

Evolution spatio-temporelle de la nappe phréatique de Korba-El Mida, Cap-Bon (Tunisie) et impact de sa recharge artificielle par les eaux usées traitées

Mekni Amira ¹, Lise Cary ², Souissi Abderrazek ¹, Gaaloul Noureddine ³

¹ INAT: Institut National Agronomique de Tunis 43, Avenue Charles Nicolle 1082 -Tunis- Cité Mahrajène

² BRGM : 3 avenue C. Guillemin, BP 6009 , 45060 Orléans

³ INRGREF: Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts : Rue Hédi Elkarray, Elmenzah IV. BP N°10, Ariana 2080, Tunisie

amiramekni@gmail.com, l.cary@brgm.fr, souissiabderrazek@iresa.agrinet.tn, gaaloul.noureddine@iresa.agrinet.tn

RESUME

Les aquifères côtiers en Tunisie ont subi une dégradation progressive au cours des cinquante dernières années suite aux périodes prolongées de sécheresse, les opérations excessives de pompage et les actions anthropiques récentes. La nappe côtière de Korba-El Mida (Nord-Est de la Tunisie), a manifesté les signes les plus aigus de la surexploitation provoquant une invasion du biseau salé sur une large partie de l'aquifère. De ce fait, la qualité de l'eau de ces nappes n'est apte, dans la plupart des cas, que pour l'irrigation de certaines cultures.

La comparaison des cartes piézométriques et de salinité collectées depuis 1962 a montré des dépressions piézométriques accompagnées d'une augmentation de la salinité confirmant le phénomène d'intrusion marine. En réalité, la demande en eau de cette zone est de loin plus importante que ses disponibilités. Un site de recharge par la réutilisation des eaux usées traitées issues de la station d'épuration de Korba et subissant un traitement tertiaire a été mis en place en 2008.

Le traçage des nouvelles cartes piézométriques a montré une remontée non négligeable au droit du site dès la première année de la mise en service de la station, moins marquée au-delà du site avec une diminution de la salinité. L'analyse des isotopes du Bore sur quelques piézomètres de contrôle a démontré des mélanges relativement considérables d'eaux usées dans la nappe Plio-Quaternaire, ce qui confirme cette légère amélioration de la salinité de la nappe.

En conclusion, cette légère amélioration quantitative et qualitative en termes de salinité de l'état de la nappe est très locale et elle n'a pas beaucoup dépassée le site de recharge, en raison du volume de recharge relativement faible ou bien de la forte exploitation.

I. INTRODUCTION

La Tunisie est un pays aride à semi-aride sur les ¾ de son territoire caractérisé par la rareté de ses ressources en eau et par une variabilité accentuée du climat dans l'espace et dans le temps.

Les aquifères côtiers constituent une part non négligeable des ressources en eau des bassins sédimentaires tel que la région du Cap Bon situé au Nord Est du pays. Ces aquifères calcaires dont les ressources en eau sont intimement liées aux pluies, constituent une part non négligeable des potentialités en eau susceptibles d'y être mobilisées en quantités adéquates et avec une bonne salinité. Malheureusement, au cours des temps géologiques, ils ont subi des périodes de décharge et de recharge, eaux douces ou salées, en réponse aux changements de gradients hydrauliques induits en particulier par la surexploitation, les mouvements tectoniques, les changements du niveau marin, les changements morphologiques, climatiques et par les forçages anthropiques.

Suite à la forte demande en eau de cette région, ces nappes phréatiques sont actuellement exploitées, dans leur majorité, au-delà de leurs potentialités même les nappes profondes sont déjà à une exploitation quasi-optimale. En fait, la demande en eau de cette zone est de loin plus importante que ses disponibilités.

En conséquence, la qualité de l'eau de ces nappes a subi une dégradation progressive et elle n'est apte, dans la plupart des cas, que pour l'irrigation.

Dans le cadre de la stratégie décennale de la Tunisie dans le domaine de la réutilisation des eaux usées traitées, un site de recharge au droit du bassin korba-El Mida a été installé afin de lutter contre l'invasion marine de cette nappe côtière qui constitue un facteur limitant au développement socio-économique de la région.

II. ETUDE DU MILIEU PHYSIQUE

II. 1 Contexte Géographique

Située au Nord-Est de la Tunisie, la nappe de Korba-Mida correspond à la partie centrale de la plaine de la côte orientale du Cap-Bon. Elle est limitée au Sud par Oued Sidi Othmen, au Nord par Oued Lebna, à l'Ouest par Jbel Sidi Abderrahmane et à l'Est par la mer méditerranéenne.

