

Impact des eaux de réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

Impact of water recharge on the ground water quality of the Bouteldja unconfined dune aquifer

Nadjib Haied¹, Salah Chaab¹, Bachir Saaidia² & Nabil Bougherira²

¹ Laboratoire de Géologie, Université Badji Mokhtar, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

² Laboratoire Ressource en Eau et Développement Durable, Université Badji Mokhtar, BP 12, 23000, Annaba, Algérie.

Soumis le : 03.07.2013

Révisé le 29.11.2014

Accepté le : 07.01.2015

المخلص :

تأدى استغلال غشاء كتلة الكثبان الرملية لبوتلجة الى انخفاض في مستوى المياه الجوفية و تقدم مياه البحر خاصة القريبة منها من الساحل (مثال : منطقة الملاحه). تعتبر إعادة التغذية واحدة من وسائل دعم مستوى المياه الجوفية و إعادة التوازن للغشاء في منطقة تتركز فيها الآبار، كمنطقة برج علي باي و في فترة طلب كبير. الفكر قد تتمثل في تعبئة البحيرة السوداء "القرعة الزرقا" في فصل الصيف، لما تكون جافة، وقرعة برج علي باي التي كانت في وقت مضى مغمورة، خلال الفترات الجافة، اعتمادا على مياه السد المعالجة. ان نموذجا هيدروديناميكيا أنجز من اجل تقييم تفاعل الغشاء في منطقة برج علي باي على المستوى الكمي. النتائج المحصلة تبين تحسن واضح في الحالة الهيدروديناميكية للغشاء و تعويض جزئي للتدفقات المستخلصة بواسطة مياه إعادة التغذية.

من المهم معرفة أن كائن إمكانية تجسيد مشروع كهذا تمر عبر المحافظة على نوعية المياه الجوفية التي تعتبر ممتازة. لهذا الغرض أنجز نموذجا هيدروديناميكيا انطلاقا من المعطيات الميدانية التي بحوزتنا من اجل تقييم النوعية الهيدروديناميكية للمياه الجوفية و ملاحظة تطور و توسع رقعة تأثير تركيز مياه التعبئة على مياه الغشاء و أثرها على المدى المتوسط على استغلال الغشاء.

الكلمات المفتاحية : غشاء - إعادة التغذية - نموذج هيدروديناميكيا - برج علي باي - بوتلجة

Résumé

L'exploitation de la nappe du massif dunaire de Bouteldja s'est traduite par un abaissement du niveau piézométrique et une intrusion des eaux marines ressentie surtout dans les zones proches du rivage (ex: zone des Salines). La réalimentation artificielle est l'un des moyens pour soutenir le niveau piézométrique et rééquilibrer la nappe dans une zone où sont concentrés les forages, telle que la zone de Bordj Ali Bey à une période de forte demande. L'idée serait de remplir le Lac Noir (Garaat Ez Zerga), en été quand il est à sec, et Garaat Bordj Ali Bey, qui était jadis inondée, durant les périodes sèches à partir des eaux traitées du barrage.

Un modèle hydrodynamique a été établi pour évaluer, sur un plan quantitatif, la réaction de l'aquifère dans la région de Bordj Ali Bey. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration de la situation hydrodynamique de la nappe et une compensation en partie des débits extraits par les eaux de réalimentation. Il est important de savoir que la faisabilité d'un tel projet passe par la préservation de la qualité des eaux souterraines qui est jugée excellente. A cet effet un modèle hydrodispersif est établi à partir des données de terrain pour évaluer la qualité hydrochimique des eaux souterraines et visualiser l'évolution et l'extension de l'influence de la concentration des eaux de recharge sur les eaux de la nappe aquifère et son impact à moyen terme sur l'exploitation de la nappe.

Mots clés : aquifère - réalimentation artificielle - modèles hydrodispersif - Bordj Ali Bey - Bouteldja.

Abstract

The exploitation of Bouteldja dune groundwater aquifer has resulted in a decrease of water table and intrusion of seawater that was felt essentially in seashore areas (eg area of Salines).

Artificial recharge is the main mean to support and recover the water table in an area where drilling is concentrated, as it is in the area of Borj Ali Bey, in a period of high demand. The idea is to fill with water the Black Lake (Garaat Ez Zerga) in summer, when it is dry, and Garaat Bordj Ali Bey, during dry periods from the treated water of the Mexa dam. The Garaat Bordj Ali Bey zone was filled in the past.

A flow model was established to evaluate quantitatively the response of the aquifer in the region of Bordj Ali Bey. The results show a significant improvement in the flow situation of the aquifer and a compensation of the discharges by water recharge. It is important to know that the feasibility of such project needs to preserve the quality of the groundwater which is considered excellent. For this purpose a hydro-dispersive model was established from survey data to evaluate the hydrochemical quality and to visualize the evolution and extension of the concentration of the recharged water through the aquifer and its impact on the exploitation of the aquifer.

Keywords : aquifer - artificial recharge - hydro-dispersive model - Bordj Ali Bey – Bouteldja.

*Auteur correspondant : nhaied@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

La recharge artificielle permet d'augmenter les ressources en eaux souterraines et consiste à alimenter un aquifère par les eaux de surface qui s'infiltrent dans le sol et arrivent à la nappe [1,2,3,4,5,6]. Ceci permet de compenser la baisse du niveau piézométrique induite par le pompage excessif d'un aquifère.

