



**MODELISATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS EN
MILIEU POREUX NON SATURE : APPLICATION A LA
RECHARGE ARTIFICIELLE PAR LES EAUX USEES
TRAITEES NAPPE COTIERE KORBA (CAP-BON TUNISIE)**

GAALOUL N.

Université de Carthage-INRGREF- Tunisie

gaaloul.noureddine@iresa.agrinet.tn

RESUME

L'objectif du présent travail de recherche est la prévision de l'impact de la recharge artificielle de la nappe phréatique côtière du Cap Bon par les eaux usées traitées au niveau du site de recharge (4 ha) de Korba El Mida. Cette nappe côtière subit une surexploitation illustrée par l'accroissement du nombre de puits de 270 puits en 1962 à 9500 puits en 2012. La qualité des eaux de nappe est alors fréquemment dégradée par l'intrusion marine, l'infiltration des eaux d'irrigation ou les pollutions diffuses. Depuis les années 60, un suivi spatio-temporel qualitatif et un modèle de fonctionnement hydrogéologique des eaux souterraines ont mis en évidence que les prélèvements importants avaient généré une inversion du gradient hydraulique causant une intrusion saline. Cruciale pour l'agriculture locale, la nécessité d'améliorer quantitativement et qualitativement les eaux de nappe a conduit à la mise en place d'une recharge artificielle d'eaux usées traitées afin de créer une barrière hydraulique consistant en 3 bassins d'injection pour empêcher, en zones côtières, l'intrusion d'eau de mer dans des aquifères surexploités. Les eaux usées proviennent de la station d'épuration de Korba et leur traitement final se fait par infiltration dans la zone non saturée du sol (SAT, Soil Aquifer Treatment) depuis décembre 2008. La construction de barrières hydrauliques souterraines. Avant la recharge, la salinité varie entre 1 à 12 g/l et les niveaux piézométrique sont tous inférieurs à celui de la mer sur toute la zone d'étude et varient entre zéro au niveau de la STEP de Korba et -7m au niveau de la rive gauche de l'Oued Ennajar. Après 5 ans de la recharge artificielle (1,5 Million m³) par les eaux usées traitées, une diminution de la salinité de 1 g/l a été enregistrée. Une remontée de niveau de la nappe justifié par l'apparition des niveaux piézométriques qui varient entre 1 à 5

m au niveau du site de recharge. Une modélisation d'écoulement au niveau du site de recharge artificielle Korba-Mida a été réalisée afin d'étudier et de prévoir l'impact de l'alimentation par les eaux usées traitées issues de la station de Korba. Le calage du modèle est effectué en régime permanent (2008) avant recharge puis en régime transitoire (2008-2013).

Mots Clés: Eau souterraine, Recharge, Eaux usées traitée, Modélisation, Modèle à Réservoir, Korba- Mida, Tunisie

INTRODUCTION

La Tunisie est caractérisée par un climat aride à semi-aride, dont les ressources en eau sont limitées et les besoins sont en augmentation. La mobilisation des ressources en eaux figure parmi les objectifs principaux du pays pour lutter contre la sécheresse et pour répondre aux besoins en eau de tous les secteurs de la société. Par conséquent une stratégie nationale d'économie d'eau a été mise en place qui consiste à la réalisation des ouvrages hydrauliques. La réalisation des ouvrages hydraulique nécessite une bonne connaissance des apports liquides au niveau des bassins considérés pour cela on a recours à la modélisation hydrologique (Gaaloul, 2011).

L'un des plus grands problèmes dans de nombreuses applications hydrologiques est la détermination de l'écoulement d'un cours d'eau à partir de données physiques (comme la pluie, la température, le vent) et des caractéristiques du bassin. Cet écoulement est non seulement requis pour la prévision des crues, mais aussi pour la prédiction de l'effet d'un changement de bassin et, en général, pour l'aménagement des ressources en eau. Une maîtrise de ces problèmes passe par une modélisation quantitative et qualitative tout en disposant d'une bonne information permettant une représentation acceptable du milieu physique réel (Gaaloul, 1992).

