

Mise en évidence de l'intrusion marine de la nappe d'El Jadida, Maroc

ABDELKADER YOUNSI

*Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement et celui de Géologie Appliquée,
Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali, B.P. 20, 24 000 El Jadida,
Maroc*

ELKBIR LHADI

*Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement, Faculté des Sciences, B.P. 20,
24 000 El Jadida, Maroc*

JACKY MANIA

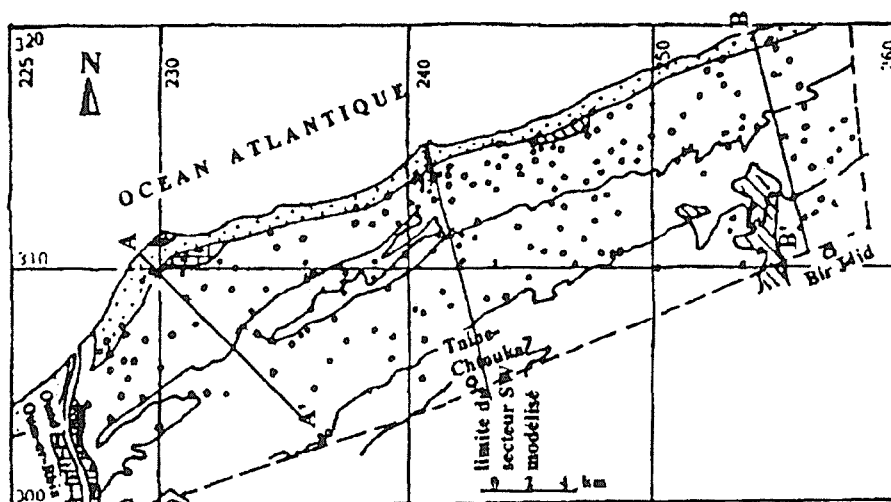
*Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Faculté de Franche-Comté,
1, P^{ce} Leclerc, 25000 Besançon, France*

Résumé La piézométrie et l'hydrochimie de la nappe d'eau douce située entre l'oued Oum-er-Rbia et Bir Jdid en bordure de la mer ont été suivies entre 1990 et 1993 sur 179 puits. Les résultats indiquent une intrusion marine de l'aquifère côtier en conséquence du déficit pluviométrique et des pompages intensifs. Les problèmes d'approvisionnement en eau de qualité acceptable pour l'irrigation des cultures maraîchères et pour l'alimentation de la population rurale sont importants car seule la ressource en eau souterraine est disponible pour cette région. Cette étude a permis d'identifier les secteurs vulnérables à l'intrusion marine, localisés le long du littoral surtout de la partie sud-ouest. La longueur de la pénétration du biseau d'eau salée vers les terres dépend de l'intensité des pluies efficaces et des pompages, de la perméabilité de l'aquifère, de l'épaisseur saturée et de la côte du substratum. Elle peut atteindre 2000 m.

INTRODUCTION

Les problèmes posés par l'exploitation d'un aquifère en zone littorale sont généralement délicats car ils associent la notion de quantité à celle de qualité (Ledoux, 1986). L'intensification des activités agricoles dans la région étudiée (50% des tomates exportées, proviennent de celle-ci) et l'essor démographique important ont conduit à une exploitation anarchique (plus de 3000 puits) d'un aquifère peu développé, hétérogène et en contact direct avec la mer (D.R.P.E, 1985; Younsi, 1994). Il existe par conséquent un danger d'avancée vers les terres du biseau d'eau salée, provoquant dans certains endroits, un changement du sens d'écoulement souterrain (Fakir, 1991). Des valeurs de 3 à 4 ms cm⁻¹ de conductivité électrique, de 1000 à 3000 mg l⁻¹ en chlorures et de 500 à 1000 mg l⁻¹ en sodium ne sont pas exceptionnelles dans cet aquifère qui constitue la seule ressource en eau pour l'irrigation et pour l'alimentation de la population rurale.

Le but recherché par cette étude est de caractériser la pollution saline, d'identifier les secteurs vulnérables à l'intrusion marine et de mettre en évidence les facteurs déterminants dans le mécanisme de salure et les moyens de lutte contre l'invasion marine.



Légende géologique (GIGOUT et col.1949;FERRE et col.1975)

- Dunes et plages modernes
- Pliocène:
- Limons rouges, dunes consolidées, calcaires gréseux marins et dunaires
- Crétacé:
- Calcaires et marno-calcaires du Cénomanien
- Argiles et calcaires de Crétacé inférieur
- Primaire:
- Schistes et quartzites
- Limite de la région étudiée

Fig. 1 Site d'étude et réseau de mesures. ● puits échantillonné, +: puits témoins, A— A': alignement de puits.