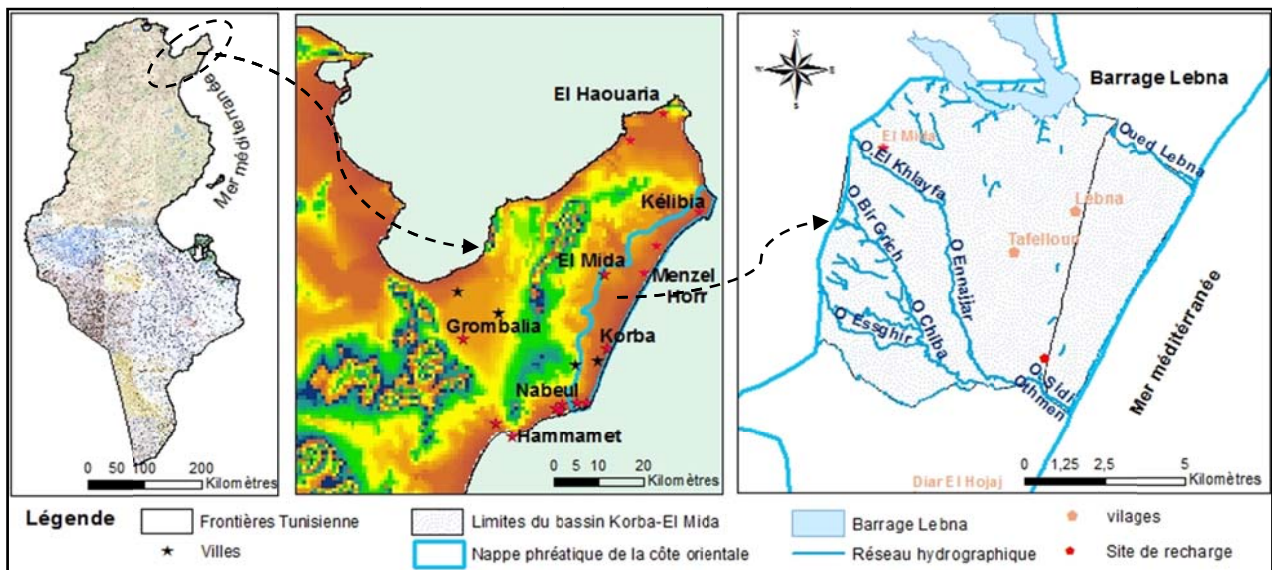


Figure 1 – Carte de localisation géographique

II. 2 Contexte climatique

La région de korba-El Mida s'ouvre sur la Méditerranée ce qui lui confère un climat de type méditerranéen avec un hiver relativement froid et humide et un été chaud et sec. Le régime pluviométrique se caractérise par une irrégularité temporelle, inter-annuelle et intra-annuelle et une variabilité spatiale. La pluviométrie annuelle moyenne varie entre 400 et 450 mm/an, la lame infiltrée est estimée à moins de 10% de cette pluviométrie. L'humidité relative : entre 71 et 82% au niveau de la station de Korba. L'évapotranspiration potentielle (ETP) dans cette région est très importante (1100 mm/an) et variable selon les saisons ce qui rend le bilan hydrique déficitaire du mois de Février au mois de d'Octobre. Le déficit hydrique moyen annuel est de 754 mm soit donc un déficit moyen à combler de 7540 m³/ha/an.

II. 3 Géologie

Le système aquifère de la région korba-El Mida est constitué par une couche hétérogène datant du Quaternaire et d'une couche plus profonde correspondant au Miocène (ENNABLI, 1980) ; ces deux couches sont séparées par une couche argileuse correspondant au Pliocène. Il n'y a pas d'écran imperméable entre les formations Pliocènes et les dépôts du Quaternaire. De ce fait, l'infiltration qui alimente le Quaternaire bénéficie aussi indirectement au Pliocène. Inversement, un déversement des eaux du Pliocène pouvait contribuer à l'écoulement dans ses formations Quaternaires (ENNABLI, 1980).

