

## **LES MODELES NUMERIQUES : OUTILS D'EVALUATION ET DE GESTION PREVISIONNELLE DE RESSOURCES EN EAU S/T ET D'AIDE A LA PRISE DE DECISION : CAS DE LA NAPPE DUNAIRE COTIERE DE BOUTELDJA , EXTREME NORD EST ALGERIEN**

Nafaa Kablouti

Département de géologie –Faculté des sciences de la terre .université BADJI  
Mokhtar –Annaba –Algérie. k\_nafaa @yahoo.fr

### **RESUME**

La nappe aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja appartient à l'hydro système de la Mafragh. Son mode de gisement, ses conditions aux limites pose une problématique de gestion de cette nappe particulièrement en période de sécheresse. La modélisation numérique par une application du logiciel MODFLOW -Waterloo –Canada a permis, après simulation des scénarios de recharge naturelle de la nappe en années moyenne et sèches de retour 5, 10 et 20ans, d'établir les bilans hydriques respectifs de 21, 16 et 8 hm<sup>3</sup>. Ces valeurs indiquent les niveaux d'exploitation de la nappe qu'il faudra impérativement respecter pour le maintien de l'équilibre hydrodynamique et des éco systèmes des zones humides de Numidie orientale associés à cette nappe.

**Mots clés :** Hydro système ; nappe aquifère ; ressources en eau ; sécheresse ; modélisation, simulation, bilan.

### **INTRODUCTION :**

Dans cet article, est abordée l'étude de la problématique d'évaluation et de gestion de ressources en eau souterraine de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja. Ce réservoir présente une complexité liée à son mode de gisement dans des formations sableuses bordées au nord par la Méditerranée et au sud par le système fluvio - palustre de l'Oued Kébir Est. Cette situation confère à la nappe aquifère des limites hydrodynamiques à potentiel imposé au Nord et au Sud Est (Dérichlet) au Nord Est c'est une limite à flux (Neumann). Cet hydro système constitue la spécificité d'appartenir au domaine des zones humides de la Numidie orientale.

Pour une meilleure connaissance, particulièrement dans un cycle de sécheresse aigue, des potentialités de ce réservoir d'eau souterraine et la planification de sa gestion prévisionnelle, notre contribution est basée sur la mise en œuvre d'une application du logiciel Visuel MODFLOW v.2.11. Ce dernier est mis au point et développé par Waterloo hydrogéologique (1996). Il est conçu comme un Outil de simulation de scénarios après construction et calage du modèle numérique en régime permanent et transitoire du système aquifère, de la recharge naturelle de la nappe due à l'infiltration des pluies efficaces en période de sécheresse.

### **SYNTHESE MONOGRAPHIQUE**

L'aire d'étude se situe à l'extrême Nord- Est de l'Algérie (Fig.1). Elle couvre une superficie de 150km<sup>2</sup> et s'étend sur l'ensemble des formations dunaires de Bouteldja. Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, au sud –Sud-ouest par l'ensemble fluvio - palustre de la plaine alluviale de la Mafragh et les marais de marécages de Bini Urgines et à l'Est par les formations argilo gréseuses des djebels « karoussaa et El kourssi ». Ces limites définissent les frontières hydrodynamiques de la nappe aquifère.

Le réseau hydrographique de cette zone appartient à l'hydro système de la Mafragh auquel est rattaché l'Oued Kébir Est. Les affluents de la rive droite de ce dernier (Oued Bourdime et El Bahim) prennent naissance dans le massif dunaire qu'ils drainent alors en hautes eaux pour entretenir la zone exutoire de l'aire lacustre et palustre formée de garat et de marécage s'étendant de Righia au lac noir : véritable complexe de l'écosystème de cette partie des zones humides de la Numidie orientale au fonctionnement quasi dépendant de l'hydro système alluvio - dunaire de Boutedja (KHIRICI , 1985) et (ZALANI et al, 2002).

La zone d'étude est caractérisée par un climat de type méditerranéen. Les moyennes annuelles de précipitations, de températures et d'humidité relative de l'air, sont respectivement estimées à 691.68 mm, 17.5.°c et 70 %. L'évapotranspiration réelle est estimée à 430mm, l'infiltration nette serait comprise entre 15 à 25% (MATMATI et al, 2003) et (NAFA et als, 2003) de la lame d'eau des pluies tombées.