La modélisation hydrologique peut contribuer à l'étude des bilans hydriques dans les régions semi – arides, puisqu'elle montre tout l'intérêt que revêt l'évaluation de chacun des termes de ces bilans hydriques (Gaaloul, 2008a), ceux-ci étant très variables dans l'espace à l'eau dans le sol ou en surface induits par l'action de l'homme. En effet, de part son appartenance à la zone semi aride la Tunisie connaît un régime pluvial défavorable caractérisé par des précipitations de moyenne à faible et surtout irrégulière et mal répartie. Face à ce problème la Tunisie a adopté depuis des années une stratégie de mobilisation des eaux souterraines pour faire face au déficit hydrique.

CADRE GENERAL

La région de Korba est située au Nord-est de la Tunisie. Elle est limitée à l'Ouest par la chaîne montagneuse de Djebel Sidi Abd Errahmane, à l'Est par la mer Méditerranéenne, au Nord par l'oued Lebna, et au Sud par l'oued Sidi Othmane (Figure 1). La région de Korba se classe dans l'étage bioclimatique méditerranéen semi- aride supérieur à hiver doux. Elle se situe entre les isohyètes 400 et 500 mm par an. Les mois de Juillet et Août sont les plus chauds avec une moyenne de l'ordre de 26 °C. Les mois de Janvier et février sont les plus froids avec une moyenne de 9°C. L'évaporation à partir d'un plan d'eau est favorisée par l'insolation, la chaleur et les vents mais contrariée par l'humidité relative. Le maximum d'évaporation est enregistré au mois d'août alors que le minimum est observé au mois de janvier. Le secteur d'étude est constitué par des terrains Mio-Plio-Quaternaires. Le Miocène moyen correspond dans sa partie inférieure à une série détritique dite formation Béglia. Sa partie supérieure est formée par des grès lenticulaires et des marnes à niveaux de lignite appelés formation Saouaf. Le Pliocène affleure largement entre l'oued El Hajar au nord et l'oued Chiba au sud. Il est complètement masqué par les dépôts quaternaires dans les régions de Tafelloune et Diar el Hajje (Gaaloul, 2012).

La recharge représenterait moins de 10% des précipitations annuelles moyennes (Ennabli, 1980) ou 30,4 Mm³ en 2008 (Gaaloul, 2008b). Les récents modèles hydrogéologiques ont montré que la situation piézométrique dans la partie centrale de l'aquifère était encore critique en 2004 en raison d'une exploitation de 135% de l'aquifère (Paniconi, 2001; Gaaloul, 2008b). L'invasion de l'eau de mer dans les terres atteint 1,5 km au sud de l'oued Chiba et 5 km au sud d'El Diar Hajje. Des approches multidisciplinaires ont été utilisées pour étudier les conséquences de l'intrusion marine, combinant géophysique et hydrochimie (Kouzana, 2009; Gaaloul, 2012). Selon les cartes de salinité, cinq zones ont été identifiées, la moins concentrée (2 à 4 g/L) se trouvait dans la partie amont et la plus concentrée (22 g/L) était sur notre site d'étude. La salinité étant plus prononcée le long de la côte, de nombreux puits peu profonds ont été abandonnés (Gaaloul, 2008c).