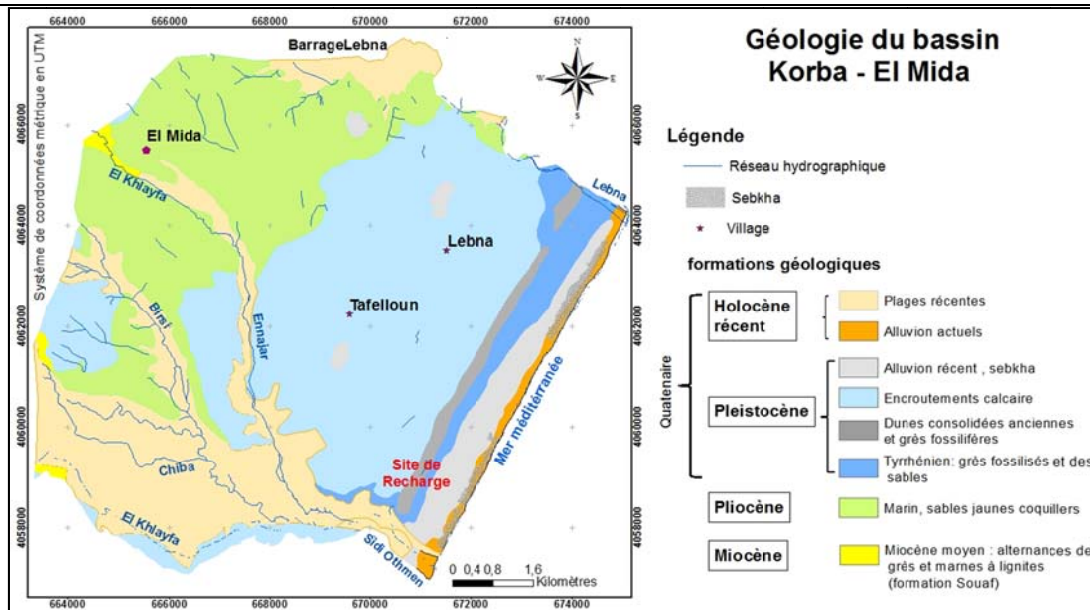


Figure 2 – Carte géologique du bassin korba - El Mida

Le Quaternaire est représenté par une lithologie composée d'argile et des sables argileux avec des intercalations sableuses. Il se présente sous les formes suivantes :

- Quaternaire continental représenté par une lithologie calcaire de 1m d'épaisseur ainsi que plusieurs systèmes des glacis et des terrasses alluviales. Ce Quaternaire est formé essentiellement par des sables à intercalations gréseuses formant ainsi des dunes à encroûtement calcaires et des sols des sebkhas avec des alluvions actuelles telles que : les sables, les graviers et les limons.
- Quaternaire marin développé dans la région de Korba. Il est formé de Sicilien qui correspond à des sables et conglomérats à faune marine.

Le Tyrrhénien ou le cordon tyrrhénien peut atteindre une altitude de 30m depuis le village de Tazarka au Sud jusqu'aux environs de la ville de Kélibia. Le Tyrrhénien est indiqué par un bourrelet marin littoral qui s'étend presque parallèlement à la côte actuelle.

Le Pliocène est défini par les sables Astiens sous forme d'un faciès plus grossier vers Nabeul-Menzel Temime. Il s'agit d'une molasse jaune très fossilifère d'âge Astien, présentant une variation latérale du faciès pouvant passer à des grès consolidés ou à des sables plus ou moins argileux et repose en discordance sur les marnes du Miocène supérieur redressées, dont l'épaisseur atteignant 1000m.

La formation Astien affleure au niveau de synclinal de Dakhla. En effet, l'affleurement atteint le Nord de l'oued Lebna ainsi que le Nord-Est de Tafelloune et se poursuit au niveau de la rive gauche de l'oued Chiba jusqu'au Nord de Menzel Hoor (Jemai, 1998).

Le Miocène moyen est composé d'un complexe argilo-marno.

II.4. Cadre hydrogéologique

Le réservoir de la nappe étudiée est constitué par le remplissage plio-quaternaire à dominance sablo-argileuse. L'épaisseur de cette formation n'atteint guère les 25 m à l'Est de Diar El Hojaj alors qu'elle peut dépasser les 100m dans la zone de Tafelloune (Jemai, 1998).

Ce système aquifère a toutes les apparences d'un système bicouche (Ennabli, 1980), une nappe plio – quaternaire et une nappe miocène plus profonde, séparées par une mince couche d'argile pliocène qui est considérée comme substratum pour la première nappe (Tarhouni, 2002).

La formation pliocène est sablo-limoneuse avec des intercalations d'unités marneuses et la formation Quaternaire est constituée de dépôts continentaux composés par des alternances de graviers, de sables et de limon avec de très fines intercalations argileuses.

L'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration directe des eaux de pluie, par infiltration des eaux de crue des oueds ainsi que par la drainance de la nappe profonde. L'infiltration est estimée en moyenne à 32 mm/an (Ennabli, 1980) et à 18 mm/an par (Khlaifi, 1998) et par (Paniconi et al, 2001).

III. EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE L'ETAT DE LA NAPPE

III.1. Fluctuations piézométriques de la nappe à partir des années 60

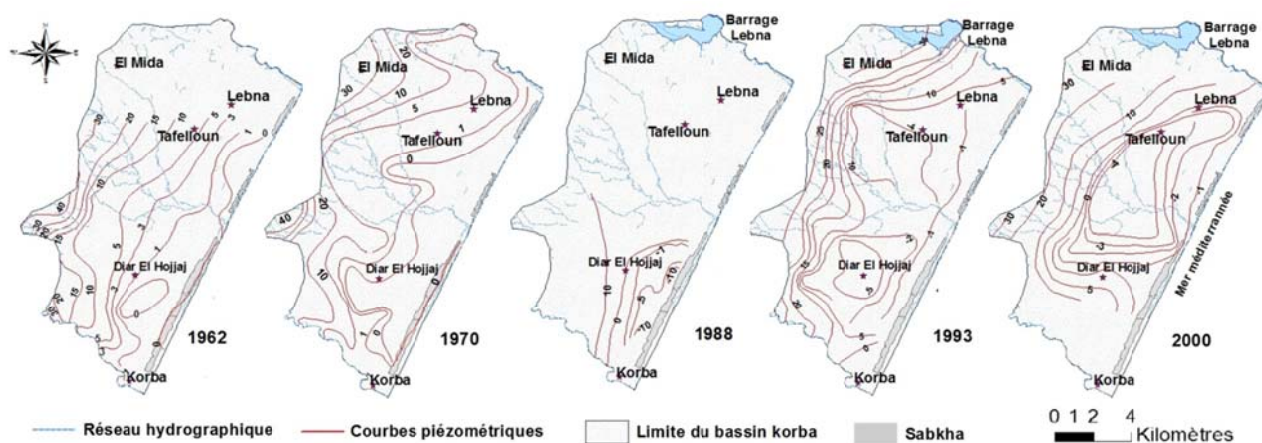


Figure 3 – Evolution des Cartes Piézométriques [carte 1962 (Daniel et Chabot, 1963), 1970 (Ennabli, 1980), 1988 (Ochi, 1988), 1993 (Rekaya, 1993), 2000 (CRDA Nabeul 2004)]

La carte établie en 1962 a permis de relever que l'écoulement général de la nappe de Korba était de l'Ouest vers l'Est en direction de la mer avec une charge hydraulique supérieure à zéro, cependant à l'intérieur du continent au Sud de Diar El Hojjaj et au Sud Est de Tafelloune s'est apparue pour la première fois l'isopièze zéro marquant le démarrage d'une exploitation intensive très localisée.

En 1970, l'isopièze zéro a progressé dans le continent formant deux cônes au niveau de Diar El Hojjaj et Tafelloune (4 à 5 km de la mer). Cette aggravation de la situation est liée à la réalisation et l'approfondissement de nouveaux puits et augmentation du débit pompé suite à l'électrification. La construction du barrage Chiba (1963) a participé aussi à la diminution de la nappe phréatique suite à la réduction de la recharge par ses effluents. D'après les données du CRDA, l'augmentation de l'exploitation des puits privés (300 puits exploités en 1962, 2000 puits en 2000 (Ouchi, 1988)) et l'irrégularité des précipitations expliquent l'apparition pour la première fois des côtes piézométriques négatives allant jusqu'à (-10 m) au niveau de Diar El Hojjaj en 1988, ce qui contribue à l'accélération de l'intrusion marine.

La carte établie en 1993 fait apparaître deux lobes de dépression à Diar El Hojjaj et au Sud de Tafelloune. Les gradients hydrauliques sont inversés vers la partie centrale de l'aquifère déclenchant un état critique de la nappe, plusieurs puits ont été salinisés et abandonnés.

L'invasion du biseau salé le long de la côte orientale se retrouve à quelques kilomètres dans les terres. Les baisses piézométriques sont importantes et varient de -3m à plus de 5m dans les régions de Korba et Tafelloune (Annuaire piézométrique, 1995-1998)

La carte piézométrique tracée en 2000 lors de l'étude du projet de «Recharge artificielle des nappes de Cap Bon par les eaux usées traitées» n'a montré aucun signe d'aggravation de la situation. Cependant, nous avons noté une légère amélioration au niveau des régions de Diar el Hojjaj et Tafelloune et qui s'explique par les effets conjugués de la stabilisation de l'exploitation et les opérations de la recharge artificielle par injection des eaux du Nord dans des puits de surface (Jarraya Horriche et al, 2006).

La détérioration localisée de la situation piézométrique de la zone montre que cette situation est en relation, d'une part, avec l'intensification locale de l'exploitation, d'autre part, avec l'épaisseur de la zone saturée. En effet, les zones qui montrent les rabattements les plus importants se situaient dans des endroits où le substratum est à une profondeur de presque 10 m (Jemai, 1989).

La carte piézométrique de juin 2006 montre un écoulement multidirectionnel avec un écoulement vers des dépressions piézométriques situées à Diar El Hajjej, à Garaet Sassi et au sud de Diar El Hajjej, ainsi qu'à l'est de Tafelloune au niveau de la région littorale, cette carte révèle des hauteurs négatives affichant localement une valeur maximale de - 12 m (kouzana, 2007).

III.2. Salinité

Plusieurs origines sont mises en jeu lors du processus de la salinisation de la nappe de Korba dont nous citons essentiellement l'intrusion marine, le retour des eaux d'irrigation, la nature lithologique des roches du réservoir et l'activité anthropique qui multiplie les sources de pollution hydrique (Fedrigoni et al., 2001). Ces sources reconnues dans la région sont essentiellement composées des rejets des eaux industrielles non raccordés au réseau ONAS, ceux des eaux usées traitées issues des STEP et ceux des eaux usées urbaines non traitées. L'utilisation intense des engrais chimiques, au niveau des périmètres irrigués occupant une grande surface de la plaine côtière, contribue énormément à la nuisance de la qualité de la nappe (Ben Rahma, 2006).

La comparaison des cartes de salinité entre les années 1962 et 1996 (figure 4) montre des plages à salinité élevée qui ont gagné de la surface avec le temps. En effet, la carte des concentrations en sels en 1962 était de l'ordre de 1.5 g/l dans la partie longeant la mer qui est relativement faible alors qu'en amont de l'aquifère les concentrations en sels peuvent atteindre les 5 g/l.