La zone d'étude est caractérisée par un climat de type méditerranéen. Les moyennes annuelles de précipitations, températures et humidité relative de l'air, sont respectivement de 692 mm, 17.5°c et 70 % .L'évapotranspiration réelle est estimée à 430mm, l'infiltration nette serait comprise entre 15 à 25% de la lame d'eau des pluies tombées.

**ETUDE FREQUENTIELLE DES BILANS HYDRIQUES ET ESTIMATION DE LA RESERVE REGULARISABLE EN PERIODE DE SECHERESSE**

En application du modèle de Thorantwait. (MATMATI et al, 2003) aux données relatives à la station de Bouteldja.

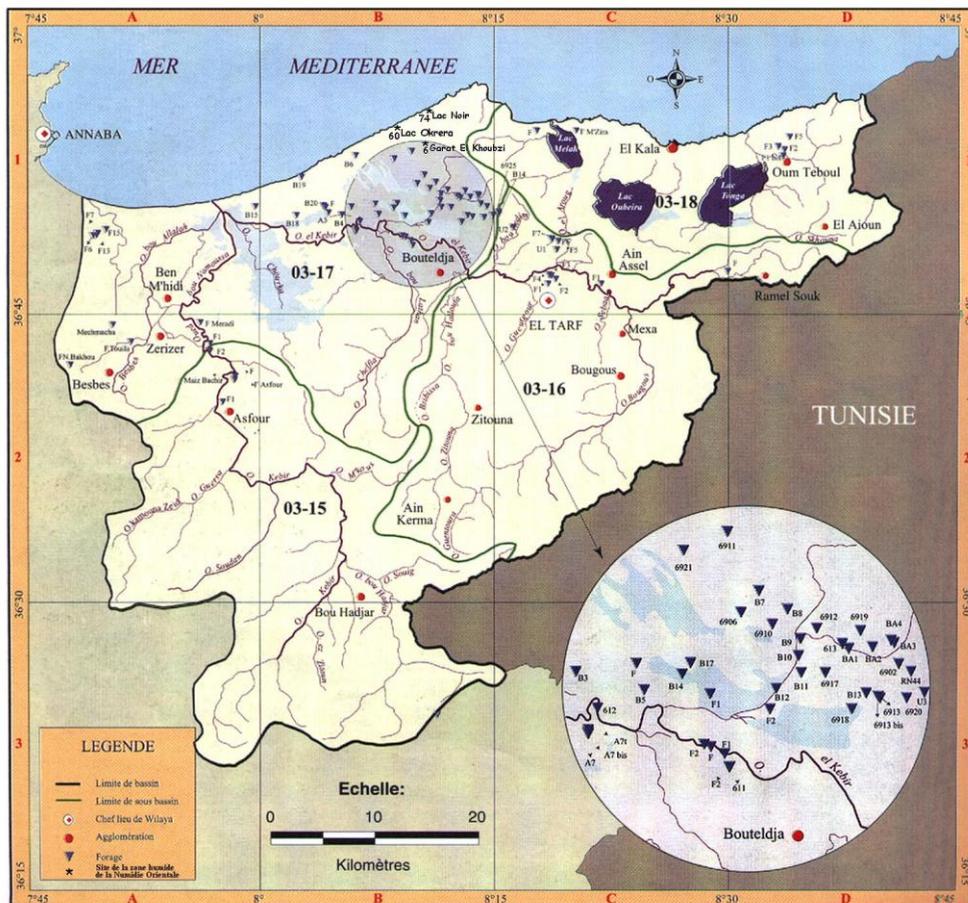
Les résultats du bilan annuel révèlent une ETP très forte avec une moyenne de 872 mm et une ETR moyenne de 423 mm représentant environ de 63 % des pluies. En moyenne l'excédent brut est de 255 mm soit 37% avec un minimum et maximum respectivement de 57mm (1996) et 640 mm (1990) (NAFA et als, 2003).

La série des excédents nets annuels (ruissellement déduit) a été ajustée à la loi Gamma, l'on a ainsi estimé les pluies efficaces relatives aux périodes de retour d'années sèches et leur corollaire la réserve exploitable (Tab.1).

**Tableau 1:** Recharges relatives aux périodes de retours d'années sèches

Période de retour (années sèches)	Années correspondantes	Infiltration efficace (mm)
5	69-79-80-87-89-2002	140.
10	1968	106.5
20	1996	59.4

Au vu du tableau 1, la recharge due aux pluies efficaces est estimés à 140, 106.5 et 59.4mm respectivement pour les années sèches de récurrence 5, 10 et 20 ans . Ces dernières sont caractéristiques des déficits hydriques critiques notamment l'année 1996, année dont on tiendra compte dans le modèle mathématique développé dans ce travail.



