

Salinisation des eaux souterraines de la nappe phréatique de la Côte orientale au nord-est de la Tunisie

Noureddine Gaaloul¹, Moncef Rekaya², Fayçal Jlassi³.

Généralités

La Tunisie est un pays aride à semi-aride sur les trois quarts de son territoire et se caractérise par la rareté de ses ressources en eau et par une variabilité accentuée du climat dans l'espace et dans le temps. Il reçoit en moyenne des précipitations annuelles de 36 milliards de m³ alors que le potentiel en eau est de 4,6 milliards de m³ : 2,7 milliards de m³/an (58%) pour les eaux de surface et 1,9 milliards de m³/an (42%) pour les nappes.

Les nappes aquifères constituent ainsi une part importante des ressources en eau du pays, dont à peu près un tiers proviennent des nappes phréatiques : les ressources en eaux souterraines sont estimées à 2 100 millions de m³ par an, réparties en 700 millions de m³ provenant des 212 nappes phréatiques et 1 400 millions de m³ provenant de 267 nappes profondes, dont 650 millions de mètres cubes sont non renouvelables (Khanfir *et al.*, 1998).

La péninsule du Cap Bon, région littorale de la Tunisie du nord-est, se caractérise par des traits physiques typiquement méditerranéens. D'une superficie totale de 2 830 km², elle se présente comme une région de plaines, de bas plateaux et de collines, dominée par des reliefs montagneux.

Elle correspond principalement à une structure anticlinale connue sous le nom d'anticlinal de Jbel Abderahman. La série stratigraphique est essentiellement d'âge mio-pliocène et se présente comme une succession de bancs marneux et gréseux ou sableux.

Le réservoir des six nappes du Cap Bon (Gromballia, Côte orientale, Takelsa, Tazoghrene, El Houaria, Hammamet-Nabeul) est constitué par des sédiments du Quaternaire, reposant par endroits sur des formations détritiques du Pliocène. Ces nappes sont activement sollicitées pour l'irrigation et, depuis quelques années, elles sont surexploitées. Par exemple, d'après le bilan 2000 des ressources en eau des nappes phréatiques du gouvernorat de Nabeul, les ressources renouvelables des aquifères phréatiques sont estimées à 181 Mm³/an et leur exploitation à 249 Mm³/an (CRDA, 2004).

La nappe phréatique de la Côte orientale s'étend sur la bande côtière des terrains quaternaires et pliocènes sableux. Le réseau hydrographique constitue une source d'alimentation de la nappe. Cependant, celle-ci est très affectée par une surexploitation au nord où se produit une invasion marine : la surface piézométrique est inférieure au zéro de la mer (cotes -4/-5) jusqu'à 5 km à l'intérieur des terres et la salinité de l'eau est comprise entre 5 et 8 g/l. La stratégie de recharge est de freiner l'avancée du biseau salé (Gaaloul, 2008a).

Expérience de recharge des nappes phréatiques du Cap Bon

Les premiers essais de recharge artificielle menés en Tunisie ont été effectués en 1970, dans le but d'alimenter la nappe de Mateur à partir d'un puits de surface (Ennabli, 1980). Depuis cette date, les expériences se sont multipliées dans plusieurs régions : nappes de Teboulba, de Mornag, de Gromballia, de Kairouan, etc. (DGRE, 2003).

En ce qui concerne les aquifères du Cap Bon, les premières expérimentations de recharge artificielle ont été entamées entre 1975 et 1978 sur la nappe de Gromballia, à partir des eaux de la retenue du barrage Bézik, par le biais de bassins d'infiltration et de puits d'injection. Elles ont permis de vérifier la faisabilité de l'opération et de définir les conditions pratiques de réalisation.

