Elle est de nature phréatique alluviale limitée à l'Est par les aquifères de la rive droite et de la rive gauche de l'oued Saquia El Hamra qui sont en continuité géologique et sans aucun lien hydraulique (DRH. 2003, 2005). Leur substratum argilo-marneux imperméable du Crétacé supérieur affleure dans le lit de l'Oued Saquia El Hamra où sourdent quelques sources de faible débit (Fig. 2) au niveau de la ville de Laâyoune (DRH. 2005).

## MATERIEL ET METHODES

Les données climatiques et hydrogéologiques recueillies auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sakia El Hamra et Oued Eddahab (ABHSHOD) et de la station météorologique de l'aéroport Hassan I de Laâyoune, ont été utilisées pour la réalisation de ce travail. Elles sont complétées par des campagnes de mesures piézométriques plus récentes (2011-2013), un inventaire des prélèvements d'eaux souterraines et des enregistrements de la conductivité électrique (2010-2011). Les prélèvements de la

nappe destinés à l'approvisionnement en eau potable (AEP) et à l'irrigation ont été déduits, à partir d'une enquête réalisée dans le cadre de ce travail entre 2010 et 2011 pendant laquelle un suivi rigoureux réalisé sur des temps de pompage a été effectué (Fig. 4). Par ailleurs, ce travail adaptera la formule d'Aminot & Kérouel (2004), pour calculer la salinité de l'eau en g/l à partir de la conductivité électrique  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et la température de l'eau en  $^{\circ}\text{C}$ . Ces deux paramètres sont mesurés avec une grande précision par des sondes électriques qui équipent huit piézomètres de contrôle situés dans le champ captant de l'Office National de l'Eau et de l'Electricité (ONEE; Fig. 4 et Tab. 1). L'interface entre l'eau de mer et celle de la nappe de Foug El Oued est déterminée en appliquant le principe de Ghyben-Herzberg. Elle correspond à la zone de transition séparant l'eau salée (35g/l de salinité) et l'eau douce (salinité varie entre 1 et 3g/l).

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Influence de la sécheresse sur la nappe libre de Foug El Oued

La nappe de Foug El Oued est située dans une région aride, caractérisée par un climat du type saharien chaud et tempéré (DRH. 2005). La région est plus ou moins ensoleillée (nébulosité) caractérisé par des vents forts venant du NNE et des écarts de températures modérés. Les mesures de la température

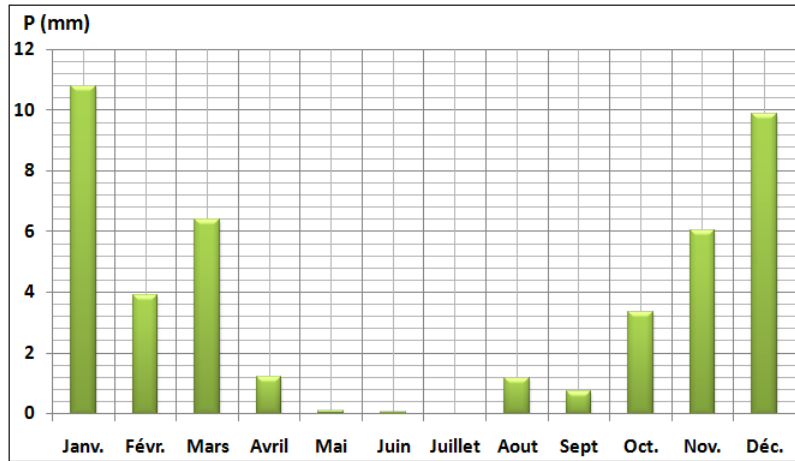


Figure 5. Évolution des précipitations moyennes mensuelles pour la période 1993-2003.  
 Figure 5. Evolution of monthly average precipitations for 1993-2003 period.

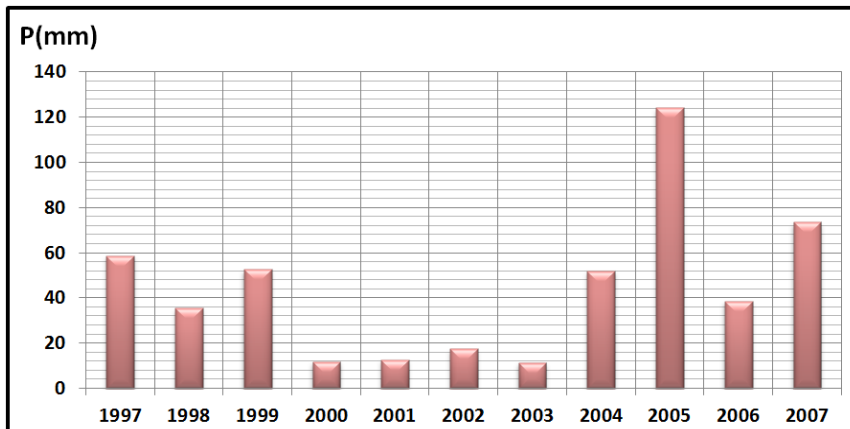


Figure 6. Évolution de la pluviométrie moyenne annuelle pour la période 1997-2007 (DRH. 2007).  
 Figure 6. Annual average pluviometers evolution of the period 1997-2007 (DRH. 2007).

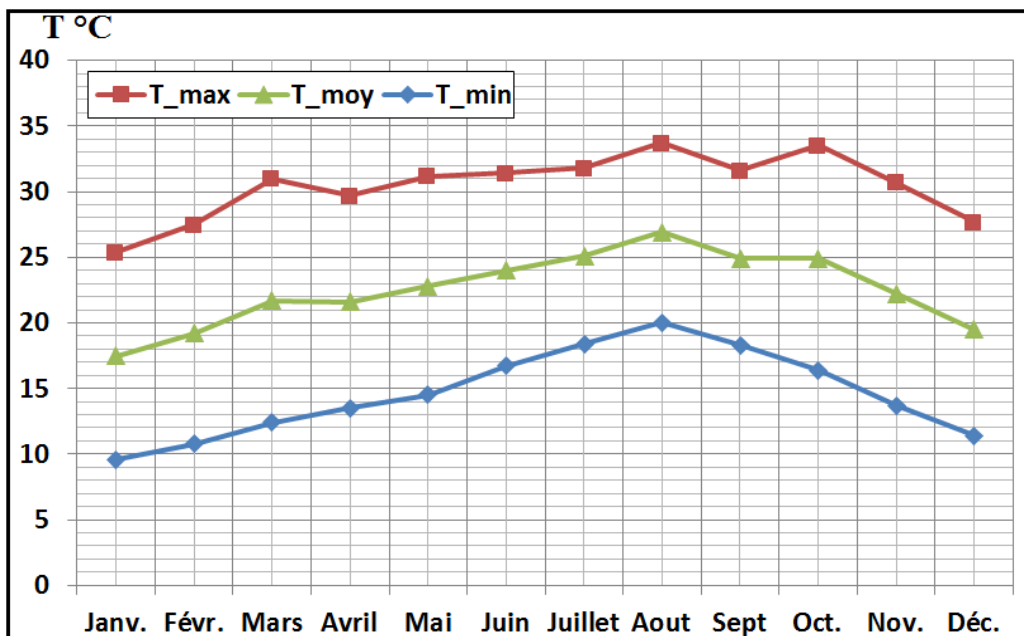


Figure 7. Températures moyennes mensuelles enregistrées pour la période 1976-2003 (Station Laâyoune aéroport Hassan I).  
 Figure 7. Average monthly temperatures recorded over 1976-2003 period (Station Laâyoune airport Hassan I).

