Modélisation de l'impact de la création d'un lac artificiel sur la qualité des eaux souterraines (cas de la dépression de Moknine — Tunisie)

Modelling an artificial lake creation impact on the ground water quality (case of the Moknine depression — Tunisia)

par Samia Tagina* et Hamed Ben Dhia**

Laboratoire d'Hydrogéologie-Géothermie, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax

(*) Assistante à la Faculté des Sciences de Sfax.

(**) Professeur, Président de l'Université de Sfax pour le Sud.

Numerous examples of artificial lake creation are known throughout the world. The sebkha of Moknine is a coastal depression situated in the south east of Moknine region (Tunisia sahel). With its geographic position close to the Mediterranean sea and to the Tunisia sahel tourist zone and with a depth of -10 m below the sea level, this sebkha constitute a privileged site for an artificial lake construction. The numerical modelling of the coupled mass and water transfer with the HST3D code through the projected lake and the surrounding aquifers have permitted to define the impact of this project realisation on the ground water quality. A marine water intrusion risk in the phreatic aquifers through the projected lake was confirmed by numerical simulations.

I ■ INTRODUCTION

La croissance et le développement économique sont à l'origine de nombreuses modifications des milieux naturels. En effet, partout dans le monde, de nombreuses zones humides se trouvent confrontées à des problèmes de pollution ou de réaménagement en raison de leur proximité de centres urbains. La création de lacs artificiels au niveau des dépressions côtières en vue d'une exploitation industrielle ou touristique est assez fréquente.

La Tunisie centro-orientale présente plusieurs dépressions côtières. La sebkha de Moknine, avec son fond situé au-dessous du niveau de la mer, sa position tout près de la mer Méditerranée et de la zone touristique du Sahel tunisien, constitue un site privilégié pour la réalisation d'un lac artificiel.

La nappe phréatique dans la zone du projet est largement exploitée en raison de la bonne qualité des eaux. Dans le présent article, on se propose par l'étude hydrogéologique et la modélisation numérique d'examiner l'impact de la création du lac sur l'évolution quantitative et qualitative des eaux de la nappe en fonction des différents scénarios d'aménagement.

II ■ CADRE GÉOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE

La zone d'étude est une dépression côtière se situant au Sud-Est de la région de Moknine et au Nord-Ouest de Mahdia. Elle se trouve limitée par le plateau de Moknine au Nord et la plaine de Mahdia au Sud (fig. 1).

La dépression côtière de Moknine a une forme générale lozongique avec 10 km de longueur et 6 km de largeur. Le fond de cette dépression se trouve actuellement au-dessous du niveau de la mer à cause de la subsidence de la région due à l'activité tectonique durant le Quaternaire récent. L'aire de la dépression située au-dessous du niveau zéro marin est d'environ 60 km² — dont 40 km² — se situent à -9 m de profondeur par rapport au zéro marin.

La dépression est séparée de la mer Méditerranée par une bande de terrain peu large d'âge mio-pliocène à quaternaire. La largeur moyenne de cette bande est de 4 km, mais elle s'amincit vers le Sud-Est et le Nord-Est de la dépression où elle est large de 3 km. La barrière continentale côtière a une hauteur maximale de 30 m et minimale de 7 à 8 m par rapport à la mer. Au niveau de l'angle Sud-Est de la dépression, la barrière littorale est entaillée par l'oued « Chercher ». Cet oued coule vers l'Est et se déverse dans la mer Méditerranée.

1. Carte de localisation de la zone d'étude.

née. Ainsi, la bande qui sépare la dépression de Moknine de la mer se réduit à un seuil médian de 26 m d'altitude et large de 1 km seulement, d'où la possibilité de relier la dépression de Moknine à la mer par un canal creusé dans la barrière côtière et qui utiliserait le parcours de l'oued Chercher [1].