Depuis plus de 70 ans, dans de nombreux pays, la réalimentation artificielle a été utilisée comme un moyen pour améliorer la situation hydrodynamique des aquifères et rééquilibrer leur piézométrie. Ainsi, C. Stefanescu et A. Dassargues [7] ont simulé une recharge artificielle par injection des eaux de surface dans les forages pour soutenir l'AEP pour la ville de Bucarest. A. Vandenbohede et al. [8] ont étudié l'impact de la recharge artificielle depuis 2002 avec des eaux usées ayant subi un triple traitement, en utilisant deux bassins d'infiltration, implantés dans les dunes de la plaine côtière dans la région ouest de la Belgique. F. Pliakas et al. [9] ont décrit le modèle de développement de la recharge artificielle de l'aquifère Polysitos dans la plaine Xanthi (Thrace, Grèce) en réactivant, depuis 1994 un ancien lit de la rivière Kosynthos.

L'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja, composé de sable fins, est exploitée avec un débit global de 30775 m³/jour. Ce débit sera insuffisant, compte tenu de la demande croissante en eau potable des populations d'Annaba et d'El-Tarf et des besoins en eau d'irrigation. Ces besoins dépasseront inéluctablement les 50 000 m³/jour. Le recours à la réalimentation artificielle de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja pourrait être une des solutions pour augmenter les capacités de l'aquifère en eaux souterraines. La réalimentation artificielle se réaliserait en inondant, avec les eaux traitées du barrage Mexa, Garaa Zerga et Garaa Bordj Ali Bey en périodes sèches lorsqu'ils sont à sec.

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques hydrodispersives de la zone des lacs, afin d'évaluer l'influence hydrochimique des eaux de recharge sur la qualité des eaux souterraines, car il est impératif que la qualité des eaux souterraines soit sauvegardée lors d'un processus de réalimentation artificielle, sachant que les eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja sont considérées d'excellente qualité.

2. CONTEXTE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE

Le massif dunaire de Bouteldja se localise dans la partie orientale de l'Algérie, à l'extrême Est de la plaine alluviale d'Annaba. Il fait partie du bassin versant de la Mafragh, d'une superficie d'environ 2660 Km². Il est limité au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par la plaine de Bouteldja, à l'Ouest par la Mafragh et à l'Est par le massif du Cap Rosa (Fig. 1). Le climat de la région est méditerranéen avec des précipitations moyennes de 632 mm selon les données de l'Office National de la Météo, de 2010 et une évapotranspiration réelle, calculée par la méthode Thornthwaite de 465 mm. L'excédent de 167 mm se répartit entre le ruissellement et l'infiltration efficace.

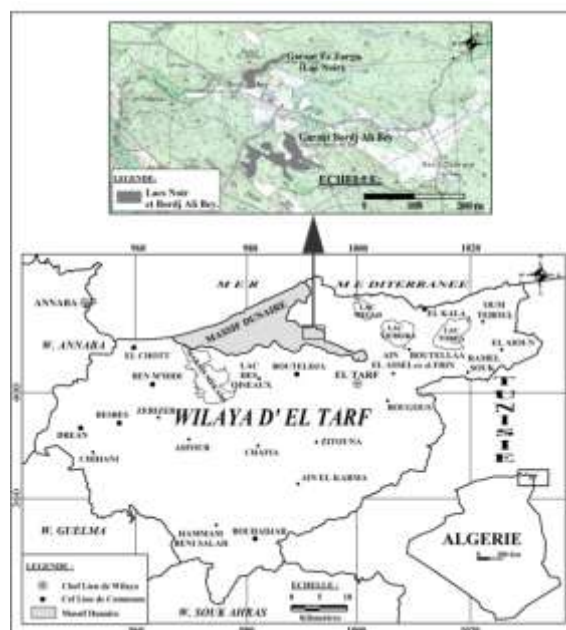


Figure 1 : Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja.

Le ruissellement reste faible par rapport à l'infiltration efficace, étant donné que le sol et la zone non saturée sont constitués de sable.

3. CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La géologie de la région est constituée essentiellement par des formations qui datent du Crétacé au Quaternaire actuel [10]. L'aquifère du massif dunaire de Bouteldja s'étend sur 160 km² et est constitué essentiellement de sable quaternaire avec des intercalations de lentilles argileuses (fig. 2).

La piézométrie de 1994 (fig. 3) montre distinctement un écoulement souterrain, à partir d'une ligne de partage des eaux, vers la mer méditerranéenne au Nord et les terrasses de l'Oued Kébir Est au Sud.

L'alimentation de la nappe se fait principalement par l'infiltration des eaux de pluie, ainsi que par le ruissellement diffus sur les reliefs de Djebel Koursi. Nous constatons que le niveau piézométrique a fortement baissé dans sa partie Est en 2005 par rapport à celui de 1994. Il est à noter que la piézométrie de 1994 reste une référence du niveau statique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja car à cette période tous les forages étaient à l'arrêt à cause des incendies qui se sont déclarés dans la région. Les paramètres hydrodynamiques sont représentés par la perméabilité K et le coefficient de porosité efficace n_e .

Les valeurs du coefficient de perméabilité sont élevées dans la zone Sud-Est, où la proportion de graviers est plus importante (fig. 4). Dans la partie Ouest, elles avoisinent 10^{-5} m/s, alors que dans la partie Est, elle est de 10^{-4} m/s [1, 12, 13].