**Figure 1 :** Carte de situation de l'hydro système de la Mafragh et localisation de la nappe aquifère de la nappe du massif dunaire de Bouteldja

**EVALUATION ET GESTION DES RESSOURCES EXPLOITABLES : DEFINITION ET SIMULATION DE SCENARIO DANS L'HYPOTHESE PESSIMISTE (PERIODE DE SECHERESSE)**

**Présentation**

Compte tenu de son mode de gisement et des conditions aux limites, la nappe aquifère reste très vulnérable à l'invasion d'eau marine et/ou saumâtre d'où risques de dégradation. Afin de juguler toute pollution engendrée par ces phénomènes, il est donc apparu impératif d'analyser en vue d'évaluer la ressource exploitable en période de sécheresse et de proposer une solution pour sa gestion .Cette approche est construite sur la

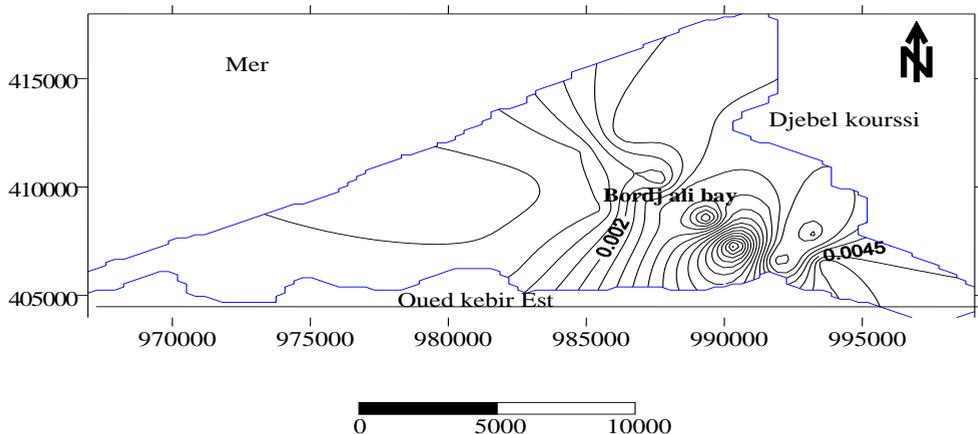
base de scénarios d'hypothèse pessimiste car la vulnérabilité de ce réservoir présente une problématique éco-environnementale importante d'une part pour la qualité des eaux et d'autre part pour les zones humides, dont le fonctionnement reste tributaire des niveaux piézométriques qu'il faudra maintenir à des côtes optimales. Après caractérisation et calage du modèle mathématique en régime permanent et transitoire de la nappe dunaire, l'on procèdera à l'estimation par la simulation numérique, de la ressource exploitable pendant la période sèche de référence.

**Rappels des caractéristiques de la nappe du massif dunaire**

Les différentes études réalisées dans la région ont montré :

- L'existence d'une importante nappe constituée dans les sables éoliens reposant d'une part sur le substratum numidien au Nord Est de Bouglès et d'autre part sur le remplissage Mio- Pliocène de la fosse de Ben M'Hidi à l'Ouest ;
- Que les sables aquifères passent latéralement aux graviers de la nappe profonde des graviers au sud. L'épaisseur de cette nappe aquifère varie entre 40 et 140m (GAUD, 1976) ; (MATMATI et al, 2003) ;(ZALANI et al, 2002).

Les caractéristiques hydrodynamiques (Fig 2) telles la transmissivité (ou perméabilité) et la porosité efficace sont tirées des études antérieures (GAUD, 1976) ; (KHIRICI, 1985) et (PETIT, 1987) Les valeurs des transmissivités sont comprises entre  $10^{-4}$  et  $1.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et le coefficient d'emmagasinement est en moyenne de 4 -5 % caractérisant une nappe libre.