III ■ CLIMATOLOGIE

Le Sahel de Monastir est caractérisé, malgré sa façade maritime, par son endoréisme presque total. La pluviométrie annuelle moyenne est estimée à 360 mm, caractérisant une saison d'automne pluvieuse et un été sec, exceptionnellement orageux. Les températures mensuelles moyennes dans cette zone, observées durant les périodes 1968-1990 révèlent que les mois de juillet, août, et septembre sont les plus chauds avec une température qui varie de 25 à 27 °C. La température minimale est enregistrée au mois de janvier ; elle est de l'ordre de 12 °C.

Selon la saison, le secteur de la sebkha de Moknine est exposé à des vents orientaux et sud orientaux, généralement pluvieux en automne, à des vents secs et froids du Nord et du Nord Ouest en hiver. L'été est surtout caractérisé par des vents sirroco-méridionaux et sud occidentaux. En général, la vitesse du vent ne dépasse pas 12 m/s.

IV ■ CADRE GÉOLOGIQUE

● 4.1 Stratigraphie

La série sédimentaire affleurante est d'âge miocène à actuel. Les terrains d'âge miocène supérieur sont constitués par des alternances argilo-sableuses à couches de lignite [2]. Le Mio-Pliocène affleure près de Moknine ; il est constitué d'une alternance de marnes gypseuses et d'argiles, les bancs sableux sont rares en profondeur. Le Mio-Pliocène forme le sous-sol de la colline qui sépare la dépression de Moknine de la mer. Il est recouvert par le Quaternaire ancien. La partie supérieure de la formation semble être sableuse et perméable ; elle contient une nappe activement exploitée aux alentours de Teboulba.

Le Pliocène marin affleure au Sud de Teboulba. Il est formé par une dizaine de mètres de grès coquilliers à figures de chenaux à la base, remaniant des coquilles d'huîtres mio-

cènes. Au sommet, ces grès grossiers passent à des sables à stratifications obliques [3].

Le Quaternaire ancien recouvre la plus grande partie de la colline de Moknine, Teboulba ainsi que les reliefs tertiaires à la limite ouest de la région. Il est constitué de marnes sableuses et il se termine en surface par une croûte calcaire dure et peu perméable.

Les alluvions récentes occupent de grandes surfaces à l'Ouest de la dépression de Moknine et quelques petites zones près de la côte. Ce sont des marnes souvent sableuses qui donnent des sols assez fertiles.

Les sols salés de Gara se limitent à plusieurs bandes étroites en bordure de la dépression de Moknine. Ils portent une végétation halophile peu dense.

● 4.2 Tectonique

Le secteur de la sebkha de Moknine fait partie de la plaine du Sahel dont l'essentiel des structures régionales se sont développées au Quaternaire [4]. Les terrains les plus anciens affleurant dans ce secteur sont du Miocène supérieur. Depuis cet âge, la zone du sebkha a connu la succession des phases tectoniques suivantes [5] : un épisode de subsidence et de distension au Miocène supérieur, un épisode de compression modérée du Miocène terminal au Pliocène inférieur, une période de distension durant le Pliocène supérieur — Quaternaire ancien et une phase de compression majeure initiée au Quaternaire ancien et qui continue au Quaternaire récent.

La formation de la sebkha de Moknine est attribuée à un effondrement par d'importants accidents de direction est-ouest [6].

Ainsi la sebkha de Moknine se trouve limitée par la structure monoclinale de Moknine au Nord et la plaine de Mahdia au Sud, à l'Est et à l'Ouest [6, 7]. Le monoclinale de Moknine longe la bande côtière au Nord de la sebkha selon une direction est-ouest. Il est constitué par un encroûtement calcaire feuilleté d'âge quaternaire. La plaine de Mahdia est occupée par des champs d'oliviers à substratum mio-pliocène ou quaternaire [6].

V ■ HYDROLOGIE

Le bassin versant d'El Baher présente le principal réseau hydrographique de la zone étudiée. Il est drainé par les oueds Ayed, Er Rejeb, Bannour, Echaibet, Rejel Chiba, Chercher et El Bouari (fig. 1). Le cours d'eau Ayed qui draine les périmètres urbains occidentaux de la ville de Moknine a été aménagé en ruisseaux pour transporter leurs eaux pluviales à la sebkha [8].