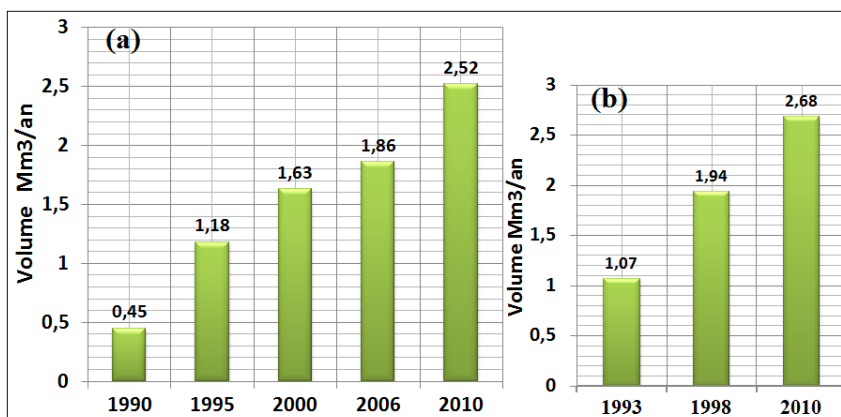


Figure 8. (a): Évolution du volume d'eau prélevé par l'ONEE pour desservir la ville de Laâyoune, en eau potable. (b): Évolution du volume d'eau global prélevé pour l'agriculture et les particuliers (Source de données : ABHSHOD 2011).

Figure 8. (a): Evolution of the water's volume taken by the ONEE to serve the Laâyoune city. (b): Evolution of the total water's volume used for agriculture and the private individuals (Data from ABHSHOD 2011).

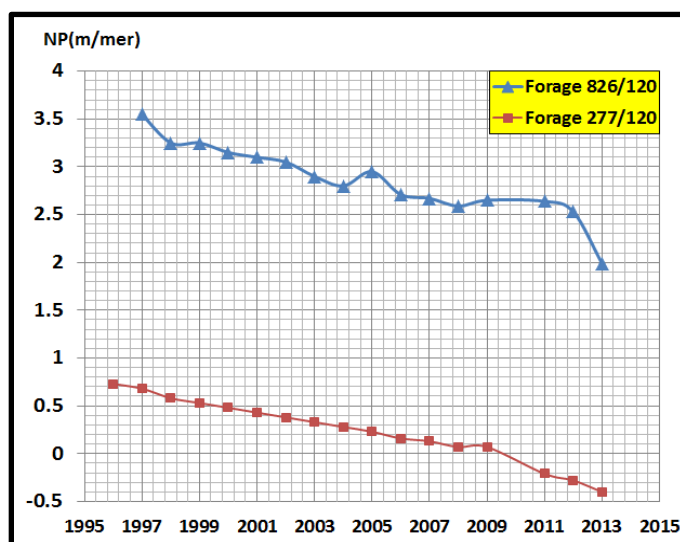


Figure 9. Évolution du niveau piézométrique durant la période 1996-2013.

Figure 9. Evolution of the piezometric level during the period 1996-2013.

et celles de la pluie (1993-2003 et 1997-2007) montrent que ce climat est adouci par l'océan le long de la côte et devient de plus en plus hostile à l'intérieur des terres sahariennes (DRH. 2005, DRH. 2007). La région de Laâyoune est connue par une pluviosité faible et irrégulière, les précipitations sont aléatoires à caractère bref, violent et orageux. Les données de l'ABHSHOD relatives à la période 1993-2003, attestent d'une sécheresse permanente où de rares précipitations (dizaine de millimètres) apparaissent durant la période humide (Fig. 5). Une étude relativement récente (1997-2007), réalisée par la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH. 2007), indique une précipitation moyenne annuelle de 59 mm avec une hauteur annuelle maximale de 154,9 mm enregistrée en 2005 (Fig. 6). La température moyenne mensuelle enregistrée au cours de la période 1976-2003, varie entre une valeur minimale de 17,5°C (relevée en janvier) et une valeur maximale de l'ordre de 26,6°C (enregistrée en août)

(Fig. 7). Les températures maximales et minimales oscillent entre 9,6°C (mesurée en janvier) et 33,7°C (enregistrée au mois d'août) qui constituent deux valeurs extrêmes enregistrées respectivement pendant les deux périodes froide et chaude. Les mesures de la température et des précipitations témoignent d'une sécheresse s'installant dans la région le long de l'année, impactant négativement les ressources en eaux souterraines en diminuant leurs niveaux piézométriques, notamment de la nappe côtière de Foum El Oued.

### État de l'exploitation de la nappe

La nappe de Foum El Oued est très sollicitée pour la satisfaction des besoins de l'agriculture qui prélèvent annuellement (environ de 52% des eaux souterraines) et ceux de l'approvisionnement en eau potable (AEP) de la ville de Laâyoune (environ 48% du volume globale annuel) et de la Commune de



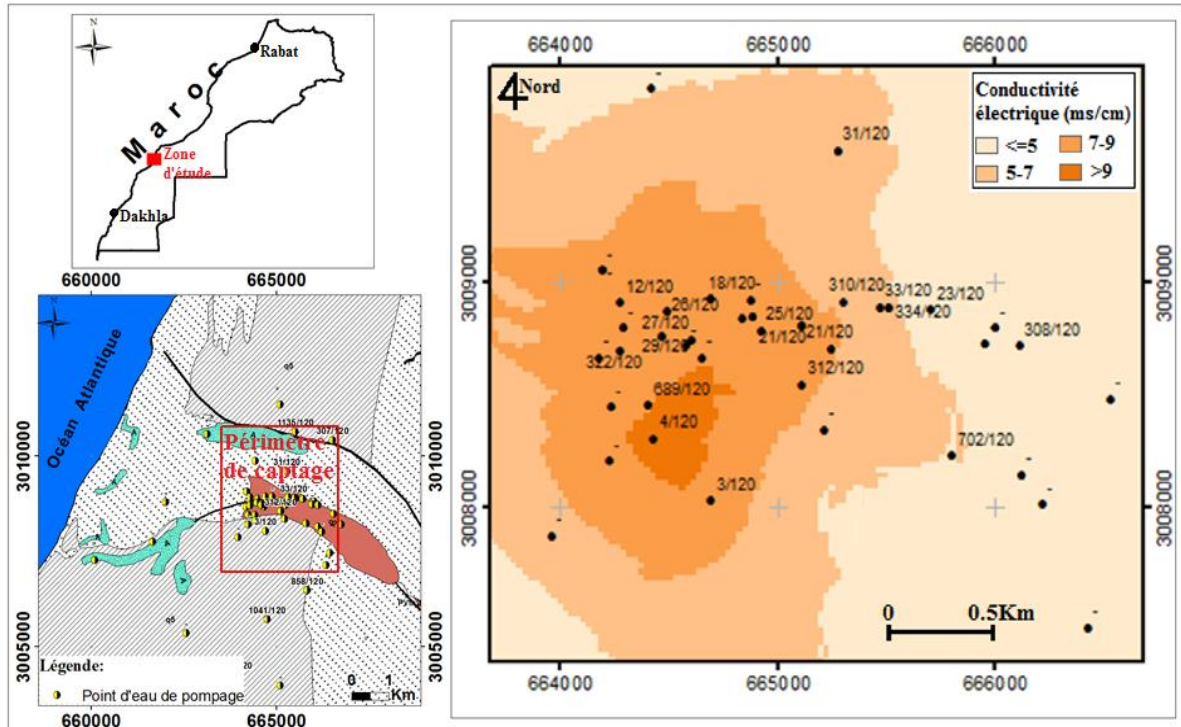


Figure 10. Influence des pompages sur la conductivité électrique des eaux de la nappe de Foum El Oued.