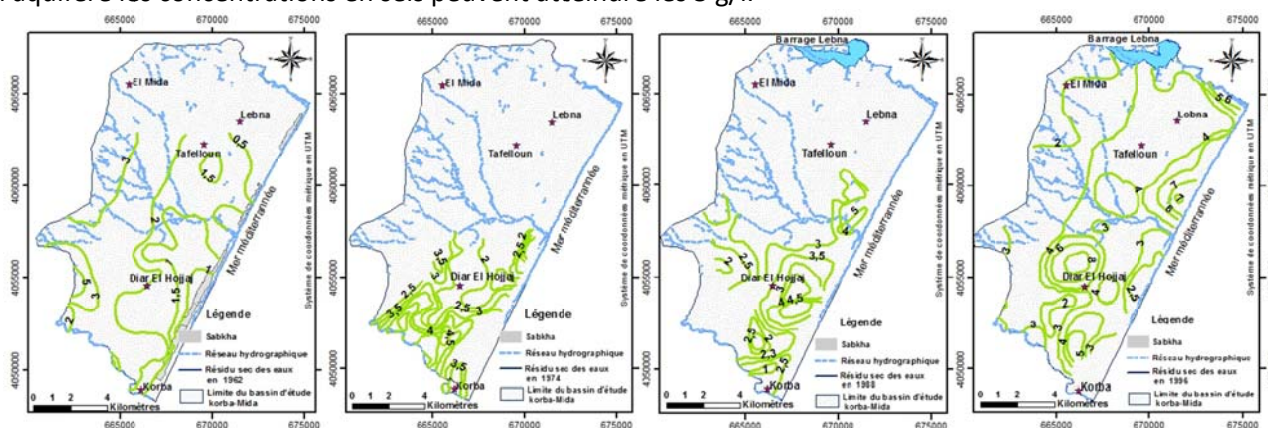


Figure 4 – Evolution de la salinité de la nappe de Korba 1962-1996

La faible salinité en bordure de mer peut s'expliquer par la présence des dunes qui favorisent l'infiltration des eaux de pluie et/ou de crue des oueds (Jemai, 1998). Les teneurs en sels plus importantes à la partie amont sont intimement liées à la nature lithologiques des formations géologiques captées par les puits, et formant le piedmont de Djebel Abderrahmane, où affleure le Miocène constitué par des dépôts d'origine marine.

En 1974 la qualité des eaux des zones côtières a connu une dégradation, les concentrations en sels ont dépassé les 3 g/l faisant preuve de la menace de l'intrusion marine sur la dégradation de la qualité des eaux de la nappe côtière, à cause de l'exploitation intensive de la nappe.

De même en 1988, la qualité de l'eau continue à se dégrader, les salinités enregistrées ont dépassé les 5 g/l, au niveau de la frange côtière, sous l'effet conjugué de la succession des années déficitaires et de l'exploitation croissante causant ainsi l'inversion du gradient hydraulique et donc avancée du biseau salé.

Cette détérioration de la qualité des eaux ne se fait pas parallèlement à la côte, ce qui met en conséquence le rôle de recharge joué par oued Chiba ainsi que celui de l'infiltration favorisée par les dunes Tyrrhéniennes. En fait, au Nord Est de l'oued Chiba la qualité s'est beaucoup détériorée alors qu'au Sud Est, la salinité a légèrement augmenté. Cette situation est due, d'une part, à la présence des dunes Tyrrhéniennes qui favorisent l'alimentation de la nappe, d'autres part, à l'existence d'un barrage géologique qui limite l'intrusion des eaux marines (Jemai, 1998).

Des approches multidisciplinaires ont été utilisées pour étudier les conséquences de l'intrusion d'eau de mer. Les plus récentes études combinent géophysiques et hydrochimie (KOUZANA et al, 2009; KOUZANA et al, 2010.) et isotopes stables (Ben Hamouda, 2009). Le processus principal affectant la qualité des eaux souterraines est l'échange de cations par lequel la solution s'enrichit relativement en Ca et s'appauvrit en Na, Mg, SO₄, K et B. La précipitation de calcite et dolomite, ainsi que la réduction des sulfates, sont des phénomènes couramment observés.

L'étude des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène montrent l'importance de la recharge météorique actuelle de la nappe près des rivières, un mélange des eaux avec l'eau de mer dans la zone de dépression piézométrique, et également un mélange avec des eaux profondes miocène et oligocène pour les points de la nappe profonde (Ben Hamouda, 2009). Toute la région est concernée par des teneurs en nitrates particulièrement élevées issues d'une importante contamination par l'agriculture, (BEN HAMOUDA et al., 2009; KOUZANA et al., 2009; KOUZANA et al., 2010).

Face à cette sollicitation incontrôlée de la nappe, il fallait remédier à ces problèmes engendrés par l'exploitation intensive des aquifères, plusieurs mesures ont été prises suivant le cas et qui ont consisté en :

- l'instauration de périmètres de protection, de sauvegarde ou d'interdiction afin de limiter les prélèvements.

- l'apport d'une ressource en eau allochtone, les eaux de Nord, véhiculée au niveau du canal Medjerda-Cap Bon.