L'expérience tunisienne de recharge artificielle à partir d'eaux usées traitées a été menée en 1985 au droit de la nappe de l'oued Souhil, au nord-ouest de Nabeul. Une fraction des rejets de la station de l'agglomération est refoulée vers un réservoir de 4 000 m³ située à l'amont d'un périmètre irrigué d'agrumes. En

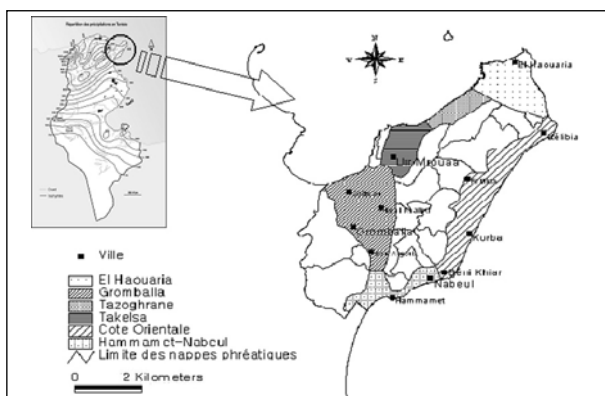


Figure 1. Localisation du Cap Bon (nord-est de la Tunisie) et limites des nappes phréatiques.

1. Maître de Recherches à l'Institut National des Recherches en Génie Rural Eaux et Forêts (INRGREF).
Rue Hédi Karray, B.P. 10- 2080 Ariana Tunisie, courriel : gaaloul.noureddine@iresa.agrinet.tn
2. Directeur au Commissariat régional au développement agricole de Nabeul.
3. Chef de division au Commissariat régional au développement agricole de Nabeul.

dehors des périodes d'irrigation, cette potentialité a été mobilisée pour un stockage saisonnier dans la nappe phréatique.

À travers cette expérience, on visait à la fois à reconstituer une certaine proportion des réserves de la nappe, fortement sollicitée, et à améliorer la qualité microbiologique des eaux usées traitées par recours à l'effet auto-épurateur de la zone non saturée. Les résultats obtenus sont très satisfaisants : remontée des niveaux piézométriques, amélioration de la qualité physico-chimique des eaux. La recharge de nappe par bassin, avec des eaux usées après un traitement secondaire, s'effectue sans nuisances sur l'environnement immédiat.

Soulignons que la qualité de l'effluent utilisé pour la recharge, notamment sa teneur en matières en suspension, a une incidence directe sur le fonctionnement, l'infiltration d'effluent insuffisamment épurés pouvant entraîner l'abandon pur et simple du système de recharge (Rekaya, *et al.* 1988).

Caractéristiques de la nappe de la Côte orientale

La nappe de la Côte orientale, située au nord-est du pays, s'étend sur une **superficie** d'environ 475 km² et une longueur d'environ 45 km. Le **climat** semi-aride de la région se caractérise par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 400 et 500 mm. L'été est chaud et sec, l'hiver froid et humide. L'évaporation mensuelle est importante (autour de 1 300 mm/an), alors que l'humidité mensuelle se situe entre 68 et 76 %.

Les **activités agricoles** dominent (cultures maraîchères, viticulture, arboriculture, céréaliculture et élevage) mais la région héberge aussi **des industries** agroalimentaires, textiles, laitières et papetières. Ces activités demandent des quantités importantes d'eau, fournies essentiellement par la nappe quaternaire et les eaux d'irrigation du canal Medjerda - Cap Bon, qui relie les régions pluvieuses du nord de la Tunisie au cap. Ces eaux ont une salinité moyenne de 1 g/l, pouvant atteindre 3 g/l pendant la période d'étiage.

L'**aquifère** se trouve dans des formations plio-quaternaires recouvrant le Miocène et l'Éocène moyen, comme le montre le flanc est du Jebel Abderrahmane à pendage sud-est. La phase de serrage atlasique a provoqué des structures plicatives, ainsi que des grands accidents dextres, les plis NE-SW se déformant jusqu'à aboutir à une structure orientée E-W (Ben Ayed, 1986).