La porosité efficace des sables constituant le massif dunaire a été déterminée sur le terrain par des essais de pompage dans les forages (ANRH 1994) [11, 12] et au niveau du laboratoire par égouttage et correspond à un taux de 10 %.

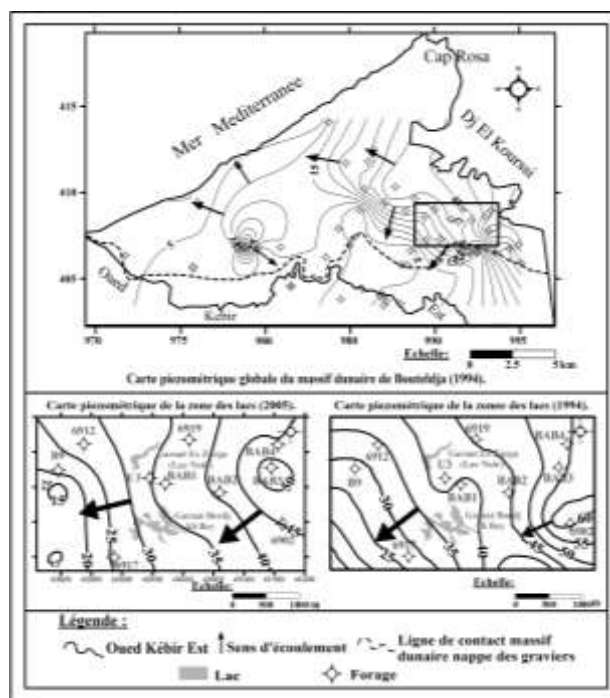


Figure. 3: Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1994

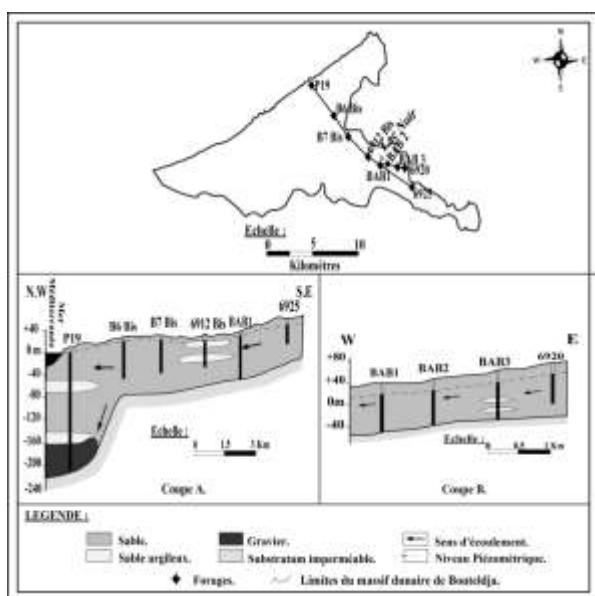


Figure 2 : Coupe hydrogéologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja

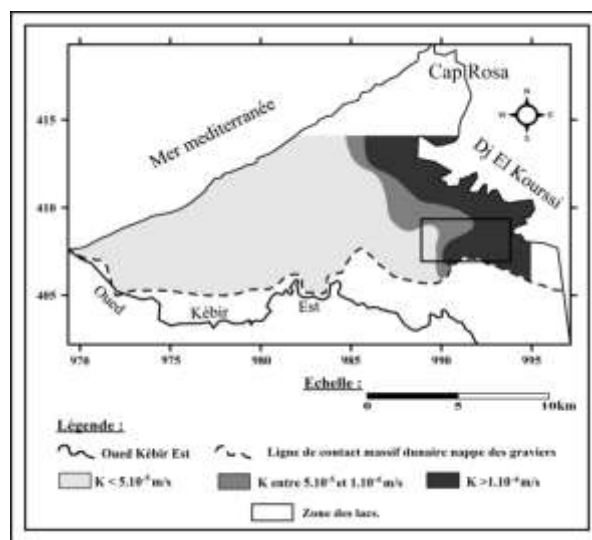


Figure 4 : Carte de répartition des valeurs de perméabilité de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja.

4. MATERIELS ET METHODES

La méthodologie préconisée consiste à déterminer les paramètres hydrodispersifs dans les zones de Garaat Ez Zerga et Bordj Ali Bey qui seront intégrés dans le modèle hydrodispersif et la qualité hydrochimique des eaux du barrage, destinées à la réalimentation. Le modèle hydrodispersif établi permettra de suivre l'évolution du chimisme des eaux de réalimentation et leur impact sur les eaux souterraines de la nappe du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey.

4.1 Détermination des paramètres hydrodispersifs

La détermination des paramètres hydrodispersifs a été effectuée en utilisant la méthode de traçage à l'aide d'une solution préparée (fluorescéine 0,1mg/l) [14]. Les essais de traçage ont été réalisés sur un perméamètre à charge constante en régime permanent.

Au début le dispositif est saturé avec de l'eau claire, c'est-à-dire, sans fluorescéine. Au moment où la fluorescéine est versé et qui correspond au temps $t = 0$, nous prélevons des échantillons à la sortie du dispositif à différents pas de temps et ceci jusqu'à ce qu'il y ait disparition de la coloration de la fluorescéine dans l'eau.

La concentration de la fluorescéine des échantillons prélevés est mesurée grâce à un fluorimètre.