- le renforcement des conditions d'alimentation des systèmes aquifères, par la mise en place des aménagements hydrauliques et des ouvrages de conservation des eaux et des sols, avec une priorité accordée aux régions qui ont atteint un état de surexploitation.

Par ailleurs, devant la demande de plus en plus croissante de l'eau aussi bien pour la boisson que pour l'industrie et surtout celles liées à l'intensification des activités agricoles, et compte tenu de la limitation des ressources hydriques conventionnelles, le recours à la mise en application d'une politique de gestion rationnelle et rigoureuse de l'exploitation des ressources est devenu inévitable, basée à la fois sur la valorisation et l'économie des ressources en eau et la réutilisation d'une ressource non conventionnelle qui ne cesse de s'accroître d'une année à une autre : les eaux usées essentiellement traitées (Jarraya Horriche et al, 2006).

IV. IMPACT DE LA RECHARGE

IV. 1 Descriptif et dispositif du site

Le site de Korba-El Mida est situé à environ 300 m au Nord de la station d'épuration de Korba et distant de 1.5 Km de la côte. Il se trouve à l'altitude 15 m/NGT. A ce niveau, les côtes piézométriques sont de l'ordre de - 2 m, à l'ouest du site se manifeste une dépression piézométrique de - 4 m et la salinité des eaux souterraines avoisine 5 g/l (CRDA de Nabeul, 2004). Le projet de recharge se situe donc en limite de la zone contaminée par l'invasion marine. La recharge artificielle a pour objectif l'arrêt de la progression du biseau salé (CRDA de Nabeul, 2004).

Le site a été choisi suite aux études géologiques, hydrogéologiques, environnementales et de faisabilité ainsi qu'à l'analyse d'intérêt socio-économique du projet de la recharge artificielle des nappes en tenant compte de la disponibilité en eau de la station d'épuration. La station d'épuration de Korba fonctionne sur le procès des boues activées à faible charge, après un prétraitement mécanisé.

Mise en eau du site: 22 Décembre 2008
Dispositif : 3 bassins rectangulaires creusés
sur sol dont deux sont en fonctionnement
simultané et un au repos.
Vitesse d'infiltration : 0.5 (m /j)
Superficie du site: 4.46 ha.
Mode d'alimentation en eau : Alimentation
gravitaire par bâchées à partir d'un bassin
tampon de 300 m³ produisant une lame d'eau
théorique de 200 mm.
Volume disponible pour la recharge: 1500
m³/j (CRDA de Nabeul, 2004).

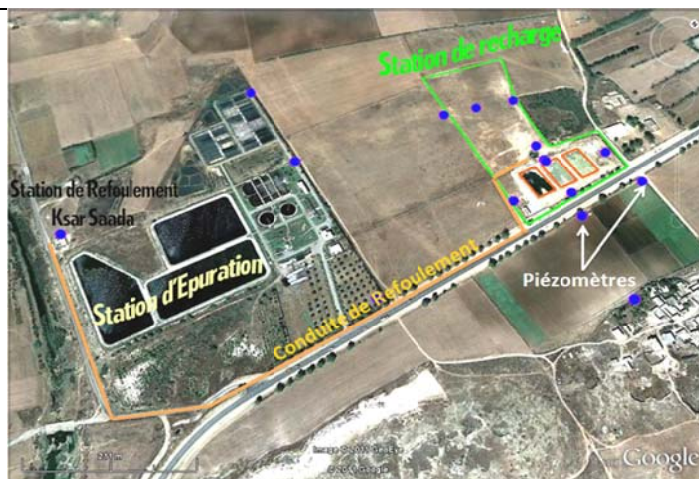


Figure 5 – Localisation du site de recharge de korba-El Mida

IV. 2 Situation après la recharge

Des campagnes de mesure des fluctuations piézométriques et de qualité ont été réalisées depuis la mise au service du site de recharge pour suivre l'effet de la recharge au droit du site à partir des piézomètres de contrôle ainsi que sur quelques puits privés aux alentours.

IV. 2.1 Piézométrie

Au cours de ces trois dernières années, en traçant les cartes de piézométrie, les premières marques observées traduisant l'effet de la recharge ne sont aperçus qu'au droit du site.

En fait, la nappe se trouvait à la côte -1.5, à hauteur du site, inférieur au zéro de la mer sur toute la zone à l'ouest du site de recharge. Celle ci passe à une côte voisine de voisine de -4 à l'ouest en limite de la zone de recensement des puits. Par contre, à l'Est du site la nappe est à une côte un peu supérieur à zéro dû à l'arrêt de l'exploitation intensive; la plupart des puits sont abandonnés (CRDA, 2004).

En 2009, nous avons remarqué une remontée du niveau de la nappe juste au niveau du site poursuivi progressivement en 2010 avec une amélioration à l'Ouest du site de recharge dans la zone des puits quoiqu'elle a été moins ressentie en 2011 (figure 6).