Le **réseau hydrographique**, à pente généralement faible, constitue une source d'alimentation de la nappe

côtière. Sa ressource totale est de l'ordre de 73 Mm³/an, pour une superficie totale des bassins versants de 863 km². Une partie de leur apport est mobilisée par 2 grands barrages, 15 barrages collinaires et 11 lacs collinaires.

Le **système aquifère** met en scène trois unités lithologiques : le synclinal de la Dakhla, le Pliocène molassique ou sableux et les formations quaternaires. Le réservoir est constitué par les dépôts quaternaires, dont l'épaisseur ne dépasse pas une centaine de mètres, et les sables du Pliocène sous-jacents, l'ensemble reposant sur les marnes du Miocène (Rekaya, 1986 ; Paniconi *et al.*, 2001).

Il y a deux nappes superposées : la nappe phréatique des dépôts plio-quaternaires et la nappe profonde logée dans les formations miocènes.

L'**infiltration directe de la pluie** (475 mm/an) alimente les affleurements quaternaires et bénéficie indirectement au Pliocène, puisqu'il n'y a pas d'écran imperméable entre les deux formations ; inversement, un apport peut se produire du Pliocène vers le Quaternaire (Ennabli, 1980).

L'alimentation des aquifères se fait aussi par les importantes séries gréseuses inférieures de l'Oligo-Miocène et à partir des nombreuses barres de grès peu épaisses des séries moyennes et terminales en disposition périsynclinal. Les sondages profonds ont montré un substratum marneux d'âge miocène avec une eau saumâtre de 3 à 4 g/l pour les derniers horizons (Rekaya, 1989).

La transmissivité des formations quaternaires, calculée sur deux piézomètres situés à proximité de la côte, est égale à $2,8 \cdot 10^{-4}$ et $4,4 \cdot 10^{-4}$ m²/s. La transmissivité de l'ensemble Quaternaire- Pliocène mesurée sur un forage est égale à $9 \cdot 10^{-3}$ m²/s (Zghibi, 2007).

Le **système aquifère est exploité** par 9 239 puits de surface, dont 6 069 sont équipés de pompes. Si les ressources totales sont estimées à 50 Mm³/an, l'exploitation a dépassé 54 Mm³/an, ce qui aboutit à un taux de prélèvement de 108%. Le taux de renouvellement des réserves hydriques est de 0,01. Le déficit de 4 Mm³ traduit la surexploitation intensive de la réserve régulatrice annuelle, ce qui se marque par la baisse continue du niveau piézométrique et l'intrusion du biseau salé le long de la côte (Chattouti, 2006).

Évolution piézométrique de la nappe de la Côte orientale

Nous considérerons d'abord **quatre situations piézométriques** : celles de 1963, 1970, 1988 et 1996 (Fig. 2).

La piézométrie de 1963 (Daniel *et al.*, 1963) a permis d'identifier le sens d'écoulement naturel de la nappe, qui se fait du nord-ouest vers le sud-est en direction de la

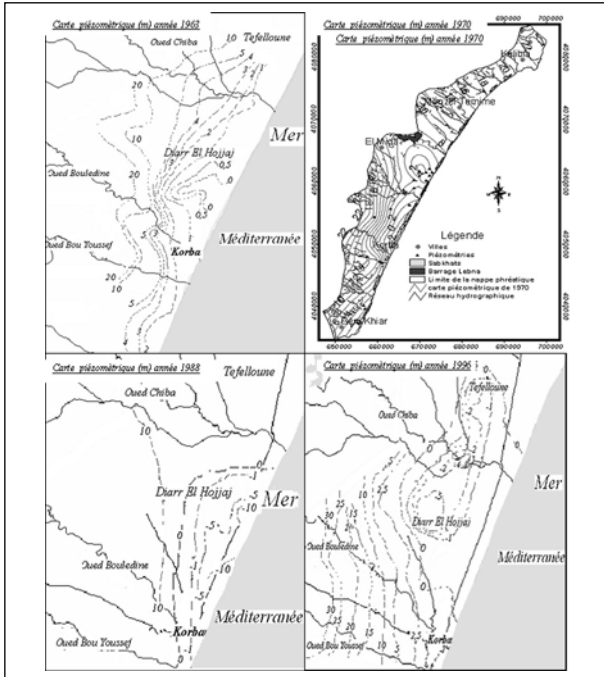


Figure 2. Cartes piézométriques de la nappe de Korba des années 1963, 1970, 1988 et 1996.