VI ■ HYDROGÉOLOGIE

Le complexe aquifère phréatique est composé de deux compartiments : la nappe du Tertiaire et celle des alluvions. La première loge dans des niveaux sableux et est atteinte par des forages sous le Quaternaire ancien entre Moknine et Teboulba. Dans ce secteur, la nappe est très activement exploitée avec un nombre de puits supérieur à 1 000. La qualité de l'eau est satisfaisante et les profondeurs du niveau d'eau sont importantes. La nappe des alluvions est exploitée dans la partie sud-est de la région. Elle est située à 20 m en moyenne sous le terrain naturel sauf dans la zone du Quaternaire ancien à la limite sud-est de la région où la profondeur est généralement inférieure à 15 m.

Le substratum du complexe aquifère est constitué par un banc argileux assez épais et continu situé à des profondeurs assez variables et qui atteignent 70 m par endroits [9].

VII ■ SIMULATION NUMÉRIQUE

● 7.1 Présentation du logiciel HST3D

Le logiciel de transport tridimensionnel de masse et de chaleur HST3D est le descendant d'un programme pour le calcul des effets de la migration des polluants liquides dans les aquifères salins profonds, développé par INTERCOM (1976) et révisé par INTERA (1979) pour « U S Geological Survey ».

Le programme HST3D simule l'écoulement dans les systèmes aquifères et le transport associé de masse et/ou de chaleur en trois dimensions dans les milieux poreux saturés. La méthode des différences finies est adoptée par ce logiciel pour la discrétisation spatiale et temporelle.

● 7.2 Conditions de simulation

7.2.1 Equations de transfert d'eau et de masse en milieux poreux saturés

L'équation de l'écoulement dans un milieu poreux saturé est déduite par la combinaison de la loi de conservation de la masse totale du fluide et la loi de Darcy pour l'écoulement en milieux poreux. Cette équation est donnée par l'expression suivante :

$$\partial(\epsilon\rho)/\partial t = \nabla \cdot \rho \mathbf{k} / \mu (\nabla + \rho \mathbf{g}) + q\rho^* \quad [1]$$

avec :

P : pression du fluide (Pa).

t : temps (s).

ϵ : porosité effective.

ρ : densité du fluide (kg/m^3).

ρ^* : densité du fluide à la source (kg/m^3).

$\mathbf{k}$: tenseur de perméabilité du milieu poreux (m^2).

μ : viscosité du fluide ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$).

$\mathbf{g}$: constante gravitationnelle (m/s^2).

q : flux du fluide à la source ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

ρ^* : est la densité du fluide à la source si $q > 0$. ρ est la densité du fluide à la source si $q < 0$.

L'équation de conservation d'un soluté dans la phase fluide peut être écrite sous la forme suivante :

$$\partial(\epsilon\rho w)/\partial t = \nabla \cdot \epsilon\rho D_s \nabla w + \nabla \cdot \epsilon\rho D_m \nabla w + \nabla \cdot \epsilon\rho v w - \lambda \epsilon\rho w - \rho b Rfs + q\rho^* w^* \quad [2]$$

avec :

W : fraction de masse du soluté en phase fluide ;

W^* : fraction de masse du soluté du fluide à la source ;

D_s : tenseur du coefficient de dispersion mécanique (m^2/s) ;

D_m : diffusivité moléculaire effective du soluté (m^2/s) ;

I : matrice Identité d'ordre 3 ;

λ : constante de transformation linéaire (s^{-1}) ;

Rfs : taux du transfert du soluté de la phase fluide en phase solide par unité de masse de phase solide ($\text{kg de soluté/s.kg phase solide}$) ;

ρb : densité volumique du milieu poreux (kg/m^3).

L'équation de conservation d'un soluté en phase solide peut s'écrire comme suit :

$$\partial(\rho b \bar{w})/\partial t = \rho b Rfs - \lambda \rho b \bar{w} \quad [3]$$

où $\bar{w}$ est la fraction de masse du soluté en phase solide.