Pour l'interprétation des résultats des tests de traçage à la fluorescéine nous avons utilisé la relation (1) [14] :

$$\bar{C} = \frac{C - C_0}{C^0 - C_0} = 0.5(1 - \text{erf}(\xi)) \quad (1)$$

$$\text{Avec : } \xi = \frac{n_e \cdot l - v \cdot t}{2\sqrt{n_e \cdot D \cdot t}} \quad (2)$$

Cette relation représente la solution approchée de l'équation différentielle de la dispersion :

$$n_e \frac{\delta c}{\delta t} + v \frac{\delta c}{\delta x} = \delta \left(D \frac{\delta c}{\delta x} \right) \quad (3)$$

En posant $N_p = \frac{t}{\Delta t}$ où N_p représente le numéro de l'échantillon et Δt le pas de temps. La deuxième équation devient :

$$\xi = \frac{n_e \cdot l - \frac{4V}{\pi d^2} \cdot N_p}{2\sqrt{n_e \cdot D \cdot \Delta t \cdot N_p}} \quad (4)$$

$$\text{avec la vitesse } v = \frac{4V_e}{\pi d^2 \Delta t}$$

4. 2. Qualité chimique des eaux souterraines et de surface

4. 2. 1. Les eaux souterraines

Les campagnes successives d'analyses physico-chimiques réalisées par le laboratoire central de l'A. D. E d'Annaba ont porté sur les éléments majeurs. Le faciès chimique dominant des eaux du massif dunaire de Bouteldja est le faciès chloruré sodique.

4. 2. 2. Eaux du Lac Noir et eaux du barrage Mexa

La campagne de mesures et d'échantillonnage à été effectuée en Mai 2011 sur les eaux traitées du barrage Mexa et les eaux du Lac Noir. Les paramètres physico-chimiques (pH, conductivité et salinité) sont mesurés in situ au moyen d'appareillage de terrain avec des sondes sélectives (multi paramètres). Les échantillons ont été prélevés dans des flacons en polyéthylènes (deux flacons par échantillon), l'un pour l'analyse des sels nutritifs après addition de quelques gouttes de chloroforme, l'autre pour l'analyse des éléments majeurs (après addition de quelques gouttes d'acide nitrique).

Les seuls résultats d'analyse des eaux souterraines de la nappe au niveau du forage BAB1, proche des sites de réalimentation, datent de Mai 2000. Depuis, les forages sont inaccessibles pour des raisons de sécurité.

4. 3. Modèle hydrodispersif

Au préalable un modèle hydrodynamique a été établi pour simuler l'écoulement souterrain dans tout le système aquifère du massif dunaire de Bouteldja avec la détermination des paramètres hydrogéologiques et des conditions aux limites [15]. La simulation de la réalimentation à partir du site (Garaat Ez Zerga et Garaat Bordj Ali Bey) a permis de constater une nette amélioration de la situation hydrodynamique [16]. Les débits exploités de

la nappe par les forages ont été compensés en partie par la recharge artificielle. Dans un souci d'évaluer l'influence des eaux de recharge sur la qualité des eaux souterraines, nous avons établi un modèle hydrodispersif, intégré dans le logiciel Modflow 3.1 [17], et permettant de simuler la propagation du résidu sec à l'aide du module MT3DMS [18]. Dans ce dernier nous avons introduit les paramètres hydrogéologiques et les conditions aux limites, utilisés dans le modèle d'écoulement, ainsi que les paramètres hydrodispersifs, tels que la dispersivité et le coefficient de dispersion (α_l , D), déterminés au laboratoire selon la méthodologie décrite précédemment. La méthodologie préconisée est de simuler la salinité des eaux de recharge, par l'intermédiaire du résidu sec et de visualiser sa propagation, durant une période de 5 ans.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

Echantillon I :

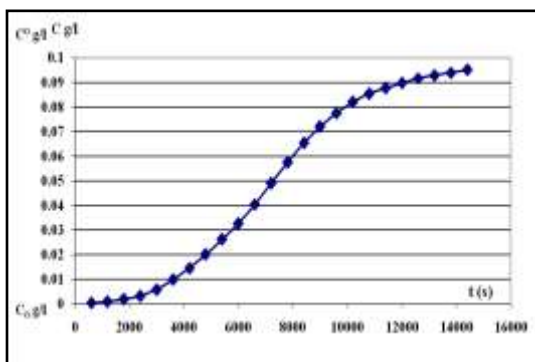


Figure. 5 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps.

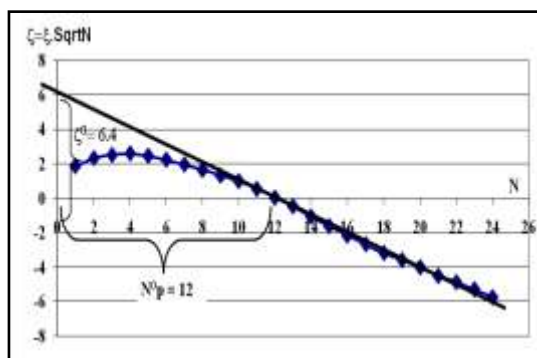


Figure. 6 : Graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p .

Echantillon II :

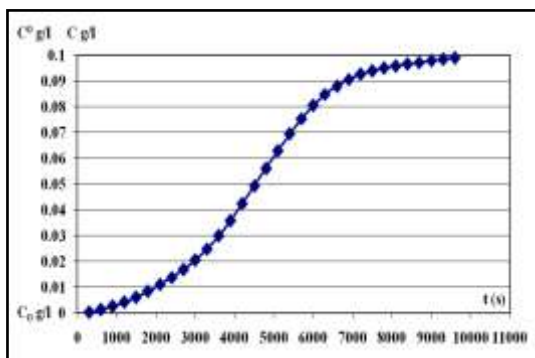


Figure. 7 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps.