mer. Certains oueds drainent la nappe alors que d'autres l'alimentent. L'isopièze zéro ne se place à l'intérieur du continent qu'au nord de Korba, délimitant un cône de dépression localisé mais qui marque le démarrage d'une exploitation intensive.

La piézométrie de 1970 (Ennabli, 1980), a montré que la courbe isopièze zéro délimite alors deux cônes, situés à environ 4 à 5 km de la mer. L'aggravation de la situation piézométrique, soulignée par la progression de l'isopièze zéro et l'accentuation de la dépression de la surface de la nappe, est liée à la réalisation de nouveaux puits, à l'approfondissement des puits existants et à l'augmentation des volumes pompés suite à l'électrification des pompes.

La piézométrie de 1988 (Rekaya, 1989) a permis d'enregistrer une nouvelle avancée des valeurs négatives vers l'ouest, malgré la contribution des périmètres irrigués à l'atténuation de l'exploitation et à la sauvegarde de la nappe. Cette situation critique est due essentiellement à la sollicitation continue de l'aquifère et à l'irrégularité des précipitations.

La piézométrie de 1996 (Jemai, 1998) montre que les dépressions observées ne font que s'accroître avec le temps. En effet, la recharge naturelle n'arrive pas à couvrir l'extraction et l'isopièze zéro délimite la quasi-totalité de la zone agricole qui s'étend entre les oueds Bouleddine et Lebna. L'apparition de l'isopièze zéro en bordure de la mer peut s'expliquer par l'infiltration au droit du cordon dunaire littoral.

Au total, l'historique piézométrique 1963-1996 montre une disparition totale de l'alimentation de la sebkha par la nappe, situation prévalant dans toute la bande côtière intéressant les lagunes du Cap-Bon. La dépression atteint 5 mètres entre Tefelloune et Diarr El Hojjaj.

Des **compléments** sont apportés par les états piézométriques de 2002, 2004, 2006 et 2008 (Fig. 3).

L'état piézométrique de 2002 a montré que l'isopièze zéro occupe une dépression importante dans la région d'El Mida - Tefelloune, ainsi qu'au nord de Korba, le niveau piézométrique pouvant atteindre - 5 m sous le niveau zéro de la mer.

L'état piézométrique de 2004 souligne que dans la région de El Mida-Tafelloune, le niveau piézométrique atteint jusqu'à -15 m sous le niveau de la mer. Au nord de Korba, l'isopièze zéro délimite une zone importante où la profondeur de la nappe peut atteindre - 5 m le long de la côte.

L'état piézométrique de 2006 confirme la baisse de niveau piézométrique, accompagnée d'une augmentation alarmante de la salinité. L'isopièze zéro délimite alors deux zones : une zone entre Korba et le sud de Menzel Temime avec un niveau piézométrique entre 0 et - 15 m et une zone située à l'ouest de la nappe, vers la région de Somâa, avec une piézométrie positive pouvant atteindre 25 m.