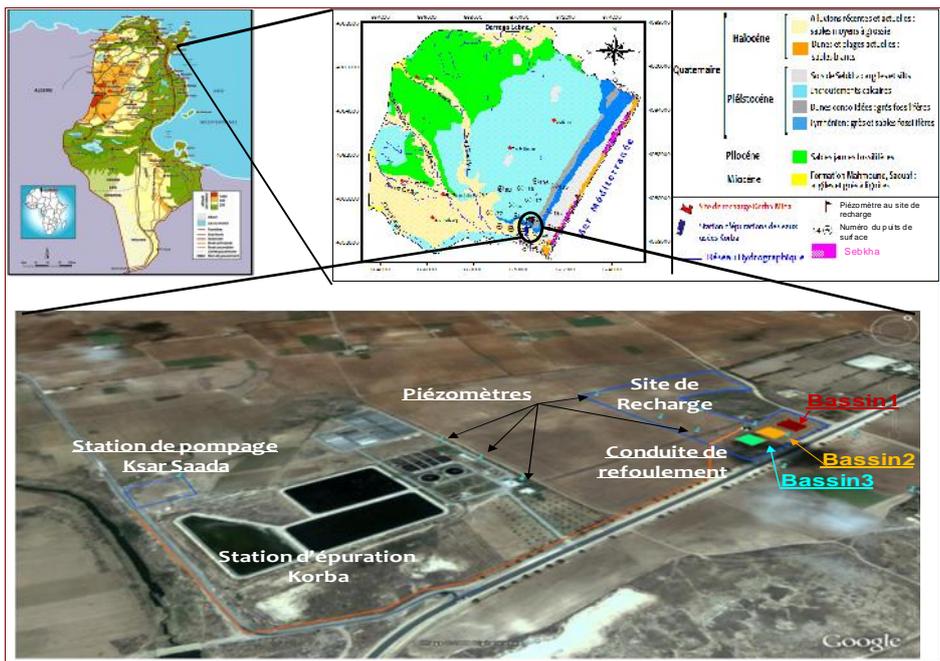


Figure 1 : Localisation du bassin versant, géologie et le site de recharge de Korba

MATERIELS ET METHODES

Le modèle hydrologique à réservoirs (Gaaloul, 1992; 2008a) schématise le bassin par 3 réservoirs, permettant d'identifier une fonction de production réalisée par le réservoir superficiel et une fonction de transfert par les 2 réservoirs inférieurs du modèle (Figure 2) :

Le premier réservoir (réservoir U) représente l'effet de rétention de l'eau et de la reprise par l'évapotranspiration. Les apports au réservoir superficiel sont constitués par la pluie (et la fonte de la neige, si elle existe, au contact du sol). La vidange du réservoir superficiel peut être réalisée par : EvapoTranspiration Réelle (ETR), et vidange de l'excédent.

Le deuxième réservoir (réservoir intermédiaire H) représente la zone non saturée. Il est alimenté en eau par le réservoir superficiel et vidangé par deux exutoires :

- Percolation dans le réservoir souterrain G suivant une loi linéaire (vidange exponentielle)
- Ecoulement à l'extérieur sous forme de ruissellement suivant une loi non linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER qui est en fait la hauteur H pour laquelle la percolation et l'écoulement sont égaux. Cet écoulement non linéaire est prépondérant quand l'état de remplissage H est élevé ; la percolation prévaut

quand l'état de remplissage H est plus bas.

Le troisième réservoir (réservoir souterrain G) représente l'aquifère. Il est alimenté en eau par le réservoir intermédiaire H. Il est vidangé par deux exutoires :

- Par écoulement vers l'extérieur sous forme de débit souterrain, suivant une loi de vidange exponentielle
- Par drainance dans le réservoir souterrain lent suivant une vidange exponentielle.

Le modèle Hydrologique à réservoirs (Gaaloul, 1992; 2008a) fait intervenir un nombre maximal de huit paramètres hydrologiques (capacité de la réserve superficielle, hauteur ruissellement-percolation, débit rapide QRAP, débit souterrain lent QSO, écoulement superficielle, écoulement souterrain rapide, temps de tarissement et stockage en eau). Le modèle caractérisé par un certain nombre de paramètres globaux qui ne peuvent pas être mesurés sur le bassin. Les valeurs optimales de ces paramètres sont alors déterminées par un processus itératif à partir de valeurs initiales par recherche du meilleur ajustement entre observations et valeurs de sortie calculées par le modèle.