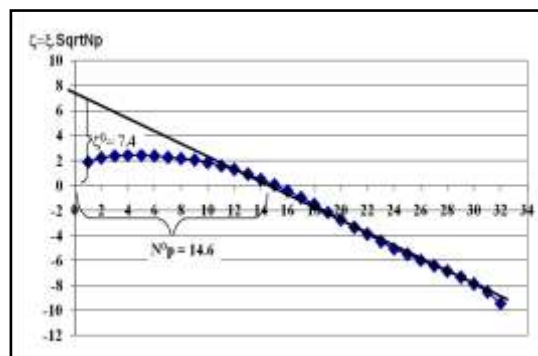


Figure. 8 : Graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p .

5. 1. Les paramètres hydrodispersifs :

La détermination des paramètres hydrodispersifs au voisinage du lac Noir avait pour objectif de connaître le pouvoir autoépuration des sables.

Les résultats obtenus ont permis de tracer quatre graphes [14] : Les deux premiers de chaque cas (échantillon I Fig.5 et II Fig.7) représentent la concentration cumulée en fonction du temps $C(g/l)=f(t)$ et les deux derniers (échantillon I, Fig. 6 et II, Fig. 8) représentent $\zeta = \xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p .

Ainsi :

$$\zeta = \xi\sqrt{N_p} = \text{inverf}(1 - 2\bar{C}) \cdot \sqrt{N_p} = \zeta^0 \left(1 - \frac{N_p}{N_p^0} \right) \tag{5}$$

$$\text{Avec } \zeta^0 = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{n_e}{D \cdot \Delta t}} \quad \text{et} \quad N_p^0 = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot n_e}{4 \cdot V_e}$$

Echantillon I :

$$D = \frac{V_e}{\pi.d^2.l.\Delta t} \times \frac{N_p^0}{(\zeta^0)^2} \quad \text{et}$$

$$n_e = \frac{4.V_e}{\pi.d^2.l.} \times N_p^0.$$

L'application numérique donne :

$$n_e = 0.25 \quad \text{ou} \quad 25 \%$$

$$v = 3.85 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$D = 2.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$D = v. \alpha_l \quad \text{donc} \quad \alpha_l = \frac{D}{v} = 0.67 \text{ m}$$

Echantillon II :

$$D = \frac{V_e}{\pi.d^2.l.\Delta t} \times \frac{N_p^0}{(\zeta^0)^2} \quad \text{et}$$

$$n_e = \frac{4.V_e}{\pi.d^2.l.} \times N_p^0.$$

L'application numérique donne :

$$n_e = 0.38 \quad \text{ou} \quad 38 \%$$

$$v = 9.63 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$D = 5.83 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$D = v. \alpha_l \quad \text{donc} \quad \alpha_l = \frac{D}{v} = 0.61 \text{ m}$$

où α_l représente la dispersivité longitudinale, qui caractérise la distance parcourue par le polluant ou la longueur du panache polluant la nappe.

Les valeurs obtenues démontrent que le traceur utilisé en l'occurrence la Fluorescéine se disperse avec une faible vitesse.

5. 2. Qualité chimique des eaux souterraines et de surface

5. 2. 1. Les eaux souterraines :

D'après les résultats d'analyse des eaux souterraines au niveau du forage BAB1 (Tab. 1), les analyses chimiques traitées et interprétées par le laboratoire central de l'A.D.E montrent que les eaux souterraines de la nappe libre du

massif dunaire de Bouteldja sont d'excellente qualité.

5. 2. 2. Les eaux du Lac Noir et du barrage Mexa

La détermination de la qualité des eaux du barrage Mexa, qui sont traitées au préalable et destinées à la réalimentation artificielle de la nappe, est primordiale. car elles peuvent engendrer une détérioration de la qualité chimique des eaux de la nappe.

Tableau. 1 : Analyses chimiques des eaux du lac noir, du barrage et du forage BAB1.

	Forage BAB1	Echantillon I	Mexa traité
	(eau souterraine)	(eau du lac)	(eau de barrage)
	Mai 2000	Mai 2011	Mai 2011
pH	6.07	6.64	7.69
Cond. (µS/cm)	139	1290	499
TDS (mg/l)	140	861	380
Ca (mg/l)	4.01	8.01	58.51
Mg (mg/l)	3.40	1.45	10.59
Na (mg/l)	26	288.76	33.02
K (mg/l)	2	3.75	13.66
Cl (mg/l)	32.62	28.36	46.08
HCO₃ (mg/l)	46.8	7.32	111.02
SO₄ (mg/l)	17	517.5	105.6
NH₄ (mg/l)	0.05	0.062	0.064
NO₂ (mg/l)	0,02	0.018	0.01
NO₃ (mg/l)	1	5.35	1
PO₄ (mg/l)	0.03	0,183	0.065
DBO 5 (mg/l)	-	0	0

5. 2. 2. 1. Les paramètres physico-chimiques

Les eaux du lac Noir sont un peu acide par rapport à celles des eaux traitées du barrage Mexa qui sont légèrement neutres. Cette légère acidité est due à l'augmentation de la température qui diminue la solubilité du CO_2 . Les valeurs de conductivité des eaux du lac et du barrage sont élevées et sont de l'ordre de $1290 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $499 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement.