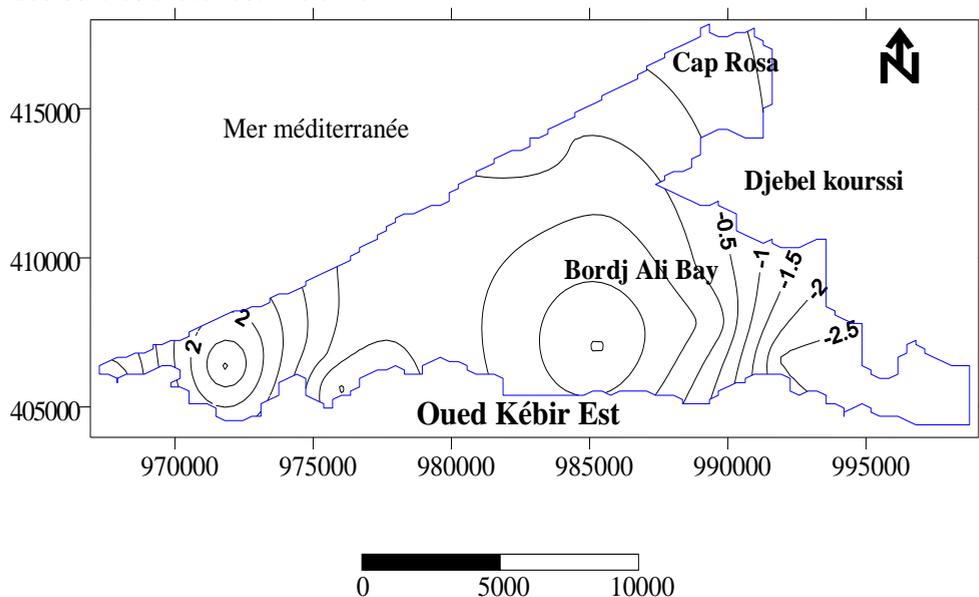


**Figure 2 :** Carte des transmissivités ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) de la nappe aquifère de Boutedja.

Les conditions aux limites (Fig 3) de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja ont été définies par plusieurs auteurs (Gaud, 1976) ; (Matmati et al, 2003) ; (Zalani et al, 2002). Elles sont identifiées et définies comme suit :

- Le long du littoral, la méditerranée draine la partie nord des eaux souterraines ;
- A l'est le massif dunaire reçoit les eaux de ruissellement des massifs numidiens ;
- Au sud la nappe dunaire alimente la nappe des graviers ;
- Des affleurements de nappe sous forme de marécages existent en différents points du massif dunaire.

Les battements de la nappe (Fig 4) entre les hautes et basses eaux de l'année 1982 (Kherici, 1985) ; (Matamati et al, 2003), indiquent une dégradation de la nappe dans la partie sud-est, dégradation induite par une surexploitation bien localisée. Pour la même période de mesures, le volume des sorties a été estimé à 25 hm<sup>3</sup>.



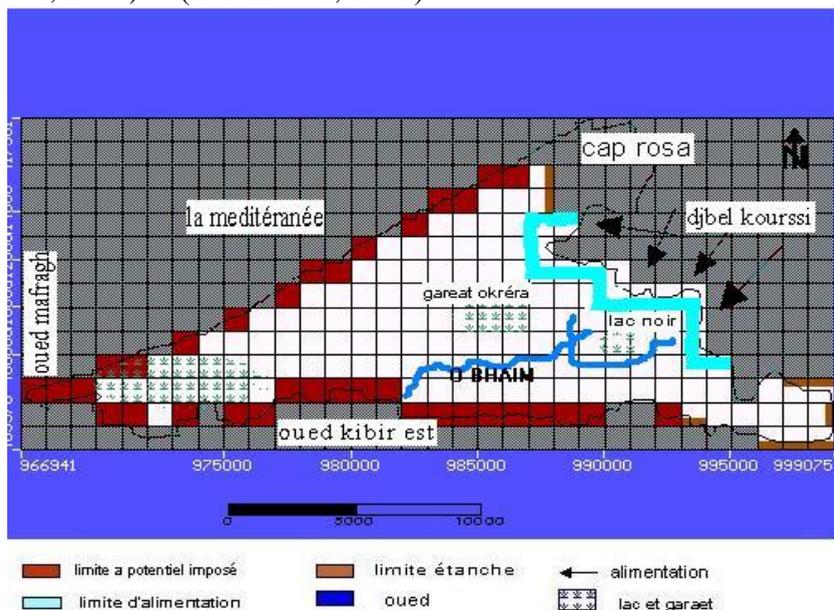
**Figure 3 :** Carte des battements piézométriques : hautes et basses eaux de la nappe dunaire de Bouteldja 1982.