Situation géographique et climat

La région étudiée fait partie d'une série de plaines de la Méséta côtière marocaine au bord de l'Atlantique, d'environ 8 km de large et longue de près de 33 km (Fig. 1). Elle est limitée par l'oued Oum-er-Rbia au sud-ouest, par l'océan atlantique au nord et par Bir Jdid au nord-est.

Une étude statistique des données climatologiques de 1977 à 1992, fournies par la station météorologique d'El Jadida, indique une précipitation annuelle moyenne de 375 mm. Une certaine irrégularité interannuelle a été constatée avec un déficit important de 57 mm de la lame moyenne pendant l'année 1992 qui a fait l'objet de suivis piézométriques et hydrochimiques. La recharge efficace estimée à partir des relations théoriques de Turc et de Thornthwaite, est d'environ 56 mm en moyenne, soit 15% de la pluviométrie totale.

HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

Description des réservoirs aquifères

La zone étudiée se caractérise par un système aquifère peu développé et hétérogène (Bentayeb, 1972). Les eaux circulent selon les secteurs, soit dans:

- le réservoir plioquaternaire qui est marqué par un faciès grésocalcaire dunaire. Sa mise en exploitation présente un intérêt primordial pour la région, surtout dans les secteurs côtiers de celle-ci et dans la partie orientale. Cela est dû à sa porosité de 17% en moyenne, sa perméabilité d'en moyenne 10^{-3} m s^{-1} et à sa faible profondeur d'exploitation (5 à 10 m);
- les marno-calcaires du Crétacé qui viennent s'intercaler entre le recouvrement plioquaternaire et le substratum schisto-quartzique paléozoïque dans la zone centrale située entre l'oued Oum-er-Rbia et Tnine Chtouka. Ils se caractérisent par une perméabilité et une transmissivité faibles.

Le substratum de l'aquifère est constitué par le socle primaire imperméable dont la pente dirigée vers la mer est de 1 à 3%. Depuis l'étude géophysique de Bentayeb (1972), les informations nouvelles restent insuffisantes pour dresser une carte du toit du substratum schisto-quartzique de la nappe si bien que le toit de celui-ci ne correspond pas nécessairement au toit des schistes du fait que ces derniers présentent une frange supérieure altérée. En 1985, la D.R.P.E a pu dresser une carte du toit du substratum permettant de constater que l'épaisseur des terrains plioquaternaires varie d'un endroit à un autre, en fonction de la topographie du socle paléozoïque plissé et ondulé.

Alimentation et exploitation

Sachant que l'entrée à l'amont est limitée à cause de la remontée vers la surface du substratum primaire, l'alimentation de l'aquifère se fait principalement par les précipitations efficaces. Tout déficit pluvial se répercute sur la recharge de la nappe, fortement exploitée surtout pendant la saison d'étiage et à proximité de la mer.

Piézométrie

Le grand nombre de puits implantés dans la région étudiée, a conduit à la sélection de 179 points d'observation de la nappe selon un maillage kilométrique (Fig. 1). L'évolution piézométrique est illustrée par trois cartes dont deux ont été dressées en période de hautes eaux (mars 1992 et mars 1993) et une carte en période de basses eaux (septembre 1992). L'écoulement général de la nappe est orienté SE-NW (Fig. 2) apparemment uniforme vers l'océan, sauf dans la partie sud-ouest où une ligne de partage des eaux sépare les eaux s'écoulant vers l'océan de celles allant vers l'oued. Le gradient hydraulique est inférieur à 0,7% dans la partie sud-ouest (présence de terrains marno-calcaires peu perméables) et entre la mer et l'isopièze 30 m et à l'amont (exploitation modérée). Entre les isopièzes 40 et 80 m (terrains plioquaternaires épais), les gradients sont plus élevés allant de 1 à 2%.

L'existence de l'isopièze 0 mètre à l'intérieur de la plaine, fait de ces secteurs des zones vulnérables à l'intrusion marine. La comparaison des piézométries de mars et de septembre 1992 montre une avancée vers les terres des isopièzes pour cette année déficitaire en pluies. Cet abaissement piézométrique accentué par une exploitation intensive de l'aquifère dans les secteurs côtiers peut engendrer une avancée vers la plaine de l'interface eau douce-eau salée. Celui-ci peut atteindre dans certains endroits le fond des puits et même entraîner un changement du sens d'écoulement (Mania *et al.*, 1985; Gourgand *et al.*, 1988).