Figure 10. Influence of pumping on the electrical conductivity of *Foum El Oued* groundwater.

Foum El Oued (environ 13% du volume globale annuel). Les données disponibles à l'Office Nationale de l'Electricité et de l'Eau Potable (ONEE) de Laâyoune, sur les prélèvements des puits numéros 856/120, 855/120, 857/120, 858/120, 1134/120, 1135/120 et 1213 couvrant la période comprise entre 1990 à 2010, atteste que les volumes d'eau souterraine utilisés pour les besoins de l'alimentation en eau potable de la ville de Laâyoune ont connu une augmentation croissante de 0,45 Mm<sup>3</sup> en 1990 jusqu'à 2,52 Mm<sup>3</sup> en 2010 (Fig. 8a). Quant au volume d'eau prélevé pour satisfaire les besoins de l'agriculture et des particuliers, l'augmentation des prélèvements affiche des valeurs allant de 1,07 Mm<sup>3</sup> en 1993 à 2,68 Mm<sup>3</sup> en 2010 (Fig. 8b). De plus, les volumes d'eau prélevés pendant l'année 2010-2011 ont été évalués lors d'une enquête de terrain réalisée au niveau de la nappe de Foum El Oued. L'estimation de ces volumes prélevés (pour les deux périodes humide et sèche) de chaque puits est déduite des temps de pompage déclarés par les personnes enquêtées pendant l'enquête et des débits mesurés in situ des installations selon la formule suivante :

$$T = 4,345 \times H \times J \times M$$

T : temps de fonctionnement déclaré (en h), H : nombre d'heures de fonctionnement par jour, J : nombre de jours de fonctionnement par semaine, M : nombre de mois de fonctionnement par période considérée.

Le volume prélevé par période est calculé comme suit :

$$V = T \times Q$$

V : volume prélevé par période en (m<sup>3</sup>), Q : débit en (m<sup>3</sup>/h).

Le résultat du calcul obtenu du volume annuel prélevé en 2011 est la somme des volumes prélevés pour les deux besoins de l'AEP et de l'agriculture ; soit 5,2 Mm<sup>3</sup>. Ce chiffre concorde bien avec les valeurs fournis par l'ONEE (Fig. 8).

#### Évolution du niveau piézométrique

Le suivi de la nappe de Foum El Oued durant la période 1996-2013 (Fig. 9), a été effectué sur deux piézomètres de contrôles 277/120 et 826/120. Le résultat obtenu montre une diminution progressive de son niveau piézométrique au niveau du champ captant durant la période 1996-2013 (Fig. 9). Le rabattement qui se manifeste dans ces deux piézomètres, conséquence de la surexploitation de la nappe et la sécheresse que connaît la région, atteint des valeurs de 0,6m et 1,56m respectivement dans les piézomètres 277/120 et 826/120 et ce pendant la période 1996-2013 (Fig. 9).

#### Impact du pompage sur la salinisation de la nappe

Généralement l'impact du pompage de l'eau souterraine (Fig. 4) entraîne une remontée de la conductivité électrique de l'eau au niveau du champ captant (Abdelhaleem Saleh 2007). Dans le secteur d'étude, l'interpolation spatiale effectuée dans le champ captant de l'ONEE (situé à moins de 4Km de

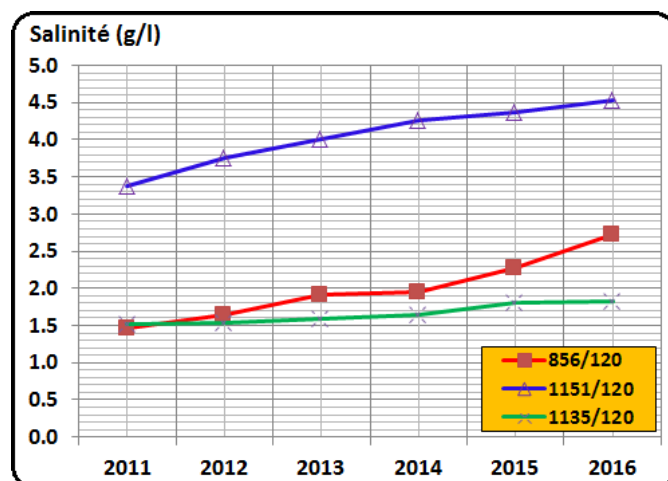


Figure 11. Evolution de la salinité des eaux de surface de la nappe de Foug El Oued dans les trois piézomètres de contrôle durant 2011-2016.

Figure 11. Evolution of the surface water's salinity of the Foug El Oued aquifer in the three control piezometers during 2011-2016.

Tableau 2. Constantes de la formule d'Aminot & Kérouel (2004).

Table 2. Constants of the Aminot & Kérouel formula (2004).

$a_0 = 0,0080$	$b_0 = 0,0005$	$c_0 = 0,6766097$
$a_1 = -0,1692$	$b_1 = -0,0056$	$c_1 = 0,0200564$
$a_2 = 25,3851$	$b_2 = -0,0066$	$c_2 = 1,10426 \cdot 10^{-04}$
$a_3 = 14,0941$	$b_3 = -0,0375$	$c_3 = -6,9698 \cdot 10^{-07}$
$a_4 = -7,0261$	$b_4 = 0,0636$	$c_4 = 1,0031 \cdot 10^{-09}$
$a_5 = 2,7081$	$b_5 = -0,0144$	$k = 0,0162$

l'Océan Atlantique sur la partie Ouest de la nappe) montre que la conductivité électrique des eaux de la nappe augmente au fur et à mesure que l'on s'approche du centre du champ captant avec une valeur maximale supérieure à 9mS/cm (Fig. 10). La salinisation de la nappe, serait en relation avec différents facteurs, notamment la surexploitation et l'insuffisance de la recharge naturelle en raison de la sécheresse. En effet, ces facteurs entraînent l'intrusion saline et favorisent l'écoulement de l'eau de mer vers l'intérieur des terres.

### Risque de salinisation de la nappe de Foug El Oued

#### Salinisation de la tranche supérieure de l'eau de la nappe

L'exploitation d'une nappe au niveau d'une zone côtière se répercute sur son niveau piézométrique qui est souvent en relation avec l'interface eau douce/eau salée et influence la position et la forme de la zone de contact (Frissant *et al.* 2005). Un suivi de l'évolution de la salinité de l'eau de la nappe a été effectué dans trois piézomètres de contrôle (1151/120, 856/120 et 1135/120). Les données recueillies montrent une augmentation croissante et progressive de la concentration de l'eau en NaCl sur la période étalée entre 2011 et 2016. Les taux d'évolution de la salinité sont respectivement d'environ 22,8%, 25,08% et 6,04%. L'augmentation la plus élevée a

été enregistrée au niveau du forage 856/120 situé sur la frange littorale à près de 1.12 Km (Fig.11).