L'état piézométrique de 2008, enfin, marque la

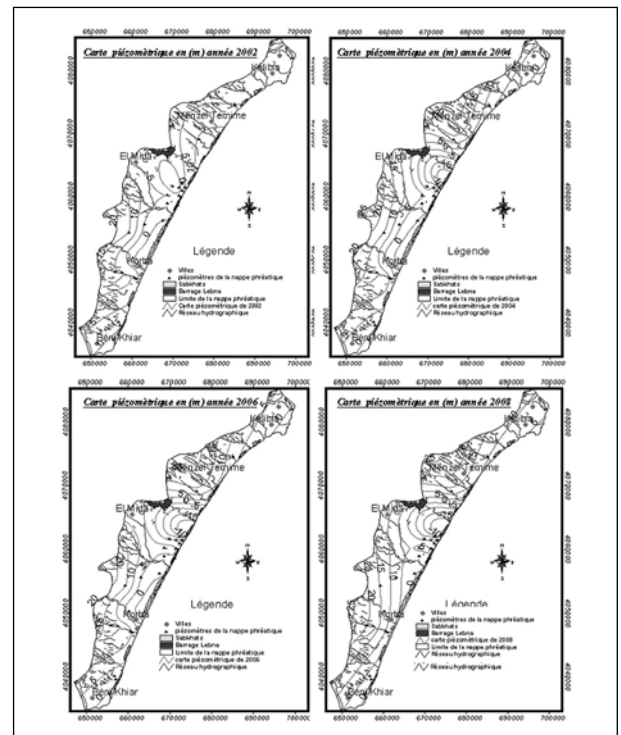


Figure 3. Évolution de la piézométrie de la nappe phréatique de l'aquifère plio-quaternaire pour les années 2002, 2004, 2006 et 2008.

poursuite de l'évolution vers un abaissement de niveau piézométrique et une augmentation de la salinité. Cette diminution du niveau est plus liée à la réalisation de nouveaux puits et à l'approfondissement des puits existants qu'à l'augmentation des volumes pompés suite à l'électrification de plusieurs puits.

Évolution de la salinité de la nappe de la Côte orientale

La figure 4 présente les cartes de salinité pour les années 1963, 1996, 2005 et 2008. La carte de 1963 (Daniel *et al.*, 1963) montre que les eaux de la zone qui longe la côte ont des concentrations en sels relativement faibles, ne dépassant pas 2 g/l, ce qui s'explique par la présence du cordon dunaire du Tyrrhénien, qui favorise l'infiltration des eaux de pluie. Cependant, les eaux de la partie amont de la nappe accusent des teneurs en sels plus importantes, de l'ordre de 5 g/l : cette forte salinité peut être expliquée par la nature lithologique des formations géologiques formant le piedmont du Jebel Abderrahmane, où affleure en effet le Miocène marin.

La carte de 1998 (Khlaifi, 1999), montre que les valeurs de salinité deviennent supérieures à 7g/l. L'Oued Chiba d'une part, les dunes thyrréniennes d'autre part, jouent toujours un rôle important dans la recharge de la

nappe. Le nord-est de l'oued Chiba est caractérisé par une salinité très détériorée alors qu'au sud-est elle est seulement légèrement augmentée. Cette situation est due à la présence des dunes thyrréniennes et à l'existence d'un barrage géologique qui limite l'intrusion des eaux marines. Dans cette dernière situation, l'augmentation des teneurs en sels ne dépend que de la nature de la roche réservoir.

La carte de 2005 montre une légère augmentation de la salinité entre les oueds Chiba et Lebna, ainsi qu'au niveau de Korba et Tefelloune. Cette stabilité locale s'explique par le démarrage de la recharge artificielle au niveau des sites de Diar El Hojje, Lebna Village, Lebna barrage et Bouledine.

Avec la carte de 2008 on peut identifier 5 zones de salinité, de la moins concentrée (2 à 4 g/l de sel) dans le nord de l'aquifère côtier à la plus concentrée (22 g/l de sel) au nord de Korba.

En conclusion, l'augmentation de la salinité explique le nombre élevé des puits de surface abandonnés.

L'exploitation excessive, dépassant généralement le pouvoir régulateur de l'aquifère, entraîne une dégradation continue de la qualité des eaux causée par les activités anthropiques, industrielles ou agronomiques. Cette augmentation de la salinité influe essentiellement sur le rendement des cultures par la destruction de la structure du sol.