## CONSTRUCTION ET ELABORATION DU MODELE NUMERIQUE DE LA NAPPE : APPLICATION DU LOGICIEL VISUAL MODFLOW

La géométrie de l'aquifère et les données disponibles ont permis d'exploiter le programme de simulation Visual Modflow v 2.11

### Discretisation de l'espace aquifère :

Sur l'extension du milieu aquifère, le maillage du modèle est défini dans chacune des mailles carrées juxtaposées en admettant que les caractéristiques géométriques de l'aquifère et les paramètres hydrodynamiques (perméabilité\coefficient d'emmagasinement) sont uniformes. L'aquifère a été discrétisé en 32 x14 mailles carrées de 1Km de côté. Le modèle est constitué de 448 mailles, dont 173 mailles actives représentant la zone modélisée et 275 mailles passives (Fig. 3). Les limites de l'aquifère ont été décrites pour définir les conditions du modèle. Ainsi, les bordures de l'aquifère sont les limites à flux latéral nul, les limites à flux latéral imposé et les limites à potentiel hydraulique constant (Matamati et al, 2003) et (Zalani et al, 2002).



**Figure 4.** Carte des conditions aux limites et de discrétisation du domaine de la nappe

**Principe du calage :**

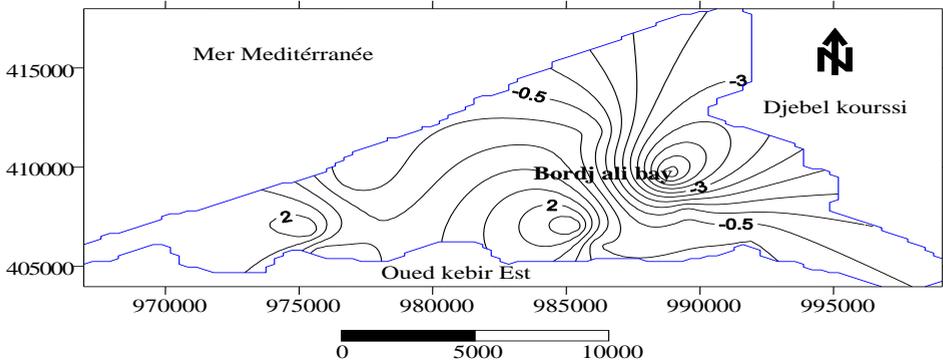
Au cours des phases de calage les objectifs recherchés sont la reproduction d'un état stable de la piézométrie en régime permanent et transitoire. Le premier objectif correspond au calage du modèle en régime permanent pour les valeurs locales de perméabilité des formations aquifères et des perméabilités verticales des épontes. Au cours du calage en régime transitoire, la reproduction de la fluctuation piézoélectrique permet d'ajuster la porosité efficace.

**Calage du modèle :**

Afin de pouvoir apprécier la qualité du calage, l'on a procédé à la construction des cartes des écarts entre piézométrie mesurée (1982) et calculée par le modèle.

**Simulation en régime permanent**

L'écart entre les valeurs observées et calculées de la piézométrie est grand avec une erreur moyenne de l'ordre de 7,44 m. En modifiant les valeurs zonales des perméabilités après plusieurs essais/erreurs, cet écart a été minimisé pour atteindre une relative vraisemblance de la distribution spatiale (associée aux conditions aux limites) du paramètre hydrodynamique : qu'est la perméabilité horizontale (Matamati et al, 2003). Ces écarts restent supérieurs à 3 m (valeurs absolues) en certaines mailles localisées dans les zones Nord (Fig. 5). Le calage est par conséquent considéré passablement acceptable et sera amélioré dans l'étape du régime transitoire.