5. 2. 2. 2. Les éléments majeurs

La majeure partie de ces éléments montrent des valeurs inférieures aux normes, sauf celles du sodium et des sulfates qui dépassent (fig. 9).

A partir du moment où les eaux du Lac sont essentiellement alimentées par les eaux souterraines de la nappe (le Lac Noir est alimenté par une source), mais également par les précipitations directes, le contact de ces eaux avec l'air atmosphérique favorise une concentration par évaporation des sels dissous, et plus particulièrement celle du NaCl .

Dans notre cas, les teneurs en SO_4 sont très élevées et dépassent les normes à cause de la tourbe qui constitue le lit du Lac Noir. Les eaux en contact avec ces matières carbonées réductrices, non seulement seront privées d'oxygène, mais encore renfermeront de l' H_2S par réduction de leurs sulfates. C'est ce que l'on peut observer au niveau des eaux du lac, où la présence d'un trouble blanc jaune laisse penser à un précipité de soufre élémentaire [11].

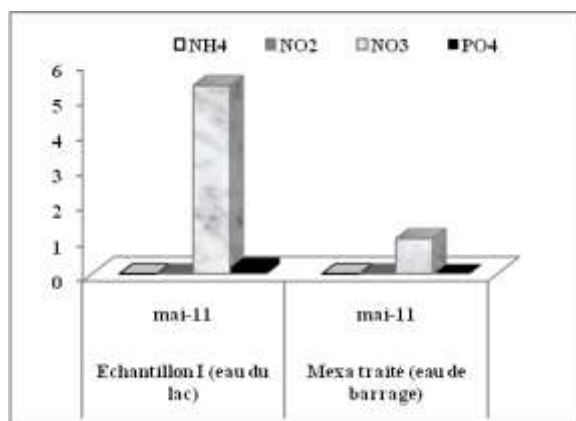


Figure. 9 : Histogramme de la variation des éléments majeurs des eaux du lac et du barrage.

En plus de la réduction des sulfates, l'oxydation des matières carbonées conduira à des teneurs au dessus de la normale en CO_2 libre et, en l'absence de bases susceptibles de saturer le CO_2 d'équilibre, les eaux resteront agressives.

©UBMA – 2015

5. 2. 2. 3. Les sels nutritifs

La concentration de ces éléments est faible, sauf celle des nitrates du Lac noir qui sont légèrement élevées ($5,35 \text{ mg}/\text{l}$). Cependant les valeurs restent inscrites dans les normes préconisées (fig. 10).

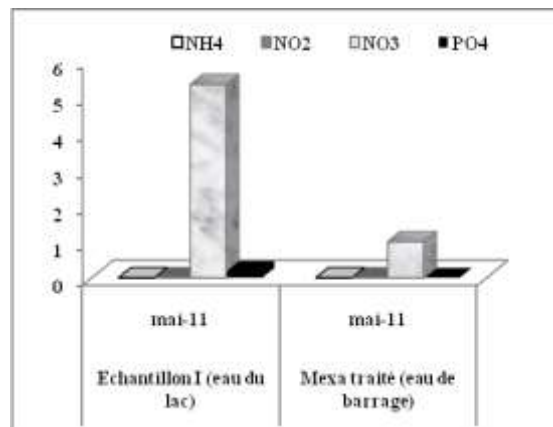


Figure. 10 : Histogramme de la variation des sels nutritifs des eaux du lac et du barrage.

5. 2. 2. 4. La demande biologique en oxygène

La demande biologique en oxygène (DBO_5) analysée sur les eaux du lac et celles du barrage, est presque nulle ce qui démontre que toutes les eaux analysées ne renferment ni polluant, ni élément pathogène.

5. 3. Simulation de la propagation du résidu sec

La réalimentation artificielle de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja, sur un plan hydrodynamique, est possible dans la région de Bordj Ali Bey [16].

Sur un plan qualitatif, les eaux du barrage Mexa, utilisées dans le processus de réalimentation, vont-elles modifier la qualité des eaux souterraines de la nappe en augmentant leur résidu sec?

Les analyses chimiques des eaux traitées du barrage ont montré que ces dernières sont de bonne qualité, d'un point de vue chimique et bactériologique. Cependant, elles présentent des valeurs plus ou moins élevées du résidu sec, sans pour autant dépasser les normes.

Le model hydrodispersif simule la propagation de la salinité sur une période de 5 années successives.

La réalimentation doit se produire durant la période sèche de l'année, c'est à dire de Mai à Octobre, en utilisant les eaux traitées du barrage Mexa, dont le résidu sec est de $380 \text{ mg}/\text{l}$. Cependant durant la période des hautes eaux, les eaux du Lac Noir, qui devient inondé,

acquièrent un résidu sec de l'ordre de 861 mg/l, grâce notamment aux eaux de pluie chargées en NaCl, vu que le Lac est très proche de la mer [19]. Il est important de noter que le résidu sec des eaux souterraines avoisine les 140 mg/l. Les figures 11 et 12 montrent que l'évolution de la propagation de la minéralisation, sur la période de 5 ans, est plus prononcée dans le sens de l'écoulement. Elle diminue rapidement

pour atteindre celle des eaux souterraines avant même qu'elle n'atteigne les forages U3, 6917 et BAB1, qui sont les plus proches des deux lacs. Cette diminution de la concentration se produit certainement dans la couche semi-perméable, formée principalement de la tourbe, colmatant le fond du Lac Noir.