Dans ces secteurs vulnérables à l'intrusion marine, nous avons suivi l'évolution de la conductivité électrique (C.E.) en fonction du pompage. La C.E. est passée de 6 à 6,43

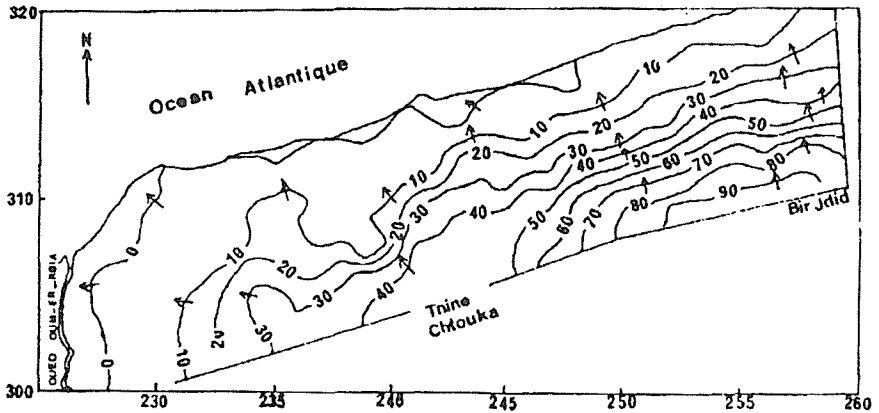


Fig. 2 Carte piézométrique de septembre 1992 avec isopièzes en m au-dessus du niveau de la mer et sens d'écoulement.

ms cm^{-1} pendant toute la durée d'un pompage d'essai de 5 h et demi avec un débit de $7,5 \text{ l s}^{-1}$. Ceci semble montrer que l'exploitation intensive de la nappe à proximité de l'océan, pourrait diminuer l'écoulement souterrain et provoquerait une remontée de l'interface eau douce-eau salée sous le puits de sorte que les eaux de plus en plus salées pénètrent dans les ouvrages.

Pour examiner l'effet des marées sur le comportement du biseau d'eau salée, nous avons suivi pendant 24 h l'évolution du niveau de la nappe d'un alignement de 5 puits témoins (Fig. 1) crépinés dans le Plioquaternaire, avec un échantillonnage horaire. Les résultats consignés dans le tableau 1, montrent que le niveau de la nappe a varié dans tous les puits, avec une amplitude maximale de variations pour les puits 3 et 4. Ces variations sont périodiques avec deux maxima et deux minima correspondant aux marées avec un certain déphasage (Fakir, 1991; Younsi, 1994). La communication hydraulique eau douce-eau salée est incontestable pour ces puits, vulnérables à l'intrusion marine. La pénétration à l'intérieur des terres, du biseau d'eau salée pourrait atteindre 1500 m.

Tableau 1 Amplitude des variations maximales des niveaux de la nappe, des températures et des conductivités électriques en fonction de la distance par rapport à la mer.

Puits	Position		Distance à la mer (m)	Amplitude maximale des variations		
	X km	Y km		Niveau nappe (m)	T °C	C.E. mS cm^{-1}
1	242.7	315.2	380	2	1.90	0.80
2	242.4	315.1	591	2	1.70	0.50
3	241.7	314.2	1102	9	2.80	0.47
4	241.9	314.1	1282	9	2.40	0.21
5	242.3	314.9	1534	4	2.60	0.31

ETUDE CHIMIQUE

Les 179 puits ont été échantillonnés et analysés mensuellement d'octobre 1991 à septembre 1992 (C.E., pH, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) complétant d'autres mesures de début 1991 et de 1993.

Mise en évidence de l'intrusion marine d'après les cartes chimiques

La répartition dans l'espace de la C.E. montre que les zones les plus chargées en sels, surtout NaCl, sont les secteurs côtiers de toute la région et la partie située au nord-est de Tnine Chtouka (C.E. > 3,5 mS cm^{-1}). Des teneurs de 1000 à 3000 de Cl^- en $mg\ l^{-1}$ et de 500 à 1000 de Na^+ en $mg\ l^{-1}$ sont fréquentes. L'accroissement des valeurs de C.E., Cl^- et Na^+ est dirigé vers la mer et présente un resserrement marqué des courbes d'isovaleurs sur les deux kilomètres du bord de la mer.