En fait, dans la zone où existe le réseau d'irrigation à partir des eaux du Nord, les puits continuent à être utilisés d'une façon intensive pour l'irrigation en mélangeant ces eaux avec les eaux de la nappe.

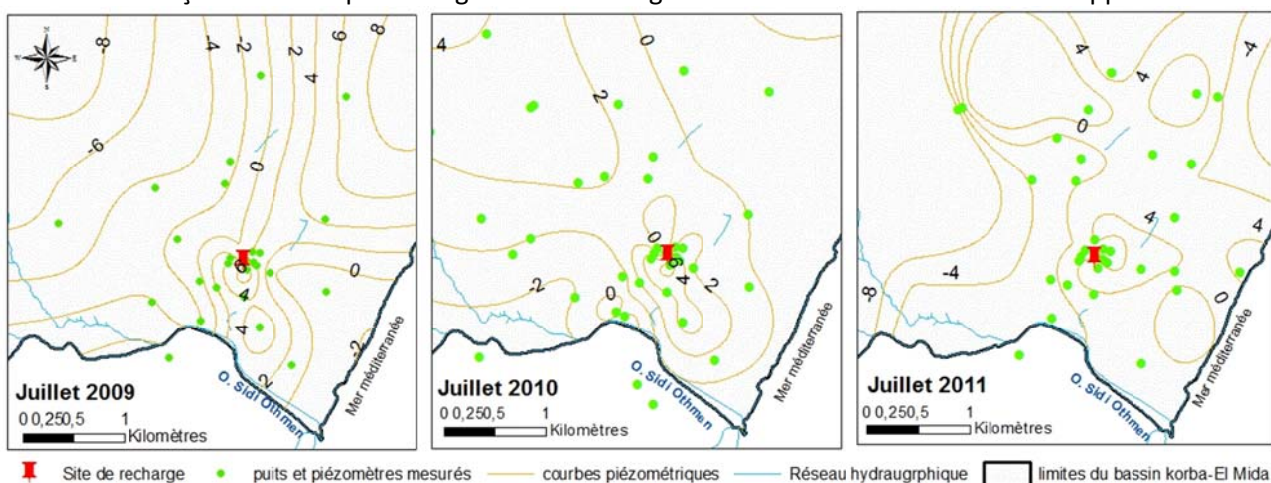


Figure 6 – Cartes piézométriques après recharge

IV. 2.2 Qualité des eaux de la nappe

Parallèlement à la remontée du niveau de la nappe, les mesures du résidu sec ont confirmé cette légère amélioration de la qualité des eaux de la nappe plio-quadernaire de korba-El Mida, même si elle n'a été observée qu'aux alentours les plus proches du site. En effet, la salinité des eaux de la nappe a atteint les 10g/l (CRDA, 2004) passant à des valeurs entre 2 et 4 g/l sous l'effet de la recharge en 2011 au droit du site.

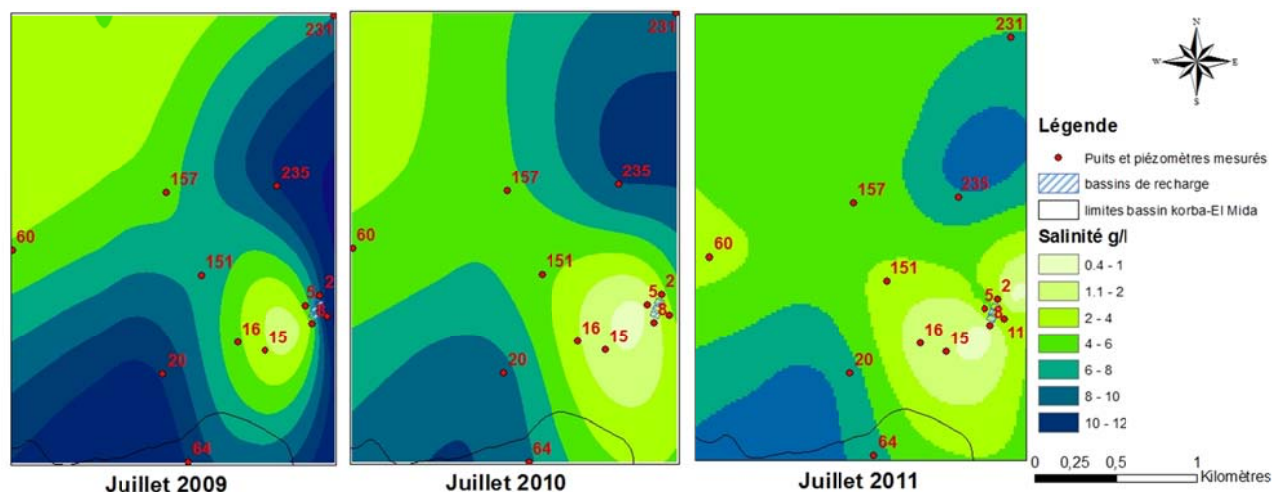


Figure 7 – Cartes de salinité après recharge

Le bore est un bon traceur des eaux usées domestiques en raison de leurs concentrations de perborates de Na et de Ca issus des lessives, avec une signature isotopique bien définie et des concentrations en Bore dépassant fréquemment 0,1 mmol / L (Vengosh 2003). L'analyse des isotopes du Bore a permis de confirmer l'importance des mélanges dans la nappe Plio-Quaternaire, avec des contributions des eaux de pluie, des eaux profondes miocènes par drainance ascendante (Cary et al, submitted). Seuls quelques piézomètres de contrôle situés sur le site de recharge témoignent d'un mélange avec un certain volume d'eaux usées traitées, les puits des agriculteurs aux alentours ne sont pas ou très peu affectés. Enfin, la concentration non négligeable des eaux de recharge, en chlorures et sodium notamment, ne peut qu'être une limite à l'amélioration de la salinité de la nappe.