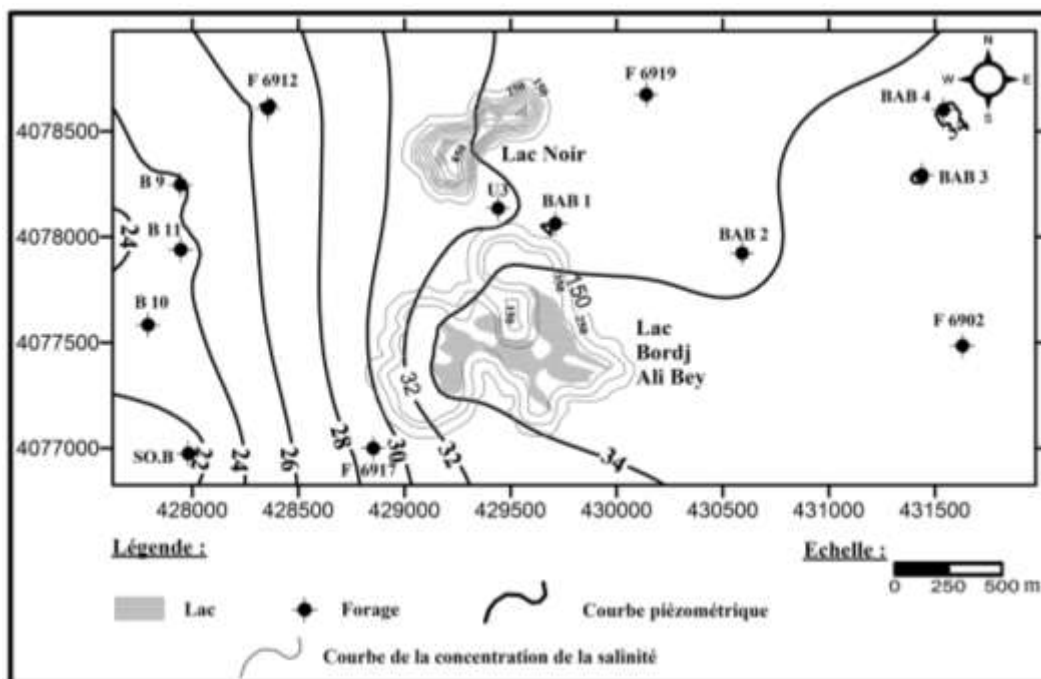


Figure. 11 : Carte de la propagation de la salinité durant la période sèche de la première année de simulation.

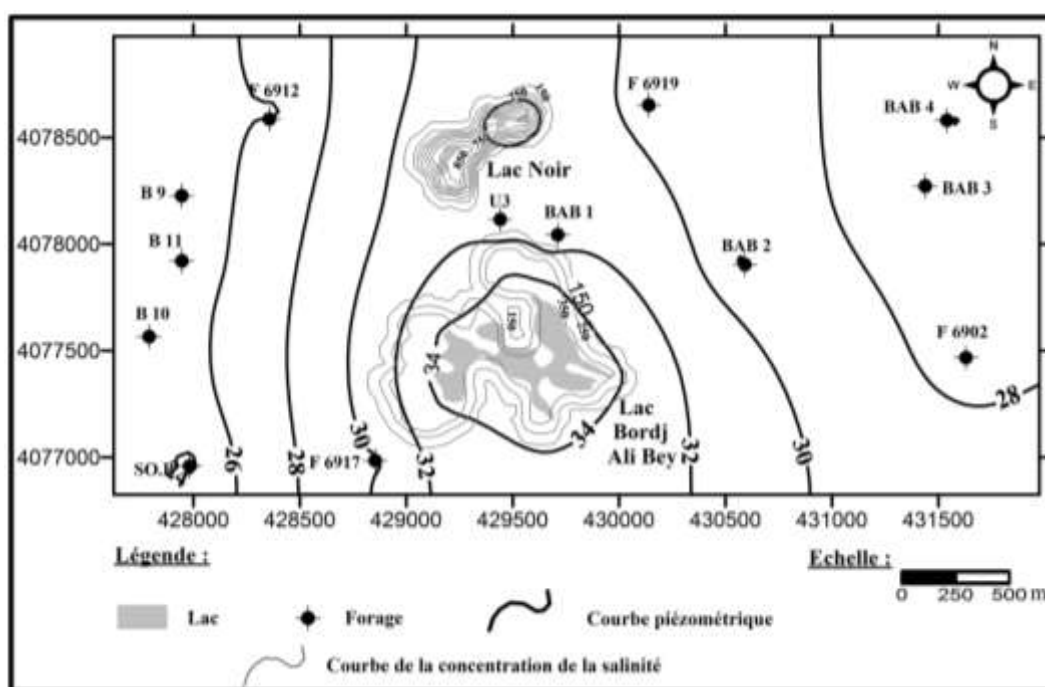


Figure. 12 : Carte de la propagation de la salinité durant la période sèche de la dernière année de simulation.