**Figure 5.** Carte des écarts entre la piézométrie simulée et observée en régime permanent

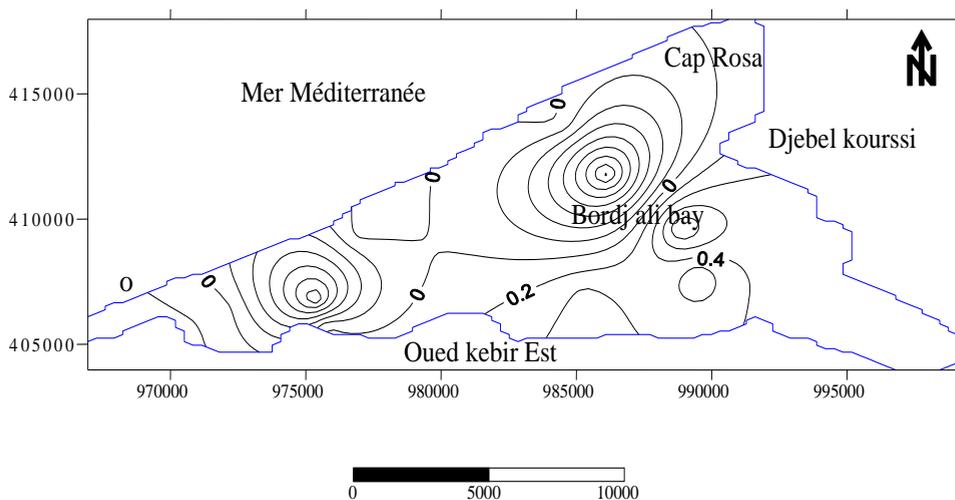
### *Simulation en régime transitoire*

En régime transitoire le coefficient d'emménagement est estimé à 4.5% (Nouacer, 1993). Le calage s'est effectué sur la base de la piézométrie mensuelle de l'année 1982 /83 et de la recharge moyenne y afférente (pluie efficace estimée à la station de Bouteldja).

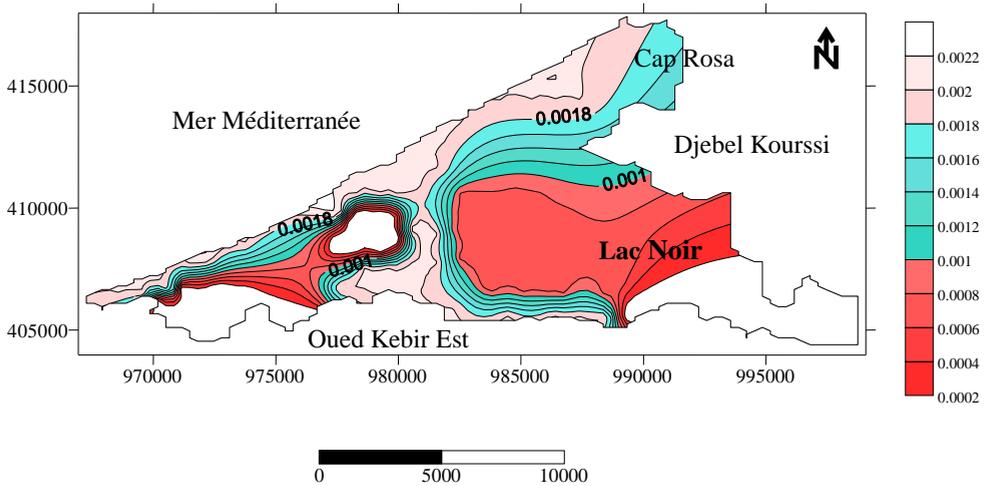
Les conditions aux limites sont celles définies plus haut. Au stade final du calage, les écarts entre piézométrie calculée et mesurée (piézométrie 1982) sont reportés en figure 6 et révèlent un bon calage du modèle.

La répartition des perméabilités issue du calage final en régime transitoire peut alors être considérée comme représentative de la nappe aquifère. La figure 7 montre la carte de la distribution spatiale des perméabilités.

L'on considère que le modèle numérique de la nappe de Bouteldja est suffisamment représentatif du système aquifère ; il peut permettre de faire les simulations de la recharge par les pluies efficaces des années de sécheresse afin d'évaluer les bilans hydriques des entrées /sorties.



**Figure 6 :** Carte des écarts entre la piézométrie simulée et observée en régime transitoire



**Figure 7.** Carte de la distribution spatiale des perméabilités après calage en régime transitoire

## **SIMULATION ET ANALYSE DES BILANS SIMULES DES ANNEES 1968, 1996, 2002 ET ANNEE MOYENNE**

### **Présentation des résultats de simulation**

Le tableau 2 présente les résultats essentiels des simulations des bilans hydriques relatifs aux différentes années de sécheresse.