#### Salinisation des eaux profondes de la nappe

Les mesures de la conductivité électrique et la température ont été effectuées depuis la surface jusqu'au fond des piézomètres de contrôle. La salinité de l'eau est calculée à partir des deux paramètres précédents mesurés, in situ, en appliquant la formule établie par Aminot & Kérouel (2004). Cette dernière qui met en relation la salinité en fonction de la somme des produits de la température et la conductivité électrique, sera adoptée pour obtenir l'évolution de la salinité en profondeur des forages de contrôle.

$$S = \sum_{i=0}^5 \left\{ \left[ a_i + \left( \frac{t-15}{1+k(t-15)} \right) b_i \right] R_t^{(i/2)} \right\} \quad (\text{Aminot \& Kérouel (2004)})$$

$$\text{Avec : } R_t = \frac{C_{s,t,p}}{42.914 r_t} \quad \text{et} \quad r_t = \sum_{i=0}^4 c_i t^i$$

S : Salinité en (g/l) ;  $C_{s,t,p}$  : Conductivité électrique en (mS/cm) ; t : température en °C ;  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  et k : Constantes sans dimensions.

Les valeurs des constantes de la formule sont consignées dans le tableau 2. Le test établi par Aminot & Kérouel (2004) attribue une valeur de conductivité de 42,914 mS/cm et une température de

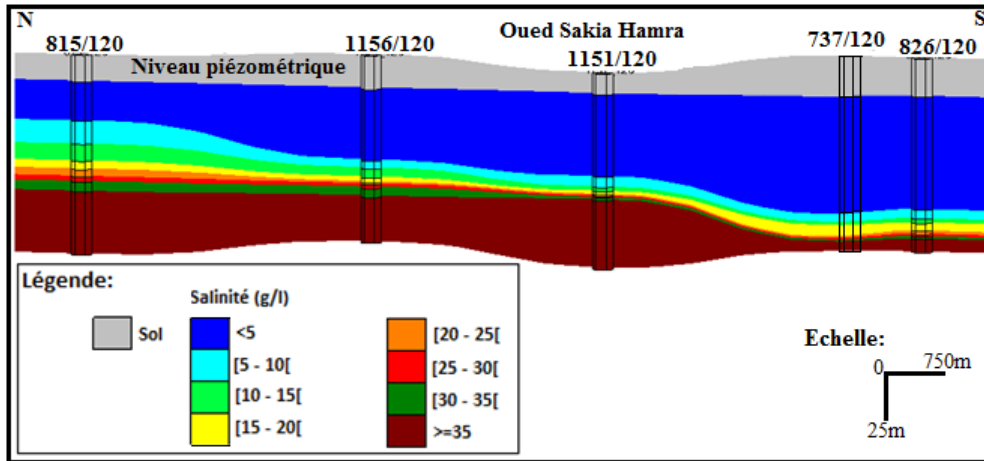


Figure 12. Différentes tranches de salinité de la nappe de Foum El Oued en g/l pour l'année 2009.

Figure 12. Various slices of salinity of the Foum El Oued Water-table in g/l for the year 2009.

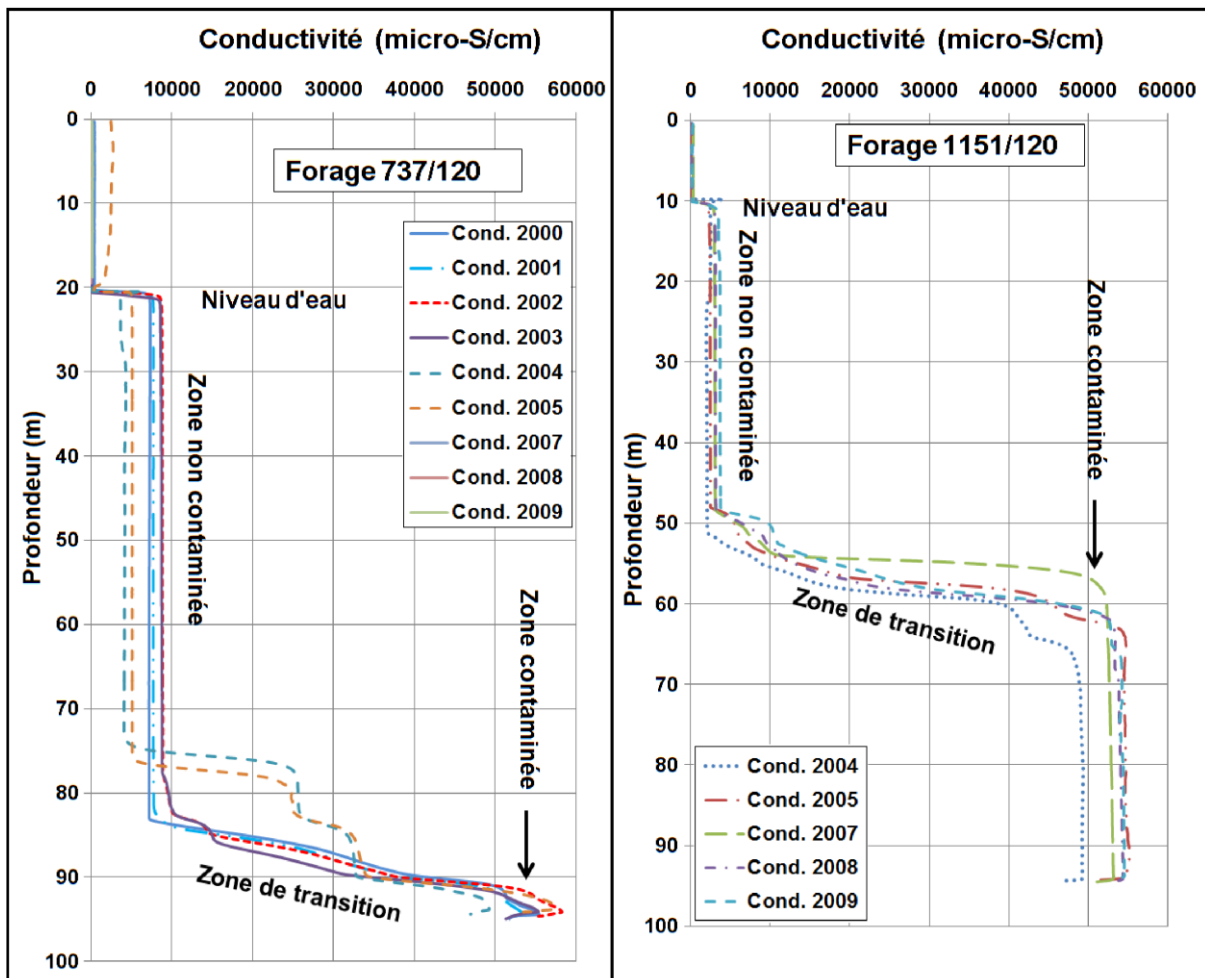


Figure 13. Évolution de la conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en fonction de la profondeur d'eau dans les forages 1151/120 et 737/120 (respectivement durant les périodes 2004-2009 et 2000-2009).

Figure 13. Evolution of the electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) according to the water-depth in boreholes 1151/120 and 737/120 (respectively during the periods 2004-2009 and 2000-2009).

15°C à une salinité égale à 35 g/l. Ces deux valeurs de conductivité et de salinité seraient un seuil qui témoignerait d'une contamination par l'eau de mer dans le cas d'un dépassement.