A l'équilibre, les concentrations en phases liquides et solides sont liées par un coefficient :

$$\bar{W} = Kd \rho W \quad [4]$$

avec :

Kd : coefficient d'équilibre (m^3/kg).

En combinant les trois dernières équations, on obtient l'équation finale de conservation du soluté :

$$\partial/\partial t (\epsilon + \rho b kd) \rho w = \nabla \cdot \epsilon \rho [D_s + D_m] \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho v w - \lambda (\epsilon + \rho b kd) \rho w + q\rho^* w^* \quad [5]$$

Cette équation exprime la variation d'un soluté en phase fluide en fonction du flux dispersif et diffusif, du flux advectif, du taux d'injection et du taux de transformation du fluide.

L'équation est écrite pour une unité de volume de la phase fluide et solide, soit pour une unité de volume d'un milieu poreux. Le soluté est injecté dans le système à une concentration W^* et une densité ρ^* par une source fluide. Ce soluté est récupéré avec une concentration W et une densité ρ [10].

7.2.2 Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales utilisées concernent la répartition piézométrique et de salinité de l'aquifère pour l'année 1988 (fig. 2 et 3). La limite de la sebkha est considérée comme une limite à salinité imposée à 39 g/l et à potentiel imposé, variable en fonction de la hauteur de remplissage.

7.2.3 Maillage

La zone simulée est limitée par la mer des côtés nord et est. Elle s'étend sur 4 km à partir de la sebkha des côtés sud et ouest, couvrant une superficie de 304 km^2 et ayant une épaisseur de 60 m : de + 30 m à - 30 m par rapport au zéro marin (fig. 4).

Le maillage est constitué par 1 560 mailles de dimensions 1 km $\times$ 1 km $\times$ 10 m.

Le calage du modèle a été effectué en utilisant des pas de temps et d'espace choisis de manière à satisfaire les critères de convergence numérique définis par Kenneth [10].

Pour tenir compte de l'hétérogénéité du milieu, le domaine est subdivisé en plusieurs milieux poreux avec des porosités variant de 25 à 35 % et des perméabilités qui varient de 10^{-4} à 10^{-7} m/s. Ces valeurs correspondent à des moyennes de mesures in situ [8].

7.2.4 Bilan des flux

Les flux échangés par l'aquifère correspondent aux eaux d'infiltration pluviales, aux eaux sortant par la sebkha, aux puits d'exploitation, à l'alimentation artificielle de la nappe phréatique, aux flux de l'irrigation par les eaux usées et enfin à l'eau salée entrant dans l'aquifère après la création du lac intérieur.

La pluviométrie dans cette région est estimée à 360 mm/an. Le flux d'infiltration touche les mailles de surface dans la zone de recharge à l'Est de Moknine et aux alentours de la dépression de Moknine.

L'alimentation artificielle de la nappe phréatique dans la région de Teboulba a été effectuée de juillet 1992 à juillet 1994, l'estimation approximative du volume total infiltré est de 0,68 Mm^3 .

Les eaux usées rejetées à la dépression après épuration proviennent de Moknine, de Ksar Hellel, Bekalta et Teboulba. Ces eaux sont constituées de près de 50% des rejets industriels.

2. Carte piézométrique de l'année 1988 (état initial).

3. Carte de salinité (g/l) de l'année 1988 (état initial).

4. Maillage adopté pour la simulation de l'aquifère.

Une station d'épuration a été réalisée pour contribuer à la protection de la dépression contre la pollution des eaux usées. Cette station fonctionne par le procédé de lagunage. Ses capacités maximales sont de 6 400 m³/j avec 3 000 kg de DBO₅/j (demande biologique d'oxygène). L'exploitation actuelle permet de traiter 3 300 m³/j soit 1 150 000 m³/an, avec un taux de DBO₅ correspondant de 2 100 kg/j. Les eaux traitées dans la région de Moknine qui ont atteint la nappe sont estimées à 0,27 Mm³ pour la période 1992/1994.