V. CONCLUSION

Au cours des temps géologiques, l'aquifère de korba a subi des périodes de décharge et de recharge, eaux douces ou salées, en réponse aux changements de gradients hydrauliques induits essentiellement par l'intensification du pompage et des changements climatiques conduisant à une intrusion du biseau salé qui s'est aggravé à travers le temps.

Le site de recharge par les eaux usées traitées korbe-El Mida, en 2008, était la solution pour freiner cette intrusion marine.

L'analyse des cartes piézométriques et du résidu sec de l'aquifère après cette recharge a montré une légère amélioration au droit du site les deux premières années suivant le démarrage du site (2009 et 2010) qui s'est manifestée par une remontée du niveau piézométrique et d'une diminution du résidu sec, moins marquée en 2011 en raison du volume de recharge relativement faible ou bien de la forte exploitation.

L'étude doit être approfondie par des approches pluridisciplinaires, notamment par une modélisation hydrodynamique et hydro-chimique du transport de solutés vers la nappe.

Références bibliographiques

- Ben Hamouda, M. F., Leduc, C., Tarhouni, J., and Zouari, K., 2009. Origine de la minéralisation dans l'aquifère plio-quadernaire de la côte orientale du cap Bon (Tunisie). *Sécheresse* 20, 78-86.
- Ben Rahma K. (2006) Optimisation des réseaux piézométriques et de qualité des eaux des nappes de la Côte Orientale de Cap Bon. Mémoire de diplôme de master. ESIER de Medjez El Bab
- Cary, L., Mekni, A., Casanova, J., Guerrot, C., and Gaaloul, N., submitted. New insights of the Korba aquifer dynamics under artificial recharge running with boron isotopes (Cape Bon, Tunisia). *Applied Geochemistry*.
- CRDA. Nabeul, 2004. Projet de recharge des nappes de Cap Bon à partir les eaux usées et traitées. Etude d'avant projet sommaire sur le site de Korba. DGRE.
- Daniel J. M. et Chabot M. (1963) Aménagement de l'oued chiba. Régularisation des apports par les ressources souterraines. Etude hydrogéologique de la région de Korba. Rapport IRH 112. SCET. Tunisie.
- DGRE. 1998-1999. Annuaire d'exploitation des nappes phréatiques.
- Ennabli M. (1980) Étude hydrologique des aquifères du nord-est de la Tunisie par une gestion intégrée des ressources en eau. Thèse de doctorat d'état. Université de Paris.
- Jemaii. (1998) — Evolution de la nappe de Korba. Etude hydrogéochimique et modélisation numérique. Diplôme des Etudes Approfondies, I. N. A. T. Tunis.
- Jarraya Horriche F. (1995) Elaboration d'un modèle de transport de masse par la méthode des trajectoires des particules. Mémoire de diplôme d'études approfondies. Faculté des sciences de Tunis.
- Jarraya Horriche F., Chemingui A., Cheref A., Ouslati M. Naceur, Jlassi F. et Rekaya M. (2006) Evolution of groundwater salinity of oriental coastal aquifer (Cap Bon of Tunisia). Regional Conference on Ground Water Protection, Libya, 20-22 November 2006.
- 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 de cycle de spécialisation. INAT.
- Kouzana, L., Ben mammou, A., and 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'écologie tropicales* Tome 1, 57-70.
- Kouzana, L., Benassi, R., Ben mammou, A., and Sfar felfoul, M., 2010. Geophysical and hydrochemical study of the seawater intrusion in Mediterranean semi arid zones. Case of the Korba coastal aquifer (Cap-Bon, Tunisia). *J. Afr. Earth Sci.* 58, 242-254.
- Ouchi J. (1988) Effet de l'exploitation intensive d'une nappe côtière sur l'intrusion du biseau salé : cas de la nappe de Korba. Mémoire de fin de cycle de spécialisation. Faculté des sciences Tunis.
- Paniconi C., Khlaifi I. Lucca G., Giacomelli A. et Tarhouni J. (2001) A Modelling Study of Seawater Intrusion in the Korba Coastal Plain, Tunisia. *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol. 26, No. 4, pp 345-351.
- Rekaya M. (1993) Carte piézométrique non publiée de la nappe de la Côte Orientale en 1993
- Vengosh, A., 2003. *Treatise on Geochemistry*, Chap 9, p 333-365