Dans le cas de Foum El Oued, la salinité est de 35g/l. Celle-ci correspondrait à une température de 23°C et une conductivité de 51 mS/cm. L'analyse des cinq des piézomètres de contrôle les plus profonds

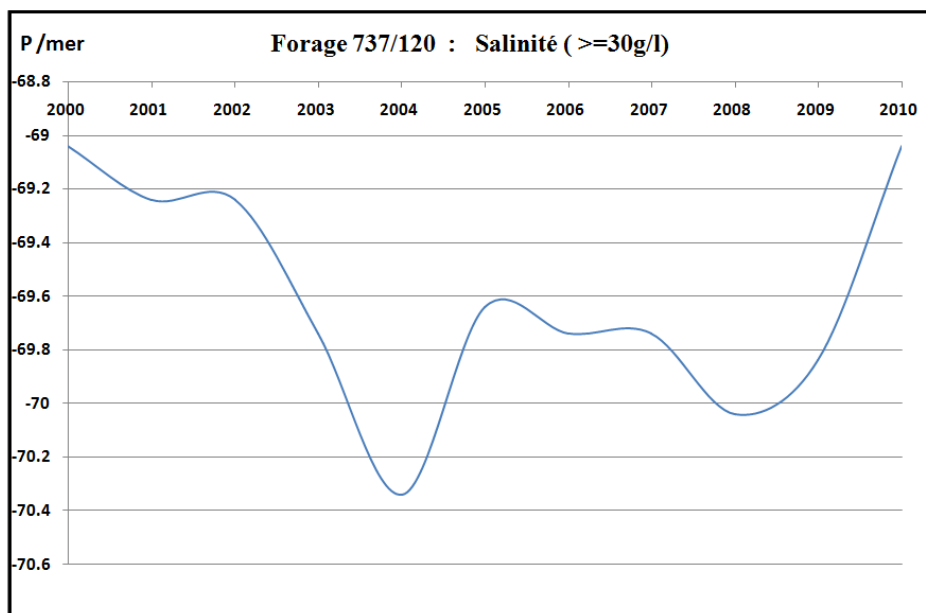


Figure 14. Évolution de la salinité  $\geq 30$  g/l dans le forage 737/120 en fonction de la profondeur (m) durant la période 2000-2009.

Figure 14. Evolution of salinity  $\geq 30$  g/l in borehole 737/120 according to the depth (m) during 2000-2009.

Tableau 3. Les crues de l'Oued Saquia El Hamra de 2003 à 2005 et leur débit de pointe enregistré au niveau du radier de Lamseid (DRH. 2005) (Direction Régionale Hydraulique).

Table 3. The floods of Oued Saquia El Hamra from 2003 to 2005 and their peak flow output recorded on the level of Lamseid raft (DRH. 2005) (Hydraulic Regional Management).

	Dates des crues au niveau du radier Lamseid à l'Est de la ville de Laâyoune				
	12 au 17-août-2003	20 au 27-août-03	26 au 29-oct-03	29 au 08-nov-03	11 au 27-fév-2005
Débits de pointe	18 m <sup>3</sup> /s	15 m <sup>3</sup> /s	09 m <sup>3</sup> /s	13 m <sup>3</sup> /s	10 m <sup>3</sup> /s

atteignant le substratum imperméable de la nappe (815/120, 1156/120, 1151/120, 737/120, 826/120) et qui sont alignés suivant une direction NS le long d'un front parallèle à la côte (Fig. 4), révèlent des taux de salinité qui témoigneraient d'une présence d'eau marine. Une corrélation de la salinité a été effectuée au niveau des cinq forages de contrôle les plus profonds avec utilisation du logiciel "Groundwater Modeling System GMS (Langevin Christian *et al.* 2003)". La coupe suivante montre une superposition de toutes les couches de la salinité de l'eau. Ces courbes plongent selon la direction NS en allant du forage 815/120 vers le forage 826/120 (Fig. 12).

Pour illustrer l'évolution temporelle de la conductivité électrique dans un point donné, le choix est porté sur deux piézomètres (1151/120 et 737/120), situés dans la partie centrale de la zone étudiée (Fig. 4). La représentation de la conductivité de l'eau en fonction de la profondeur/sol pour les différentes années affiche des courbes avec trois intervalles : un intervalle inférieur à 10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (limitant une profondeur où l'eau est non contaminée), un intervalle situé entre 10000 et 50000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (correspondant à la zone de transition entre l'eau de mer et l'eau de la nappe) et un intervalle

supérieur à 50000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (où s'installe la zone franche contaminée par l'eau de mer) (Fig. 13). Ceci correspond à la période 2000-2009. Le piézomètre (1151/120), situé relativement au Nord, présente une remontée d'eau de mer à une hauteur d'environ 56m. Le niveau de cette remontée est nettement inférieur que celui observé au Sud dans le point 737/120 où l'eau de mer commence à se manifester plus en profondeur aux environs de 95m. Par ailleurs, le suivi de la valeur de salinité supérieure ou égale à 30g/l (mené sur plusieurs années au niveau du piézomètre 737/120) montre une courbe irrégulière avec des pics plus ou moins élevés et deux grandes dépressions ; l'une entre 2003 et 2005 et l'autre entre 2008 et 2010 (Fig. 14). L'examen de l'historique disponible des crues de l'Oued Sakia El Hamra, atteste que les années 2003 et 2005 sont pluvieuses (Tab. 3) et ont connu des crues exceptionnelles (débit important supérieur à 10m<sup>3</sup>/s) contribuant à l'abaissement de la courbe de salinité jusqu'à la hauteur 70.3m en 2004. La nappe serait donc alimentée en grande partie par l'infiltration des eaux de crues lors des événements pluvieux persistants qui ont engendré un écoulement jusqu'à l'océan (Tab. 3).

L'étude géophysique par sondage électrique (DRH. 2003) réalisée au niveau de la nappe de Foum

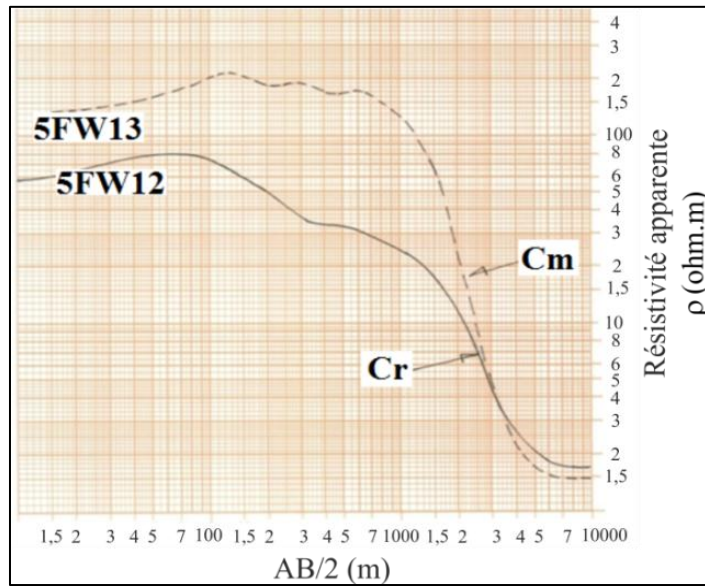


Figure 15. Diagramme bilogarithmique montrant la signature électrique du sondage 5FW12 envahie par l'eau de mer (DRH. 2003).  
 Figure 15. Diagram bilogarithmic showing the electric signature of the survey 5FW12 which is invaded by sea water (DRH. 2003).