La dépression de Moknine est un exutoire naturel de la nappe phréatique. Le flux d'eau sortant par la Sebkha intéresse les mailles de son périmètre intérieur, en contact total ou partiel de la nappe phréatique.

Le flux sortant est calculé en fonction de la piézométrie, par l'application de la formule déduite de la loi de Darcy

$$Q = K.S.i$$

où :

K : perméabilité.

S : section mouillée de la maille correspondante.

i : gradient hydraulique.

Flux des puits d'exploitation

Il y aurait au total 750 puits environ dans la région de Moknine dont 350 seraient utilisés pour l'irrigation de cultures maraîchères et d'arbres fruitiers. 220 puits environ seraient exclusivement à usage domestique ou industriel et utilisés dans les huileries au moment de la récolte d'olives. Il y aurait donc environ 75 % des puits utilisés. Les puits abandonnés sont nombreux (25 % dont 5 % sont à sec). D'autres étaient exploités pour l'alimentation en eau des villages et sont actuellement délaissés. Les puits utilisés pour l'irrigation sont concentrés dans la partie Nord de la région, entre Moknine et Teboulba. Dans ce secteur il y a une surexploitation estimée à 1,5.10⁶ m³/an [1].

Flux résultant de l'entrée des eaux de remplissage du lac

La simulation de l'arrivée des eaux marines est réalisée par le calcul d'un flux d'eau marine qui s'infiltre dans l'aquifère au niveau du périmètre de la sebkha. Les valeurs de ce flux varient en fonction de l'épaisseur de la lame d'eau dans la sebkha qui agit directement sur le gradient hydraulique. Plus la hauteur de l'eau salée dans la Sebkha est grande, plus l'intrusion de cette eau dans l'aquifère est importante. On calcule ce flux pour chaque hauteur simulée en utilisant l'équation précédente (tabl. 1). Ce flux est exclusivement transmis à travers les berges de la dépression ; le fond de cette dernière correspond au toit de l'aquifère sous-jacent.

Tableau 1. — Flux d'eau marine entrant dans l'aquifère.

Hauteur d'eau salée (m)	Flux total entrant (m ³ /m ² s)
5	$2,4 \times 10^{-8}$
6	$4,5 \times 10^{-8}$
7	10^{-7}
8	2×10^{-7}
9	10^{-6}

7.3 Résultats de simulations

7.3.1 Phase avant remplissage

La première étape est une simulation du comportement du système aquifère avant le remplissage de la sebkha par l'eau de mer.

L'objectif de cette étape est de caler la piézométrie et la salinité avant de commencer la simulation de l'arrivée des eaux marines dans la dépression. Cette dernière opération aura comme objectif le suivi et la prédiction du comportement de la nappe phréatique, et en particulier l'évolution de la piézométrie et de la salinité, en imposant l'arrivée de l'eau marine dans la dépression. Ce comportement est fonction du temps et de la hauteur d'eau de mer dans le lac artificiel. La période simulée de 1988 jusqu'à 1994 a pour principal objectif le calage de la piézométrie en restituant les cartes piézométriques des années 1988 et 1994 d'une part et la répartition de la salinité dans l'aquifère étudié en restituant la carte de salinité de 1988 d'autre part.

Evolution de la piézométrie

La carte des niveaux piézométriques de l'année 1988 (fig. 2) est considérée comme document de base qui donne la répartition initiale de la piézométrie. Cette carte résulte de l'utilisation des données disponibles. Elle a servi pour le calage des paramètres de simulation tels que les coefficients de dispersion longitudinale et transversale, la perméabilité, la porosité, etc... La piézométrie de la nappe varie de -20 m au Nord de la Sebkha à 35 m vers le Sud-Ouest. L'écoulement converge vers la Sebkha et vers la dépression de Teboulba. Le déversement du côté est se fait dans la direction de la mer. La simulation de la nappe durant la période allant de 1988 jusqu'à 1994, en tenant compte des flux entrants (infiltration de l'eau de pluie, irrigation par les eaux usées, alimentation artificielle de la nappe) et des flux sortants (débit d'exploitation, débit à l'exutoire...) a permis d'établir la carte piézométrique de 1994 (fig. 5a). Cette carte, résultant

5a. Carte du calage de la piézométrie pour l'année 1994.