La faible salinité en bordure de la mer a son origine probable dans la présence des dunes, qui favorisent l'infiltration des eaux de pluie et/ou des crues des oueds. Dans la partie ouest (amont) de la nappe, à la retombée du Jebel Abderrahmane, les salinités élevées sont plutôt liées à la nature lithologique des formations du Miocène marin.

Suivi de la salinité en profondeur

Des campagnes de mesures de la salinité à différentes profondeurs ont été effectuées dans les piézomètres Lebna 1, Tafelloune 1 et Tafelloune 2 (Fig. 5) :

- à Lebna 1 : la salinité passe de 1,34 g/l à 18 m à 1,63-1,65 g/l à 40 m de profondeur ;
- à Tafelloune 1 : la salinité évolue de 10 g/l à 15 m jusqu'à 29,48 g/l à 45 m ;
- à Tafelloune 2 : la salinité passe de 3,86 g/l à 15 m jusqu'à 9,17 g/l à 40 m.

La salinité est donc plus importante en profondeur qu'en surface ce qui confirme l'intrusion marine observée le long de la nappe côtière du Cap-Bon.

L'interprétation des résultats d'analyse chimique par la méthode de Piper montre en outre que la plupart des échantillons d'eau de la zone côtière sont chlorurés

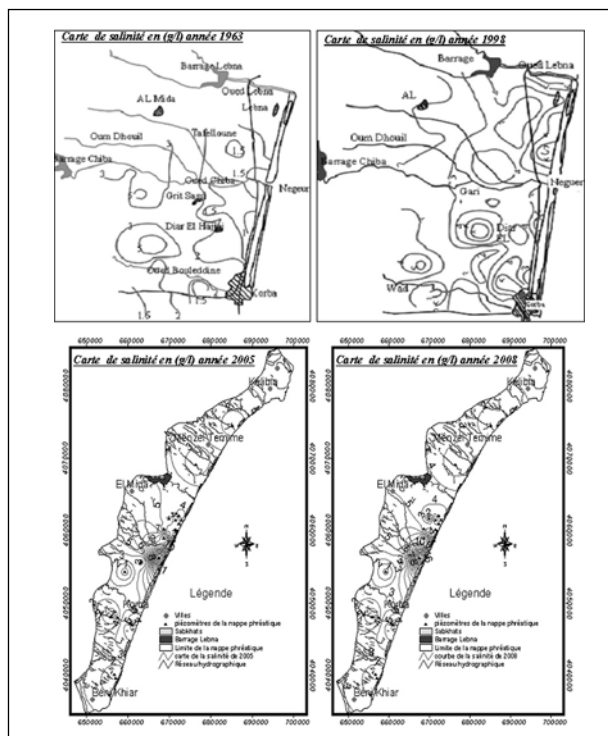


Figure 4. Évolution de la salinité de la nappe phréatique plio-quaternaire de la Côte orientale.

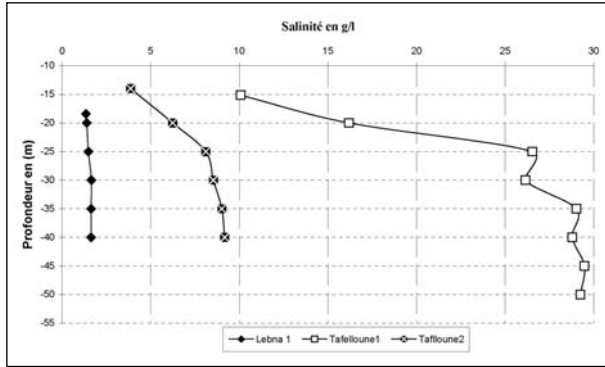


Figure 5. Suivi de la salinité en profondeur des piézomètres Lebna1, Tafelloune1 et Tafelloune2.

sodiques, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de la salinisation de l'aquifère par intrusion marine.