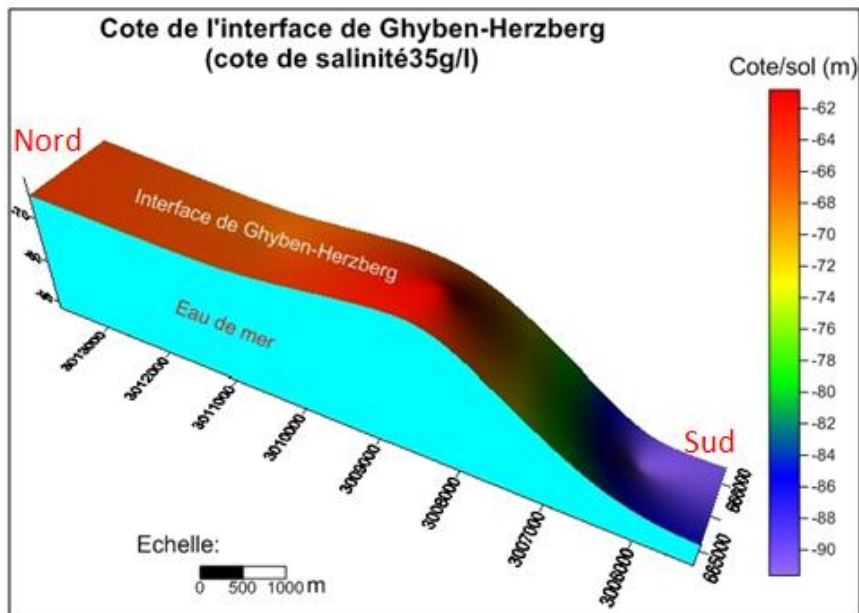


Figure 16. Représentation 3D de l'interface de la cote 35g/l le long du profil allant du forage 815/120 au Nord jusqu'au forage 826/120 au Sud (Fig. 4) en 2009.  
 Figure 16. 3D Representation of the interface of the dimension 35g/l along the going profile of borehole 815/120 in North up to 826/120 (Fig. 4) in the South for 2009.

El Oued montre l'existence de l'eau de mer en dessous de celle de la nappe. Les deux sondages électriques verticaux 5FW12 et 5FW13 situés très proches du forage 1151/120 au niveau du champ captant de l'ONEE (Fig. 4), montrent l'invasion de ce forage par l'eau très salée. Sur les deux signaux électriques de la figure 15, le niveau conducteur nommé  $C_m$ , qui indique la présence de marnes, montre la même réponse électrique avec le niveau conducteur  $C_r$  qui indique la présence de l'eau salée dans les formations géologiques. En effet, la baisse des valeurs de résistivité du niveau  $C_m$  (présentée sur le diagramme bilogarithmique) correspondrait au

substratum imperméable marneux d'âge Miocène (El Mokhtar *et al.* 2016).

#### **Intrusion saline : état de l'interface eau douce eau salée de la nappe**

L'interface du biseau salé a été mise en évidence au niveau de cinq piézomètres de contrôle profonds atteignant le substratum imperméable de la nappe (Fig. 4). Pour ce faire, deux profils dressés en 2009 et 2013 orientés Nord-Sud passant par ces piézomètres pour mettre en relief l'interface du Ghyben-Herzberg (Figures 16 et 17). Cette dernière occupe une profondeur

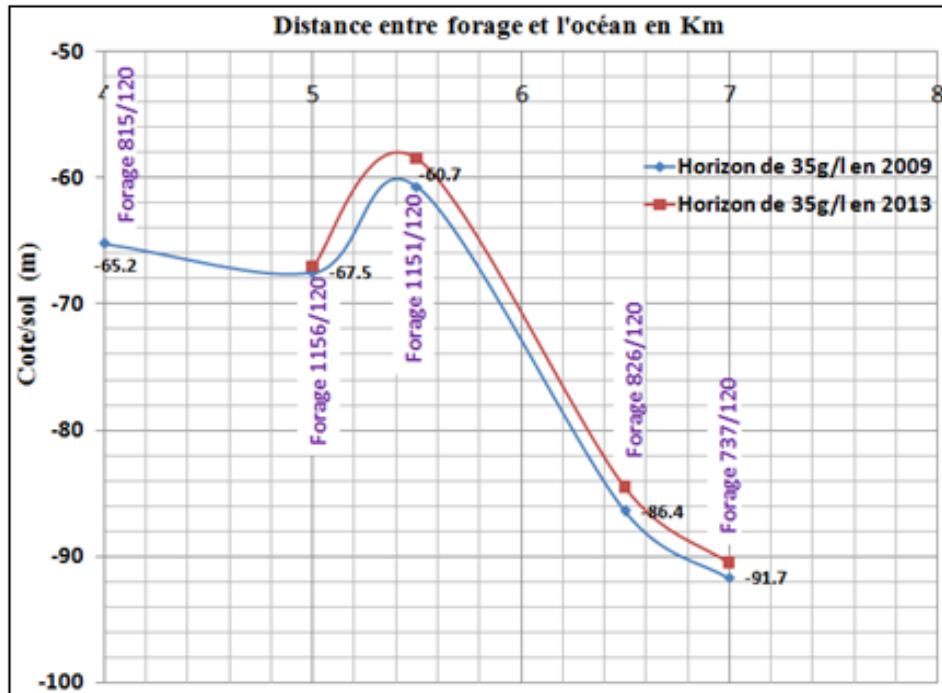


Figure17. Coupe de l'interface de salinité 35g/l qui montre l'avancement du biseau salé dans la nappe.  
 Figure 17. Interface section of salinity 35g/l which shows the advance of the salted level in the aquifer.

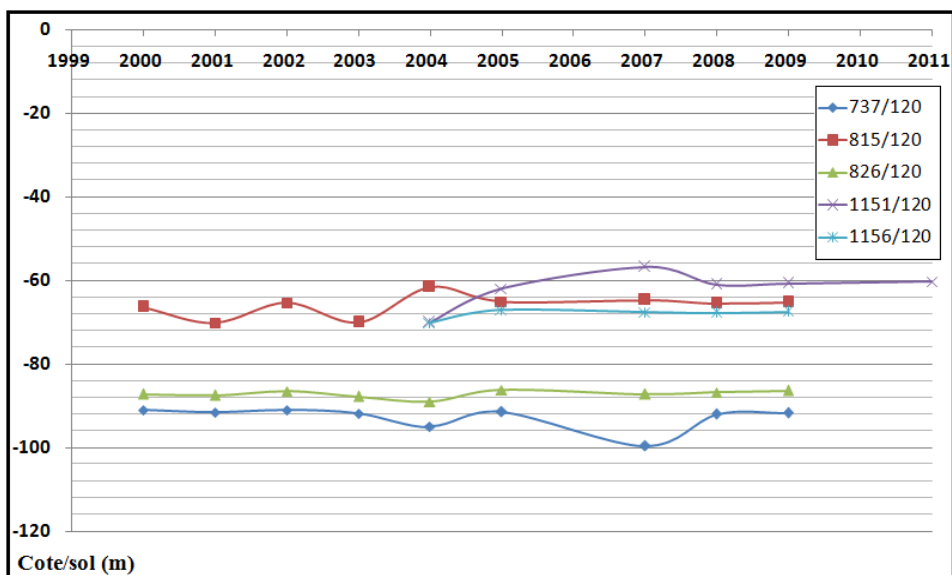


Figure18. Évolution de l'intrusion marine dans les cinq forages profonds de contrôle durant 2000-2011  
 Figure 18. Evolution of the marine intrusion in five boreholes during 2000-2011.

de 60 m/sol en 2009 et 58 m/sol en 2013 au niveau du forage 1151/120. Par la suite, la courbe de cette interface a descendu jusqu'à atteindre les profondeurs 91,7m en 2009 et 90,5m en 2013 au droit du forage 737/120 (Fig. 17). En effet, la forme et la position des deux interfaces du biseau salé (2009 et 2013) expliqueraient clairement alors le phénomène de l'invasion marine en créant un cône d'upconing au niveau du Forage 1151/120 (Fig. 17). Ce cône d'upconing correspond à la remontée de la salinisation causée par la surexploitation des eaux souterraines aux alentours du forage 1151/120 (Fig.