**Tableau 2.** Bilans simulés des années sèches et moyennes (Nafaa et als, 2003)

Années	ENTREES hm <sup>3</sup>				SORTIES hm <sup>3</sup>			Différence Entrées/Sorties hm <sup>3</sup>
	Bilan hm <sup>3</sup>	Potentiel Imposé hm <sup>3</sup>	Recharge par les Pluie efficace hm <sup>3</sup>	Flux imposé hm <sup>3</sup>	Bilan hm <sup>3</sup>	Potentiel Imposé hm <sup>3</sup>	Pompage hm <sup>3</sup>	
1996 Année sèche 20ans	8.91	0	7.21	1.70	24.35	5.62	18.73	-17.14
	100%	0	72%	28%	100%	23%	77%	237.7%
1968 Année sèche 10 ans	16.6	0	15.2	1.0	16.6	2.60	18.73	-4.3
	100%	0	91.5 %	6.5%	100%	15.78%	112.8%	28.5%
2002 Année sèche 5 ans	21.1	0	19.37	1.73	21.1	2.37	18.73	-1.73
	100 %	0	91%	9%	100%	11%	89%	8.9%
Année moyenne	34.46	0	32.74	1.62	34.46	15.73	18.73	0.0
	100%	0	93.5%	6.5%	100	45.64	54.36	0.0

## CONCLUSION

D'après le tableau 2, les réserves exploitables dans la nappe dunaire sont variables d'une année à l'autre ; l'année 1996 reste plus sèche et correspondrait à une récurrence de sécheresse bi décennale. Le déficit est très important ; il atteint pour l'année de sécheresse extrême les 238% de la réserve régularisable .Pour l'année moyenne et dans les conditions actuelles d'exploitation de la nappe, le bilan est relativement équilibré , par contre il est sensiblement négatifs pour les autres récurrences sèches .Ces résultats sont à considérer dans la politique du maintien des équilibre hydrodynamique de la nappe dont dépend totalement le fonctionnement des écosystème des biodiversités de ces zones humides. Le développement durable dans telle complexité d'un milieu connexe, requière des actions de

planification de l'aménagement des ces ressources en eau devant tenir compte des diverses contraintes liées tant à l'hydro système qu'à l'écosystème qui lui sont intégralement associé. En conclusion, il est fortement recommandé de n'exploiter uniquement que les eaux dues à la recharge naturelle ; le recours à l'alternance ( Sahuquillo, 1989).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bouteldja., 2002 Mémoire d'ingénieur géologue. Université BADJI Mokhtar. Annaba
- Gaud B., 1976 : Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba – Bouteldja, système de reconnaissance et recherche des condition de modélisation (Rapport d'étude A..R.H d'Annaba.
- Khirici N., 1985 : Aquifère sableux de bords de mer, hydrodynamique et hydrochimie, exemple de la nappe dunaire de Bouteldja. Thèse de docteur 3<sup>ème</sup> cycle. USTL-Montpellier-1985.
- Matmati B., Hawasli F., 2003 : Approche méthodologique de l'évaluation de la ressource en eau et de l'optimisation énergétique de son exploitation en période de sécheresse : cas de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja extrême Nord Est algérien.
- Nafaa K., 1985 : Nappes superposées en région côtière, hydrodynamique et hydrochimie (aquifère de Annaba) Nord Est algérien. Thèse docteur ingénieur.USTL-Montpellier
- Nafaa K, Hammar Y., Nafaa A.D., 2003 Sécheresse, impact et coût environnemental : Cas de la nappe aquifère du front côtier du massif dunaire de Bouteldja zones humide de l'extrême nord-est Algérien Hydro Top (22/24 octobre 2003 a Marseille).
- Nouacer R., 1993 : Essai de synthèse des caractéristiques hydrogéologiques et hydro chimique de la nappe de bouteldja .Thèse magister. Université BADJI Mokhtar
- Petit V., 1987 : Etude par modèle mathématique de la nappe d'Annaba – Bouteldja. Bureau de recherche géologique et minière (B.R.G.M). Service géologique national ; département eau.
- Sahuquillo A., 1989 L'usage conjoint des eaux de surface et des eaux souterraines dans la gestion des ressources hydrauliques. Revue hydrogéologie n°2 pp.101-110.
- Samraoui B., Deblair G., 1998 : Les zones humides de la Numidie orientale Bilan de connaissance et perspective de gestion Revue synthèse N° 4(12-1998) Université BADJI Mokhtar. Annaba
- L'usage conjoint des eaux de surfaces et des eaux souterraines dans la gestion des ressources hydrauliques. Revue hydrogéologie n° 1989 pp.101-110, 6 figures
- Zalani M., Drissi F., 2002 Etude par modèle mathématique de la nappe d'Annaba.