Deux campagnes de sondages électriques réalisées en 1993 et en 1995 par les services de la Direction générale des ressources en eau ont confirmé l'évolution des biseaux salés dans la bande côtière. Dans la région intéressante la lagune de Korba et Diar EL Hajjaj, les sondages réalisés en 1993 montrent des résistivités apparentes comprises entre 20 et 40 ohm.m, confirmant qu'il s'agit de la zone la plus touchée par l'intrusion marine. Les profils géophysiques réalisés en 1995 montrent une généralisation de cette intrusion.

Origine de la salinité de l'aquifère plio-quadernaire de la Côte orientale

L'interprétation des résultats de l'étude de la piézométrie et de la salinité de la nappe de l'aquifère plio-quadernaire de la Côte orientale permet de dégager les conclusions suivantes :

- les dépressions piézométriques observées au niveau de Diar EL Hajjaj et au sud - sud-est de Tafelloune se sont accentuées avec le temps sous l'effet de la surexploitation ;
- ces zones se caractérisent par de fortes valeurs en salinité et en chlorures ;
- l'existence de poches côtières, caractérisées par des hauteurs piézométriques positives et par des salinités et des teneurs en chlorures assez faibles, mettent en évidence le rôle de l'infiltration au niveau des dunes tyrrhéniennes et de la remontée locale du toit du substratum imperméable ;
- l'intrusion marine, consécutive à la surexploitation des eaux souterraines des nappes côtières est démontrée ;
- l'intense évaporation des eaux d'irrigation concentre en sels les eaux infiltrées sous les cultures : la réutilisation multiple des eaux de la nappe pour l'irrigation

augmente en effet continuellement la salinité, puisque la même eau chargée est extraite, concentrée dans la zone racinaire par évapotranspiration et percolée de nouveau vers la nappe. Le retour de ces eaux induit la chute du rendement des cultures maraichères, principale spécialisation de la région, et leur substitution par des cultures plus tolérantes à la salinité comme le tabac ;

- la nature marine des roches du réservoir miocène du piémont du Djebel Abderrahmane constitue également une des sources principales de la salinité des eaux souterraines ;
- les pollutions anthropiques proviennent de sources multiples : rejets des eaux industrielles non raccordés au réseau d'assainissement, eaux usées traitées issues des stations d'épuration, eaux usées urbaines non traitées, utilisation intensive des engrais chimiques dans les périmètres irrigués.

Conclusions

Les conditions climatiques et pédologiques de la nappe de la Côte orientale sont à l'origine d'une exploitation intensive des eaux souterraines aux fins d'irrigation. Ceci pose le problème de la protection de la nappe contre l'invasion saline et la contamination des eaux douces : étant directement ouvert sur la mer, son exutoire principal, l'aquifère côtier est d'autant plus exposé qu'il est déprimé piézométriquement.

Dès les années 70, la nappe de la Côte orientale a connu un déséquilibre entre la recharge et l'exploitation, les prélèvements ayant dépassé le taux de renouvellement des réserves. La surexploitation de la nappe s'est soldée par des dépressions piézométriques qui se sont accentuées et élargies au fil du temps, ce qui a engendré l'inversion du gradient hydraulique et l'envahissement local de la frange côtière par les eaux marines.

Cependant, l'intrusion marine n'est pas l'unique origine de salinisation des eaux souterraines. La nature lithologique de la roche réservoir, le retour des eaux d'irrigation et l'activité anthropique en général sont aussi à l'origine de dégâts qualitatifs spectaculaires. Pour pallier ces conséquences très préjudiciables, les gestionnaires de la ressource en eau ont mis en œuvre la technique de la recharge artificielle, soit par des eaux propres, soit par des eaux usées traitées, une pratique qui a contribué à la stabilisation des états quantitatif et qualitatif de la nappe de la Côte orientale.