17). L'évolution spatio-temporelle de l'interface de Ghyben-Herzberg de la salinité (35g/l) dans les cinq piézomètres de contrôle durant la période 2000-2011 (Fig. 18), a montré que le biseau salé est plus profond dans la partie Sud par rapport au Nord du secteur étudié. De même, vers le Nord, les variations de l'interface eau douce-eau salée, sont beaucoup plus importantes en particulier au niveau des piézomètres 815/120 et 1151/120. Ce dernier forage enregistre une remontée particulière de 9,8m durant la période 2004-2009, attestant du déplacement du biseau salé

vers l'intérieur des terres avec des profondeurs de moins en moins importantes.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La nappe de Foum El Oued est une source importante d'approvisionnement en eau dans la région de Laâyoune - Foum El Oued. Elle est située dans une région caractérisée par un climat de type saharien où la pluviométrie annuelle moyenne ne dépasse pas quelques dizaines de millimètres (période 1993-2007). Ainsi, l'alimentation naturelle de la nappe par infiltration des précipitations est très faible. L'exploitation des eaux de la nappe a été accompagnée par un rabattement progressif de la nappe et une avancée considérable du biseau salé. Ce dernier a été mis en évidence par la position de cinq forages étudiés, alignés dans le sens nord-sud, obliquement par rapport à la côte. En effet, le forage 737/120, situé au sud de la nappe à une distance de 7 km de l'océan atlantique, affiche une contamination par l'eau salée (35g/l) atteinte à une profondeur de 91,7 m en 2009. Cette profondeur de l'interface (35g/l) remonte jusqu'à 65,2 m dans la partie nord au niveau du forage 815/120 situé à 5 km de la mer. Au centre du champ captant de l'ONEE, le forage 151/120, situé à 5,5m de l'océan, a connu une remontée brutale de l'interface eau douce-eau salée jusqu'à 60,7 m. Cette remontée explique la présence du phénomène d'upconing dû à la forte exploitation de la nappe dans ce secteur. L'évolution temporelle de cette interface durant la période 2009-2013 a montré des variations interannuelles considérables avec une tendance à l'élévation. La profondeur de l'interface eau douce/eau salée augmente de la côte océanique vers le continent suivant la direction Ouest-Est, elle se biseaute à une distance estimée à près de 7.5 Km et créant un cône d'upconing au centre du champ captant de l'ONEE. Elle n'est alors pas en équilibre naturel puisque son évolution spatio-temporelle montre une avancée vers le continent en parallèle avec l'augmentation des prélèvements d'eau de la nappe. Cette situation est amplifiée autour du champ captant de l'ONEE où la salinisation augmente localement. La forme de l'interface Ghyben-Herzberg qui représente la côte de 35g/l de salinité montre bien l'avancée du biseau salé à l'intérieur des terres. Devant cette situation critique il est impératif d'agir pour stopper cette tendance et éviter l'irréversibilité de la dégradation des sols. L'action peut commencer par une sensibilisation des agriculteurs pour se convertir vers une irrigation plus économe d'eau. L'alternative du dessalement des eaux de mer déjà mis en place peut être également développée pour réduire l'impact de la surexploitation du champ captant de l'ONEE sur l'avancée du biseau salé.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence du Bassin Hydraulique de Sakia El Hamra et Oued Eddahab (ABHSHOD) d'avoir fourni les données sur les forages

étudiés. Les remerciements vont également à la société AFRICA GEO-SERVICES d'avoir investi les travaux concernant ce présent travail. Egalement nos remerciements sont adressés aux rapporteurs d'avoir accepté d'examiner ce travail.

## REFERENCES

- Abdelhaleem Saleh A. I. 2007. *Impact of pumping on saltwater intrusion in Gaza coastal aquifer, Palestine*. Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master in Water and Environmental Engineering, Faculty of Graduate Studies, at An-Najah National University, Nablus, Palestine, 105.
- ABHSHOD (Agence du Bassin Hydraulique de Sakia El Hamra et Oued Eddahab) 2011. *Inventaire exhaustif des prélèvements des eaux souterraines dans les Bassins de Sakia El Hamra et Oued Eddahab*. Rapport 02/2010/ABHSHOD, Mission I, 69p.
- Alia Medina M. 1945a. Características morfológicas y geológicas de la zona septentrional del Sahara español. *Trabalho Instituto Ciencias National*. José de Acosta, Sér. Géol., t. in 4°, 260p.
- Alia Medina M. 1945b. El Cuaternario en el Sahara español. *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural*, t. XLIII, 149-163.
- Aminot A. & Kérouel R. 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. *Paramètres et analyses*. 74-78.
- Arfib B., Cavallera T. & Gilli E. 2006. Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. *Comptes Rendus Géoscience*, 338, 757-767.
- Barbecot F., Marlin Gibert C. *et al.* 1997. Geochemical evolution of a coastal aquifer to a Holocene seawater intrusion (Dogger aquifer, northern France). In: IAEA (Eds.), *Proceedings of an international symposium on isotope techniques in the study of environmental changes*, IAEA-SM- 349/15, Vienna, 275-282
- Barlow P.M. 2003. Ground Water in Freshwater – Saltwater Environments of the Atlantic Coast. *US Geological Survey*, 1262, 1-113.
- Bear J. 1979. *Hydraulics of Groundwater*. Mac Graw-Hill, Inc., 568 p.
- Bear J., Cheng A. H. D., Sorek S. *et al.* 1999. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*. Kluwer Academic Publishers, 625p.
- Bouderbala A. 2015. *Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviale de l'oued Nador - Tipaza (Algérie)*. Thèse de Doctorat en sciences de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, 277p.
- Cardona A., Carrillo-Rivera J.J., Huizar-Alvarez R. *et al.* 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environmental Geology*, 45, 350-366.
- CGG (Compagnie Générale de Géophysique) 1961. *Etude géophysique par sismique réflexion pétrolière dans le bassin sédimentaire Laâyoune-Dakhla*. Rapport 1961/DRH 60p.
- Chaillou G, Buffin-Bélanger T & St-Louis R. 2012. Chapitre 1, introduction générale, *Université du Québec à Rimouski*, 1-28.
- Chatelier N., Croiset N. & Surdyk N. 2011. *Montée du niveau marin induite par le changement climatique:*

- Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers de Métropole.* Rapport BRGM. 306p.
- Chimouni H. 2017. *L'évaluation du degré de pollution par l'intrusion marine de l'oued Sebaou (partie bas Sebaou).* Master en génie de l'environnement de l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes, Algérie, 94p.
- Choubert G. & Ambroggi R. 1953. Note préliminaire sur la présence de deux cycles sédimentaires dans le Pliocène marin du Maroc. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, t. 7, n°117, 5-53.
- Choubert G., Faure Muret A. & Hottinger L. 1966. Aperçu géologique du Bassin côtier de Tarfaya. In : Le Bassin côtier de Tarfaya, t. I, Stratigraphie. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n° 175, 7-106.
- De Montety V., Radakovitch O., Vallet-Coulomb C. *et al.* 2008. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes. In Confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta southern France. *Applied Geochemistry*, 23, 2337-2349.
- Dillon RS. & Soujy G. 1974. Geology of west Africa and Canary and Cape Verde Islands. In: Nairn AEM, Stehli FG (eds) *The ocean basins and margin*, 2. The north Atlantic: New York (Plenum Press), 315-390.
- DRH. 2003. *Étude géophysique par sondages électriques, par sondages à résonance magnétique nucléaire et par sismique dans le bassin sédimentaire Laâyoune-Dakhla.* Rapport 03/2003/DRH. 39p.
- DRH. 2005. *Etude de modélisation de la nappe de Fom El Oued; région de Laâyoune.* Rapport 04/2003/DRH, Mission I, 81p.
- DRH. 2007. *Etude d'un plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau (PDAIRE), dans le bassin du Sahara, Sud du Maroc.* Rapport 08/2007/DRH, Mission I, Volume 1, 86p.
- El Mansouri B., Loukili Y. & Esselaoui D. 2003. Mise en évidence et étude du phénomène de l'upconing dans la nappe côtière du Rharb (NW du Maroc). *Instituto Geologico y Minero de Espana*, Madrid. ISBN. 84, 7840-470-8.
- El Mokhtar M., Chibout M., El Kanti S. M. *et al.* 2016. Application des méthodes géophysiques à la détermination de la situation hydrogéologique de l'intrusion saline au niveau du champ captant de l'aquifère côtier de Fom El Oued, province de Laâyoune, Maroc. *Revue des Etudes Appliquées en Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement, Geomaghreb*, n°12, 1-11.
- El Mokhtar M., Chibout M., El Mansouri B. *et al.* 2018. Modeling of the Groundwater Flow and Saltwater Intrusion in the Coastal Aquifer of Fum Al Wad, Province of Laayoun, Morocco. *International Journal of Geosciences*, 9, 71-92. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.91005>
- Fekrache F. 2015. *Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba (Algérie).* Thèse du doctorat en sciences de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 279.
- Freeze R. A. & Cherry J. A. 1979. *Groundwater.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 604p.
- Frissant N., René-Craill C., Bonnier J. *et al.* 2005. *Le phénomène de l'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles.* Rapport BRGM/RP -54330-FR.
- Gaaloul N., Alexander H. & Cheng D. 2003. Hydrogeological and hydrochemical investigation of Coastal Aquifers in Tunisia-Crisis in overexploitation and salinization. *Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling and Management*, Merida, Mexico, 13p.
- Ghyben B. W. 1889. Nota in verband met de voorgenomenputboring nabij Amsterdam, Tijdschrift het koninklijk. *Instituutvoor Ingenieurs*, Den Haag, 8-22.
- Herzber, A. 1901. Die Wasserversorgung einiger Noordseebäder, *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, München, 44, 815-819, 45, 842-844.
- Hiroshiro Y., Jinno K., & Berndtsson R. 2006. Hydrogeochemical properties of a salinity-affected coastal aquifer in western Japan. *Hydrological Processes*, 20, 1425-1435.
- Kampioti A. & Stephanou E. 2002. The impact of bromide on the formation of neutral and acidic disinfection byproducts (DBPs) in Mediterranean chlorinated drinking water. *Water Resources*, 36, 2596-2606.
- Kashef A. I. 1983. Harmonizing Ghyben-Herzberg Interface with Rigorous Solutions. *Ground Water*, Vol. 21, n° 2, 153-159.
- Krimissa S., Michelot J. L., Bouchaou L. *et al.* 2004. Sur l'origine par altération du substratum schisteux de la minéralisation chlorurée des eaux d'une nappe côtière sous climat semi-aride (Chtouka-Massa, Maroc). *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 1363-1369.
- Langevin Christian D., Barclay Shoemaker W. & Weixing G. 2003. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT). *U.S. Geological Survey, Open-File Report 03-426.*
- Lecointre G. 1952. Recherches sur le Néogène et le Quaternaire marin de la côte atlantique du Maroc. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n° 174, t. III.
- Lecointre G. 1963. Note sur le Néogène et le quaternaire marins du Sahara espagnol (Seguiet el Hamra et Rio de Oro). *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, n° 71.
- Lecointre G. 1965. Une hypothèse sur l'âge de transgression quaternaire en Mauritanie. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, t. 25, n° 185, 79-80.
- Lecointre G. 1966. Néogène et quaternaire du Bassin côtier de Tarfaya. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n° 175, 255-288.
- Lehner P. & De Ruiter Pad. 1977. Structural history of the Atlantic margin of Africa. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 61, 961-981.
- Martinis B. & Visintin V. 1966. Données géologiques sur le bassin sédimentaire côtier de Tarfaya (Maroc Méridional). In :Reyre D (ed) *Sedimentary Basins of the African Coast*, part 1 (Atlantic coast), *Association of African Geological Surveys*, UNESCO, 13-26.
- MEM (Ministère d'Énergie et des Mines). 2002. *Carte géologique aux 100000èmes, feuille de Laâyoune.* NG 28-XXIII-I. Centre Régional de la Géologie de Laâyoune- Dakhla. ISSN 0374-9789, 53p.
- Oude Essink G.H.P. 2001. Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in the Netherlands. *A Numerical Study. Transport in porous media*, 43, 137-148.
- Paniconi C., Khlaifi I., Lecca G., *et al.* 2001. Modeling and Analysis of Seawater Intrusion. In *The Coastal Aquifer*



- of Eastern Cap-Bon, Tunisia. *Transport in Porous Media*, 43, 3-28.
- Panteleit B., Kessels W., Kantor W. *et al.* 2001. Geochemical characteristics of salinization-zones in the coastal aquifer test field (CAT-Field) in North-Germany, in: Proc. *1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management*, Essaouira, Maroc. 1-11.
- Park S.H., Yun T.H., Chae G.T. *et al.* 2005. Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea. *Journal of Hydrology*, 313, 182-194.
- Petalas C. & Lambrakis N. 2006. Simulation of intense salinization phenomena in coastal aquifers – the case of the coastal aquifers of Thrace. *Journal of Hydrology*, 324, 51-64.
- Pinder G.F. & Cooper H.H Jr. 1970. A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front. *Water Resources Research*, 6 (3), 875-882.
- Post V.E.A. 2004. *Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene*. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 138 p.
- Pulido-Leboeuf P., Pulido-Bosch A., Calvache M. L. *et al.* 2003. Strontium,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  and  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro Aquifer (SE Spain). *Comptes Rendus Geoscience*, 335, 1039-1048.
- Ratschiller L. K. 1970. Lithostratigraphy of the northern Spanish Sahara. *Memoria Museo Tridentino di Scienze Naturali trento*, vol. XVIII, fasc. 1, 9-78.
- Shtivelman V., Goldman M., 2000. Integration of shallow reflection seismics and time domain electromagnetics for detailed study of the coastal aquifer in the Nitzanim area of Israel. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 197-215.
- Smith B. 1988. Ground water flow and salt water encroachment in the upper Floridan aquifer, Beaufort and Jasper Counties, SC. *U.S. Geological Survey Water Resources Investigations*, Report 87-4285, 61p.
- Snyder M., Taillefert M. & Ruppel C. 2004. Redox zonation at the saline-influenced boundaries of a permeable surficial aquifer: effects of physical forcing on the biogeochemical cycling of iron and manganese. *Journal of hydrology*, 296, 164-178.
- UNESCO. 1991. Hydrology and water resources of small islands, a practical guide. Studies and reports on hydrology No. 49. Prepared by Falkland, A. (ed.) and Custodio, E., with contributions from Diaz-Arenas, A. & Simler, L. and case studies submitted by others. UNESCO, Paris, 435p.
- White I. & Falkland T. 2010. Management of freshwater lenses on small Pacific islands. *Hydrogeology Journal*, 18, 227-246.

Manuscrit reçu le 06/08/2017

Version révisée acceptée le 05/11/2018

Version finale reçue le 13/11/2018

Mise en ligne le 15 /11/2018