6. CONCLUSION

La nappe du massif dunaire de Bouteldja est intensivement exploitée ce qui s'est traduit par un abaissement du niveau piézométrique et une intrusion des eaux marines, ressentie surtout dans les zones proches du rivage (ex: zone des Salines). La réalimentation artificielle est un des moyens appropriés pour soutenir le niveau piézométrique et rééquilibrer la nappe dans une zone où sont concentrés les forages, telle que la zone de Bordj Ali Bey à une période de forte demande. L'inondation du Lac Noir (Garaat Zerga), en été quand il est à sec, et Garaat Bordj Ali Bey, qui était jadis inondée, durant les périodes sèches à partir des eaux traitées du barrage, serait faisable sur les plans hydrodynamique et hydrochimique. Ainsi, les résultats du modèle hydrodynamique montrent une nette amélioration de la situation hydrodynamique de la nappe et une compensation en partie des débits extraits par les eaux de réalimentation. L'aspect hydrochimique a nécessité l'analyse hydrochimique des eaux traitées du barrage Mexa, la détermination des paramètres hydrodispersifs dans la zone des lacs et enfin l'établissement d'un modèle hydrodispersif, car la faisabilité d'un tel projet passe par la sauvegarde de la qualité, jugée excellente des eaux souterraines. Les résultats du modèle montrent que l'évolution de la concentration des eaux de réalimentation s'est progressivement atténuée par rapport à la distance aux zones de recharge sans pour autant atteindre les forages les plus près des deux lacs.

REFERENCES

[1] Bize J., Bourguet L. & Lemoine J., 1972. L'alimentation artificielle des nappes souterraines (Artificial groundwater recharge of aquifers). Ed. Masson, France, 199p.

[2] Fildier F., 1983. Amélioration de la ressource en eau : la réalimentation des nappes, Etude technique de synthèse, Association Française pour l'Etude des Eaux, Centre National de Documentation et d'Information sur l'eau, 171p.

pollution et l'épuisement. Thèse de doctorat d'état. Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie. 144p.

[17] Visual MODFLOW copyright 1995 - 2003. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Version 3.1.0.86.

[18] McDonald M.G. & Harbaugh A.W. 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow

[3] Asano T., (ed.), 1985. Artificial recharge of groundwater, section III, Groundwater recharge operations. Ed. Butterworth, Boston, USA, 357-576p.

[4] Bouwer H., 2002. Artificial recharge of groundwater, Hydrogeology Journal, Vol. 10, 121-142.

[5] Sanford W., 2002. Recharge and groundwater models: an overview, Hydrogeology Journal, Vol.10, 110-120.

[6] Dillon P., 2005. Future management of aquifer recharge, Hydrogeology Journal, Vol. 13 (1), 313-316.

[7] Stefanescu C. & Dassargues A., 1996. Simulation of pumping and artificial recharge in a phreatic aquifer near Bucharest, Romania, Hydrogeology Journal, Vol. 4 (3), 72-83.

[8] Vandenbohede A., Van Houtte E. & Lebbe L., 2008. Groundwater flow in the vicinity of two artificial recharge ponds in the Belgian coastal dunes, Hydrogeology Journal, Vol. 16, 1669-1681

[9] Pliakas F., Petalas C., Diamantis I. & Kallioras A., 2005. Modeling of Groundwater Artificial Recharge by Reactivating an Old Stream Bed, Water Resources Management, Vol. 19, 279-294.

[10] Vila J.M., 1978. Carte structurale au 1/500000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiers. (Structural map of the Alpine range of eastern Algeria and the Algerian-Tunisian borders).

[11] Toubal A.C., 1983. Etude hydrogéologique du massif dunaire de Bouteldja. Thèse de 3^{ème} cycle. Université Houari Boumediene Bab Ezzouar, Algérie. 500p.

[12] Khérici N., 1985. Aquifère sableux de bord de mer, hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (N-E Algérie). Thèse de 3^{ème} cycle. U.S.T.L, Montpellier, France. 202p.

[13] Hani A., 2003. Analyse méthodologique de la structure des ressources et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de doctorat d'état. Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie. 213p.

[14] Chestakov V.M., 1975. Hydrodynamique souterraine en pratique (en Russe). Ed. Nedra, 179p.

[15] Chaab S., Rousset C. & Saaidia B., 2004. Hydrogéologie et simulation numérique de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (N-E de l'Algérie), Vecteur Environnement, Vol. 37 (3), 38-42.

[16] Saaidia B., 2006. Etude des possibilités de réalimentation artificielle des nappes d'Annaba et de Bouteldja comme moyen de lutte contre la

Model. U.S. Geological Survey. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586p.

[19] Négrel P., Guerrot C. & Millot R., 2007. Chemical and Strontium isotope characterization of rainwater in France: influence of sources and hydrogeochemical implications, Isotopes in Environmental and Health Studies, Vol. 43 (3), 179-196.

NOMENCLATURE

- \bar{C} : concentration relative sans dimension.
 C : concentration au temps $t > 0$ en g/l.
 C^0 : concentration initiale d'injection $t = 0$ en g/l.
 C_0 : concentration de l'échantillon sans le traceur en g/l.
 Erf : fonction erreur de Gauss.
 ζ : paramètre adimensionnel regroupant les éléments de l'équation approchée de l'équation différentielle de la dispersivité.
 n_e : porosité effective en %.
 l : la longueur du cylindre en m.
 v : vitesse effective de Darcy en m/s.
 t : temps en s.
 D : paramètre de la dispersion en m^2/s .
 V_e : volume recueilli en m^3 .
 d : diamètre du cylindre en m.
 Δt : pas de temps en s.
 ζ : paramètre adimensionnel définissant la fonction du temps.
 α_l : dispersivité longitudinale en m.