5b. Carte piézométrique de 1994 [8].

de la simulation par HST3D est assez comparable à la carte retrouvée par un inventaire de puits (Ben Nejma, 1995) (fig. 5b).

Un changement de la piézométrie par rapport à celle de 1988 est observé. En effet, les deux dépressions majeures semblent se différencier : zones de Teboulba et Bekalta. A l'Est de la sebkha, une diminution de la piézométrie est soulignée : le niveau chute de +6 m à +2 m. Cela est dû à une exploitation intense et non compensée de la nappe dans cette zone.

Evolution de la salinité

La répartition des salinités de la nappe en 1988 (fig. 3) présente un gradient croissant vers la dépression de Moknine. Les valeurs de salinité des eaux de la nappe varient de 1,5 à 5 g/l avec parfois un dépassement de ces valeurs extrêmes dans un sens ou dans l'autre.

Des valeurs maximales supérieures à 5 g/l aux alentours immédiats de la sebkha, en particulier à l'Ouest, sont observées.

Les valeurs les plus faibles (< 1,5 g/l) se situent dans les régions avec une exploitation intense.

La répartition de la salinité en 1994 (fig. 6) est assez comparable à la carte précédente avec des valeurs inférieures à 1,5 g/l jusqu'à des valeurs supérieures à 5 g/l.

7.3.2 Phase post remplissage : simulation prévisionnelle

Evolution de la piézométrie

On considère que 5 m est la hauteur d'eau minimale dans la

sebkha, nécessaire pour la création d'une mer intérieure. La hauteur 9 m est considérée comme limite supérieure pour le remplissage de la sebkha et ce pour préserver une dénivellation d'au moins 1 m (la profondeur moyenne de la sebkha est de -10 m par rapport à la mer).

Partant de ces hypothèses, les simulations sont effectuées pour des hauteurs d'eau constantes dans la sebkha variant de 5 à 9 m. L'utilisation de lames d'eau salée constantes ayant des concentrations invariables résulte de la difficulté de suivre l'évolution de la concentration de l'eau du lac en fonction de l'évaporation.

Les figures 7a, b, c montrent l'évolution prévisionnelle de la piézométrie des années 1998, 2001 et 2006 : 2 ans, 5 ans et 10 ans après le début de la phase remplissage pour une hypothèse de remplissage de 5 m.

Deux ans après la création du lac (fig. 7a), une évolution de la piézométrie est observée. En effet, en considérant la Sebkha comme partie intégrante de l'aquifère, nous notons la disparition de la dépression piézométrique à l'intérieur de la Sebkha, compensée par une élévation du niveau piézométrique (allant jusqu'à -5 m). Cette élévation correspond à la hauteur d'eau de mer dans la sebkha. Cette élévation de la piézométrie à l'intérieur de la sebkha entraîne une variation de la piézométrie tout autour.

Même si la Sebkha continue à jouer le rôle d'exutoire naturel à la nappe phréatique, le débit de l'eau qui sort à travers elle diminue considérablement à cause de l'effet de l'eau qui occupe le fond de la Sebkha et qui entraîne une diminution du gradient hydraulique. En outre, l'eau marine emprisonnée dans la sebkha peut s'infiltrer vers les zones où on note un abaissement du niveau piézométrique. Le déversement peut se faire de la Sebkha (eau marine) vers la dépression piézométrique de Teboulba, d'autant plus que le

6. Carte simulée de répartition de la salinité (g/l) des eaux souterraines de 1994.

7. Evolution de la piézométrie de la nappe suite à la création du lac pour une hauteur de la lame d'eau de 5 m.

niveau piézométrique y est de plus en plus bas, à cause de l'exploitation intense dans cette zone.