Deux alignements de puits orthogonaux au rivage marin (Fig. 1), AA' (7 puits) et BB' (8 puits), ont été choisis. Fig. 3 montre l'évolution des moyennes annuelles des C.E. en fonction de la distance par rapport à la mer. La C.E., correspondant surtout à NaCl, augmente de façon très importante dans les deux premiers kilomètres, dénotant ainsi une intrusion marine dont l'importance dépend de l'altitude près des côtes (Stieltjes, 1988).

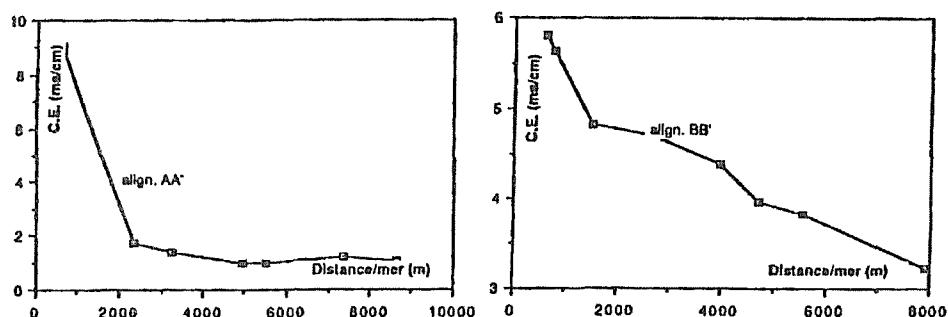


Fig. 3 Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance par rapport à la mer.

Effets des marées

Les données du tableau 1 montrent également que l'amplitude maximale de variations des C.E. augmente en se rapprochant de l'océan. Ces variations sont périodiques avec deux valeurs maximales et deux minimales de C.E. suivant les marées avec un certain décalage. Lors de la marée haute avec l'élévation du niveau de la nappe dans les puits, la C.E. augmente et inversement à marée basse.

Simulation mathématique

Le modèle hydrodynamique et hydrodispersif "A.S.M" (Aquifer Simulation Model) de Kinzelbach & Rausch (1990) a été utilisé. Il résout les équations par la méthode des différences finies.

Après avoir introduit les paramètres hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques de la nappe, le calage du modèle en régime transitoire a permis de simuler le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère pour différents scénarios d'exploitation. Les résultats du bilan hydrochimique issu du modèle, comportent à la fois les débits issus de la mer, les teneurs en chlorures des eaux souterraines et les flux de concentration. Les débits des entrées par la limite océanique sont de $0,328 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et montrent une corrélation positive avec les concentrations en Cl^- et les flux de chlorure (Fig. 4). Les chlorures passent de $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ pour les mailles à débits nuls à un maximum de $17,5 \text{ g l}^{-1}$ pour les mailles situées à moins de 250 m du rivage où l'on observe un débit maximal de 17 l s^{-1} par maille. Ce qui engendre des flux de concentration variant de 0 à 285 g s^{-1} par maille, avec un flux global pour tout le secteur modélisé de l'ordre de 4 kg s^{-1} .

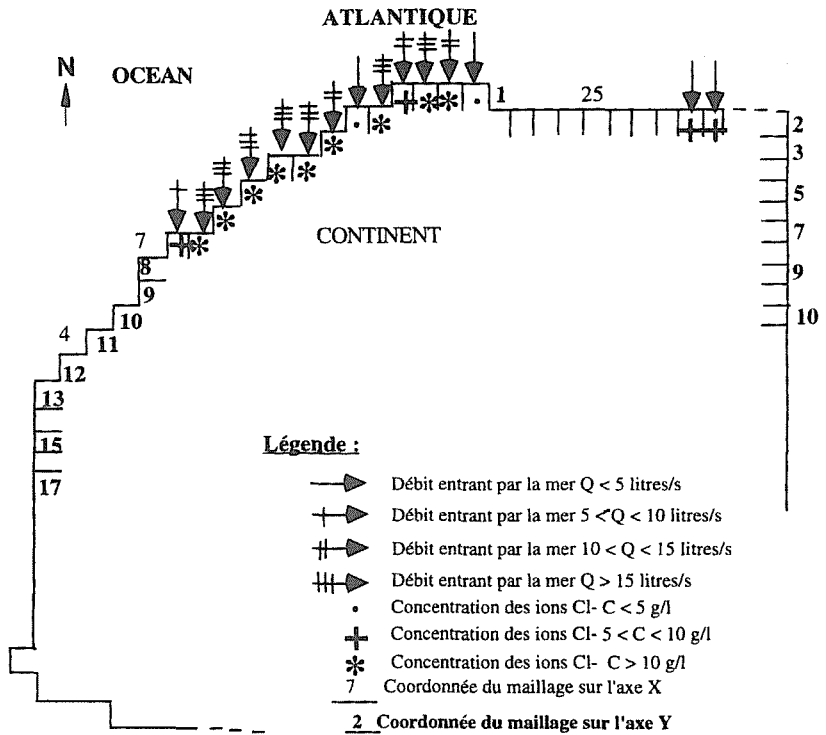


Fig. 4 Schéma montrant les débits entrant par la mer et les concentrations en chlorures calculés sur les mailles aux limites du modèle.