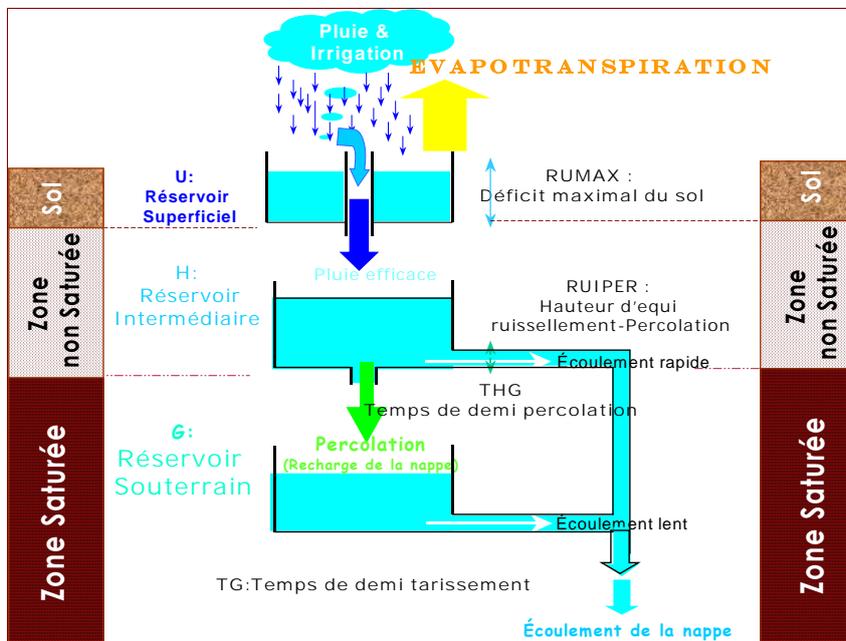


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs

La méthode d'optimisation est fondée sur une adaptation de l'algorithme non linéaire de ROSEMBORCK. Le but de la méthode est de minimiser une fonction critère F, en faisant varier successivement P paramètres. La fonction critère retenue est une caractéristique de l'écart entre les débits (ou les charges) calculés et observés, liés par la relation :

$$Y = AX + B + \varepsilon \quad (1)$$

Avec :

ε : Écart de simulation

X : Somme des vidanges des réservoirs du modèle en mm/pas de temps

Y : Débit mesuré à l'exutoire en m³/s ou le niveau piézométrique en (m)

A : surface du bassin versant en mètres carré

B : Débit extérieur constant (généralement 0) en m³/s

A et B peuvent être imposés ou calculés par le modèle.

La méthode d'optimisation est itérative. La solution optimale est atteinte lorsque chaque paramètre a atteint une valeur stable. La convergence est d'autant plus lente, qu'il y a plus de paramètres à optimiser, ce qui conduit à des temps de calcul très longs. Le calage se déroule donc naturellement en plusieurs étapes : on doit fournir un jeu de paramètres réaliste et décider quels paramètres à faire varier et quelles sont les limites pour améliorer le critère d'ajustement choisi. Après un certain nombre d'essais, le modèle fournit une simulation et un jeu de paramètres qui donnent une meilleure valeur de critère d'ajustement choisi.

Un modèle peut être défini comme étant un outil physique ou mathématique conçu pour l'homme afin de respecter le comportement d'un phénomène physique (Gaaloul, 1992).

L'équation d'écoulement est basée sur la loi de Darcy et le principe de conservation de masse :

$$Q = -K.A.\frac{dh}{dl} \quad (2)$$

Où Q est le débit (m³/s), A est la section (m²), dh est variation de charge hydraulique (m), dl est longueur de l'élément de volume (m) et k conductivité hydraulique où coefficient de perméabilité. L'équation de masse ou équation de continuité s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \dots(\partial n.dx.dy.dz) \quad (3)$$

Où ∂M est la variation de masse (kg), ∂t est la variation de temps (s), ... est la densité du fluide (kg/ m³), ∂n la porosité et $dx.dy.dz$ est le volume élémentaire considéré (m³).

L'équation de la diffusivité qui est la combinaison des deux expressions peut s'écrire dans le cas d'un écoulement tridimensionnel :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_s\frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (4)$$

Les modèles mathématiques d'hydrodynamique consistent à rechercher directement les solutions numériques de l'équation différentielle. L'équation de la diffusivité pour une nappe captive :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right) + W = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

Où : K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les conductivités hydrauliques au long des axes x , y et z .

h est la charge hydraulique, W est le terme source par unité de volume, S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique et t est le temps.

En nappe libre en intégrant cette équation sur la verticale, le coefficient d'emmagasinement S est remplacé par la porosité de drainage W_d (Gaaloul, 2013). La conductivité hydraulique, le coefficient d'emmagasinement spécifique et la porosité de drainage constitue les paramètres de base du modèle, étant les fonctions de l'espace : $S_s=S_s(x,y,z)$, $K_{xx}=K_{xx}(x,y,z)$ etc. Le terme W est en fonction de l'espace et le temps $W=W(x,y,z,t)$.