Références

- Ben Hamza CH., Lotfi B, Mahmoud M., 2001 : Conservation des zones humides littorales et des écosystèmes côtiers du Cap Bon. Étude hydraulique des lagunes de Maamoura, Tazarka et Korba du littoral est du Cap Bon. Rapport de Diagnostic des sites, 90p.
- Ben Ayed., 1986 : Évolution tectonique de l'avant pays de la chaîne alpine de Tunisie du début de Mésozoïque à l'Actuel. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Paris-Sud Orsay, 327p.
- Chattouti F., 2006 : Étude des fluctuations piézométriques des nappes phréatiques et profondes de la plaine côtière de la Côte orientale du Cap Bon (nord-est de la Tunisie). Mémoire de Mastère. FSB et l'INRGRF, 124 p.
- Commissariat régional au développement agricole (CRDA), 2004 : Rapport sur les ressources en eaux de la région du Cap Bon, 35 p.
- Daniel J.-M., Chabot M., 1963 : Aménagement de l'oued Chiba. Régularisation des apports par les ressources souterraines. Étude hydrogéologique de la région de Korba. Rapport IRH 112, SCET Tunisie.
- Direction générale des ressources en eaux (DGRE), 2003 : Annuaire de la recharge artificielle.
- Ennabli M., 1980 : Étude hydrogéologique des aquifères nord-est de la Tunisie par une gestion intégrée des ressources en eau. Thèse de doctorat d'État, université de Nice, 400 p.
- Gaaloul N., El Heni M., Mechergui M., 2007 : Modélisation numérique des écoulements des eaux souterraines et de transport de soluté : cas de la nappe phréatique de Grombalia. Colloque international sur l'eau et l'environnement, 77-85.
- Gaaloul N., Paul G.-M., Fotis P., 2008a : Apport des modèles à la gestion intégrée des ressources en eaux souterraines, l'exemple du modèle du Cap Bon. Les Annales de l'INRGRF n°10, 125-136.
- Gaaloul, N., 2008b : Gestion intégrée des ressources en eaux souterraines : cas de la plaine du Cap Bon. La Houille Blanche. Revue Internationale de l'Eau n°5, 2008.
- Jemai S., 1998 : Évolution de la nappe de Korba. Étude hydro-géochimique et modélisation numérique. Diplôme d'études approfondies, INAT Tunis, 180 p.
- Khanfir R., Louati M. H, El Echi M. I., Marzouk A., Frigui H.L et Alouini A., 1998 : Stratégie du secteur de l'eau en Tunisie, à long terme, 2030.
- Khlaifi I., 1999 : Contribution à l'étude de l'intrusion marine par un modèle de transport tridimensionnel : interfaçage avec des systèmes d'informations géographiques. Mémoire de fin d'étude de cycle de spécialisation INAT, 153 p.
- Paniconi C., Khlaifi I., Lecca G., Giacomelli A. et Tarhouni J., 2001 : Modelling and analysis of seawater intrusion in the coastal aquifer of eastern Cap-Bon, Tunisia. Transp. Porous Media 43 (1), 3-28.
- Rekaya M., 1989 : Le contexte hydrogéologique de la nappe aquifère de la Côte orientale du Cap Bon (Tunisie) et les problèmes causés par la surexploitation. DGRE, Tunis, 48 p.
- Rekaya M., Plata Bedmar A., 1988 : The Tunisian experience in ground water artificial recharge by treated wastewater. Proceedings of the International Symposium sponsored by the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers and the Los Angeles Section of ASCE held at Anaheim, California from August 23-27, 1988. Ed. ASCE, 612-627.
- Zghibi A., 2007 : Étude de l'évolution de l'état de l'aquifère plio-quadernaire de la Côte orientale du Cap Bon : étude hydrodynamique et modélisation numérique. Mémoire de Mastère en gestion des ressources en eaux souterraines. INAT-INRGRF, 106 p.