La carte prévisionnelle de la piézométrie de l'an 2001 (fig. 7b) représente la même allure générale que celle de l'année 1998 sauf qu'on note un changement de la forme lozongique de la dépression piézométrique de Teboulba qui devient d'une forme ovale concentrique à cause de l'effet de l'infiltration progressive de l'eau à partir de la Sebkhia vers la région urbaine de Teboulba. Une légère remontée de la piézométrie autour de la sebkhia est également observée (l'isopièze -4 se rapproche de la Sebkhia).

La carte prévisionnelle de la piézométrie pour l'an 2006 (fig. 7c) ne présente pas un grand changement, toutefois l'augmentation de la piézométrie autour de la Sebkhia est plus marquée. La piézométrie semble se stabiliser. Le flux sortant par la sebkhia et le débit négatif des puits de pompage semblent être équilibrés par l'infiltration dans la nappe de l'eau de mer (surtout vers le Nord), et de l'eau de pluie.

Le remplissage du lac d'une lame d'eau de hauteur 9 m provoque une augmentation générale du niveau d'eau. 10 ans après la réalisation du projet (fig. 8), une élévation de la piézométrie est observée à l'ouest de la sebkhia. Au Nord de la dépression de Moknine, la piézométrie est toujours basse. A ce stade, l'état de la nappe se stabilise. Les sorties de l'eau du système sont compensées par les différents flux entrants.

Evolution de la salinité

Les simulations numériques ont permis la prédiction de l'évolution de la salinité dans la nappe phréatique. Les figures 9.1 et 9.2 traduisent la variation de la salinité au voisinage immédiat de la sebkhia et dans la nappe phréatique de Teboulba en fonction du temps et de la hauteur de remplissage. Pour une hauteur minimale de 5 m, l'effet de l'intrusion de l'eau marine dans les alentours de la sebkhia est clair. En effet, une nette augmentation de la salinité dans la nappe est observée. Elle peut atteindre 7 g/l au bout de 2 ans et dépasser 10 g/l après 10 ans. Cette augmentation est moins remarquée dans la nappe de Teboulba. Plus la hauteur de la

8. Carte piézométrique après 10 ans de remplissage avec une hauteur de 9 m.

9.1. Evolution de la salinité au voisinage immédiat de la sebkha.

9.2. Evolution de la salinité dans la nappe phréatique de Teboulba.

lame d'eau dans la sebkha est importante, plus la diffusion de cette eau dans la nappe est rapide. Une hauteur de 8 m provoque des valeurs de l'ordre de 5 g/l dans la nappe phréatique de Teboulba. L'effet d'intrusion de cette dernière est très marqué à ce niveau. Une hauteur maximale de 9 m provoque immédiatement l'envahissement des eaux de la nappe phréatique par l'eau de mer, représenté par des charges trop importantes (39 g/l). L'écoulement de la sebkha vers la nappe se fait d'une façon rapide et irréversible. Concernant la nappe de Teboulba, la hauteur de 9 m a une influence aussi irréversible mais plus progressive. En effet, la contamination totale ne se fait qu'au bout de 10 ans. Les simulations numériques ont également permis de suivre l'évolution de l'intrusion marine latérale (fig. 10).

Les zones contaminées par l'eau salée s'élargissent en fonction de la hauteur de l'eau dans le lac. Ces zones se situent au Nord-Ouest de la sebkha pour des hauteurs de 5 m, atteignent le SW pour des hauteurs de 6 m. 7 m d'eau dans la sebkha provoquent la contamination du contour total sauf la zone SE. 9 m causent une infiltration totale par chaque côté vers la nappe.

L'hydrodynamisme de la nappe obéit à ces trois phases :

— Phase 1 : avant le remplissage de la sebkha par l'eau marine, la dépression constitue l'exutoire naturel de la nappe phréatique.

— Phase 2 : au cours du remplissage, il s'établit un certain équilibre entre la nappe et la sebkha. L'infiltration se fait dans les deux sens.