Pour ajuster le modèle il faut disposer des données de précipitations (continues), d'évapotranspiration potentielle (continue) et de niveaux piézométriques ou des débits à l'exutoire du bassin. Cette simulation consiste, après un calage préalable du modèle à l'aide des données mesurées sur le site expérimental, à calculer la recharge qui parvient effectivement à la nappe et assure son renouvellement et son écoulement.

RESULTATS ET DISCUSSION

De nombreux essais de simulation avec le modèle conceptuel à réservoirs au pas de temps mensuel ont fait apparaître une certaine variabilité des paramètres suivant des contraintes imposées. Ce calage se déroule naturellement en plusieurs étapes : l'utilisateur fournit un jeu de paramètres réalistes et décide quels paramètres il accepte de faire varier et dans quelles limites pour améliorer le critère d'ajustement qu'il a choisi. A l'issue d'un certain nombre d'essais (itérations de la procédure de calage), le modèle fournit une simulation et un jeu de paramètres qui donnent une meilleure valeur du critère d'ajustement choisi. L'analyse de ces résultats comporte différents aspects : l'examen graphique (qualité de reconstitution des différentes composantes de l'écoulement identifiées), l'analyse des bilans année par année, l'examen des paramètres obtenus et de leur vraisemblance, l'analyse des essais successifs par le modèle. Les différents calages montrent que les meilleurs ajustements sont obtenus en imposant certains paramètres (tableau 1).

Tableau 1 : Résultats des paramètres de calage bassin2 du Site de recharge Korba

Paramètres Hydrologiques-Hydrodynamiques	Piézomètre Pz4 Bassin 2 site de recharge
Nombre d'années (période d'études)	Décembre 2008- Mai 2013 (5 ans)
Précipitations (mm)	1834,9
Volume injecté des eaux usées traités Bassin2 (m ³)	469665.3428
Pluie efficace (mm)	50
Coefficient d'emménagement équivalent (m)	0.0012 0.000004
Conductivité Hydraulique (m/s)	0.25
Porosité	1
Temps de ½ montée (temps de 1/2 Percolation) (mois)	0.15 0.15
Temps de ½ tarissement souterrain (mois)	0.50142
Temps de ½ transfert Souterr. 1--> Souterr. 2(mois)	
Retard (propagation) Débits (pas de temps)	

A l'issue de cette phase de calage du modèle, nous pouvons considérer comme établis les résultats obtenus compte tenu de la qualité des ajustements et de la concordance des valeurs de la pluie efficace trouvées en chaque station de mesures (Figure 3).

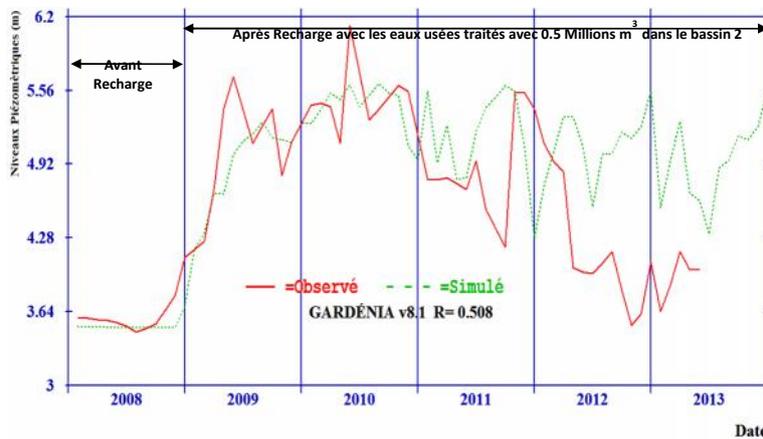


Figure 3 : Simulation des niveaux piézométriques PZ4 bassin d'injection 2 Korba (2008-2013)

Un modèle conceptuel de réservoir basé sur des fonctions de production et de transfert a été employé pour simuler la recharge dans la région de Korba au bassin d'injection 2. Après le calibrage, le modèle a produit des résultats satisfaisants. Bien que la pénurie courante de données empêche sa validation, le modèle constitue un prototype pour l'évaluation de l'efficacité de la recharge artificielle.

Dans cette étude, l'application de la modèle Pluie –Recharge-Niveau au site de recharge Korba est destinée pour l'estimation et à l'évaluation de la recharge parvenue à la nappe durant une période bien déterminée. La modélisation par Pluie-Recharge artificielle-Niveaux piézométrique du bassin 2 du site de recharge sur une période de 5 ans (décembre 2008-Mai 2013), nous a permis de déterminer, la lame d'eau moyenne qui alimente le bassin 2 du site de recharge est de 80150 mm/an (857%), pour une pluviosité de 366 mm/an et un volume d'injection d'eaux usées traitées de 93358mm/an. Plus les précipitations est important à l'échelle régionale, plus que la recharge est importante et inversement.

CONCLUSION

Dans l'aquifère de Korba, la variabilité spatiale des concentrations en éléments souligne la complexité des interactions eau-roche amplifiées par la salinisation issue de l'intrusion marine dans la nappe Plio-Quaternaire. L'écoulement souterrain de la nappe Korba-Mida est unidirectionnel et converge globalement vers la mer Méditerranée. La surexploitation de la nappe a entraîné un rabattement général de son niveau piézométrique lequel a causé une intrusion marine surtout dans les zones de site de recharge. Le problème de l'intrusion marine et de la minéralisation des eaux de la nappe Korba-Mida est de plus en plus accentué.

Lors de l'utilisation d'un modèle mathématique pour simuler le comportement de la nappe Korba sous l'effet de la recharge artificielle par les eaux usées traitées, il est indispensable de tenir compte de façon précise des caractéristiques propres de la nappe : respecter le plus possible, par une approche 3 D, la géométrie de l'aquifère et évaluer les paramètres sur base d'un nombre suffisant d'essais et mesures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ENNABLI M. (1980). Etude hydrogéologique des aquifères Nord Est de la Tunisie par une gestion intégrée des ressources en eau, Thèse de doctorat d'état, Université de Nice, France.
- GAALOUL N. (2013). GIS-Based Numerical Modeling of Aquifer Recharge

- and Salt Water Intrusion in Arid South Eastern Tunisia, *J. Hydrol. Eng.*, (In Press).
- GAALOUL N., CARY L., CASANOVA J., GUERROT C., CHAIEB H. (2012). Impact de la recharge artificielle par des eaux usées traitées sur la qualité et la quantité des eaux souterraine de la nappe côtière de Korba-Mida, Cap-Bon, Tunisie, *La Houille Blanche*. N°4-5, pp. 24-33.
- GAALOUL N. (2011). Water resources and management in Tunisia, *International Journal of Water*, Vol. 6, 92-116.
- GAALOUL N., GRIRA M., NAJET S. (2008d). Caractérisation et modélisation d'une nappe en zone aride à sémi-aride dans le sud tunisien, *Revue Tunisienne de Géographie*, N°39, 59-87.
- GAALOUL N., MARINOS P., PLIAKAS F. (2008b). Apport des modèles à la gestion intégrée des ressources en eaux souterraines : l'exemple du modèle du Cap Bon, *Les Annales de l'INRGREF*, Vol. 11, 139-150.
- GAALOUL N., REKAYA M., JLASSI F. (2008c). Salinisation des eaux souterraines de la nappe phréatique de la Côte Orientale au nord-est de la Tunisie, *Revue Géologues*, Vol. 159, 59-64.
- GAALOUL N. (1992). Modélisation mathématique du système aquifère multicouche Application: Bassin Nord-Aquitain (Oligocène - Eocène), Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux I, BRGM, 283p., Ed. BRGM, No 92 BOR1 0614.
- KOUZANA L., BEN MAMMOU A., GAALOUL N. (2009). Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie), *Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Ecologie Tropicales*. Vol.31, 57-70.
- PANICONI, C., KHLAIFI, I., LECCA, G., GIACOMELLI, A., TARHOUNI, J. (2001). Modeling and Analysis of Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Eastern Cap-Bon, Tunisia, *Transp. Porous Media*, Vol.43, 3-28.