— Phase 3 : au cours et après le remplissage. Le sens de l'écoulement s'inverse complètement et le déversement se fait à partir de la sebkha vers la nappe provoquant ainsi une modification de la qualité de l'eau souterraine.

VIII ■ CONCLUSION

Les simulations ont montré qu'à diverses hauteurs de la lame d'eau dans le lac artificiel, la salinité varie dans l'aquifère et qu'il existe un risque évident de l'intrusion de l'eau marine dans la nappe phréatique. Même une hauteur d'eau

minimale de 5 m menace sérieusement la qualité des eaux souterraines. Le calcul des flux entrant dans l'aquifère révèle l'élargissement des zones par où se fait l'infiltration. La création d'un lac artificiel dans la sebkha de Moknine est un projet ambitieux, à retombées économiques sûres. Toutefois, sa réalisation dans l'immédiat est risqué vu l'état actuel de la nappe et l'abaissement dangereux du niveau piézométrique qui pourrait guider l'eau salée à l'intérieur de l'aquifère. Le champ de données étant limité, l'estimation de quelques paramètres peut induire une surestimation du risque de

10. Répartition des zones envahies par l'eau salée en fonction de la hauteur de la lame d'eau dans le lac.

contamination (tels que les valeurs de dispersivité, de porosité...). On admet toutefois que le risque de contamination est réel, même à court terme. La seule solution valable dans le cas de réalisation de ce projet semble de remédier à l'état actuel de l'aquifère en accentuant l'alimentation artificielle et en optimisant la hauteur maximale de la lame d'eau dans le lac. Cela pourrait faire l'objet d'une simulation en tenant compte de certains paramètres : agir sur la perméabilité du terrain par ajout de matériaux par exemple.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AMRI R. (1990). — Note sur les ressources et l'exploitation des nappes phréatiques de Monastir, entité hydrologique de Monastir. Rapport interne. DRE Monastir.
- [2] GAALLOUL-ANNOUN N., TAYECH-MANAI B. et GARGOURI-RAZ-GALLAH S. (1987). — Etude palynologique du Néogène de Zéramdine (Sahel Tunisien). P.I.C.G. UNESCO N° 210. Société Géologique Africaine. Sédiments continentaux d'Afrique. Marrakech, Maroc, 19-26 septembre 1987.
- [3] KAMMOUN Y. (1981a). — Etude néotectonique dans la région Monastir-Mahdia (Tunisie orientale), Thèse de doctorat de troisième cycle. Académie de Paris, Université de Paris IX, centre Orsay, 175 p.
- [4] BURROLET P.F. (1956). — Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale. *Annales des mines et la géologie. Tunisie N° 18*.
- [5] KAMMOUN Y. (1981b). — Néotectonique dans le domaine du Sahel (Tunisie orientale). Actes du premier congrès national des sciences de la terre. Tunis, septembre 1981, pp. 423-432.
- [6] BEDIR M. (1988). — Géodynamique des bassins sédimentaires du Sahel de Mahdia (Tunisie orientale) de l'aptien à l'actuel. Sismographie, sismotectonique et structurale, perspectives pétrolières, hydrologiques et sismiques. *Revue des sciences de la terre*, vol. 9. INRST, Tunis. 242 p.
- [7] BEDIR M. et ZARGOUNI F. (1986). — Structuration post-Miocène du Sahel de Mahdia. Analyse géométrique et cinématique des données de sub-surface. *Revue des sciences de la terre*, vol. 4, INRST. Tunis. pp. 55-69.
- [8] BEN NEJMA J. (1995). — Etude de l'environnement hydrogéologique de la sebkha de Moknine. Mémoire de fin d'études. ENIS, Sfax.
- [9] AMRI R. (1988). — Note sur les ressources et l'exploitation des nappes phréatiques de Monastir. Rapport interne. DRE Monastir.
- [10] KENNETH L. (1990). — HST-3D HEAT AND Solute transport in three dimensional groundwater flow systems. US Geological Survey. Denver. 515 p.