Les simulations pour différents scénarios d'aménagement (multiplication des pompages) révèle que les rabattements piézométriques simulés et le déficit du bilan des entrées et des sorties augmentent. A titre d'exemple, l'évolution piézométrique de deux de trois mailles de contrôle, localisées à l'amont et à l'aval du secteur modélisé, a montré des rabattements de 6 à 7 m. Elle montre également que la qualité physico-chimique des eaux souterraines surtout dans les secteurs sensibles aux invasions marines, se

dégrade de plus en plus avec l'augmentation des débits d'exploitation de la nappe. En effet, la salinité des eaux pompées montre une corrélation positive et importante avec l'intensité des pompages au cours du temps. Des terres autrefois fertiles et irriguées, sont actuellement abandonnées à cause de la qualité des eaux des puits qui est impropre à la consommation et à l'irrigation.

CONCLUSION

Les secteurs côtiers de la région étudiée surtout ceux de la partie sud-ouest, sont les plus sensibles aux intrusions marines qui sont favorisées par:

- perméabilités en général importantes des calcaires gréseux du Plioquaternaire;
- gradients hydrauliques faibles;
- existence de l'isopièze 0 mètre à l'intérieur des terres;
- pompages intensifs et fréquents dans l'aquifère côtier.

Toutes ces données semblent provoquer une diminution du débit total de l'aquifère vers l'océan et une augmentation de la portée du biseau d'eau salée à l'intérieur de la plaine, variant entre 1000 et 2000 m environ.

Cette étude a mis en évidence l'intrusion marine provoquée par une trop grande exploitation de l'aquifère au voisinage de la mer. D'autres facteurs tels que le déficit pluviométrique, la perméabilité de l'aquifère et l'affaissement du toit du substratum sous le 0 marin déterminent aussi l'évolution spatio-temporelle du biseau d'eau salée par rapport à la nappe d'eau douce.

La simulation mathématique des différents scénarios d'exploitation a révélé qu'au fur et à mesure que l'on intensifie les débits de captages, l'abaissement piézométrique augmente et la qualité des eaux se dégrade. La simulation du transport du chlorure a révélé des pénétrations importantes des eaux salées à l'intérieur du système aquifère surtout dans les secteurs côtiers. Cette pénétration sensible du biseau d'eau salée à l'intérieur des terres, indique une extrême vulnérabilité des captages existants.

Ces résultats posent le problème de la qualité des eaux souterraines étudiées et nous mettent en garde quant à leur préservation. Pour palier au problème d'intrusion marine, il faut:

- mettre en oeuvre des techniques de recharge artificielle de l'aquifère;
- arrêter le creusement de nouveaux puits et modérer l'exploitation dans les secteurs vulnérables aux intrusions marines;
- irriguer par le système goutte à goutte.

REFERENCES

- Bentayeb, A. (1972) Etude hydrogéologique de la Chaouia côtière avec essais de simulation mathématique en régime permanent (Maroc). Th. 3^e Cycle. USTL, Montpellier.
- D.R.P.E. (1985) Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins de Sebou, Bou Regreg et Oum-er-Rbia. Direction de Planification et de Recherche des Eaux, Rabat.
- Fakir, Y. (1991) Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des aquifères côtiers du Sahel de Safi à Oualidia (Méséta côtière, Maroc). Th. 3^e Cycle, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech.
- Gourgand, B., Stieldjes, L. & Daessle, M. (1988) Ile de la Réunion: exploitation des eaux souterraines. *Hydrog.* 2, 117-123.

- Kinzelbach, W. & Rausch, R. (1990) Aquifer simulation model "ASM". Documentation, Version 2.0 Intern., Ground Water Model Center, The Netherlands.
- Ledoux, E. (1986) Modèles mathématiques en hydrogéologie. Centre Inform. Géol., Ecole Nat. Mines, Paris.
- Mania, J., Imezoukene, S. & Braillon, J.M. (1985) Pollution saline de la nappe côtière à l'Est d'Alger. *Hydrog.* 3, 213-226.
- Stieldjes, L. (1988) Hydrogéologie de l'île volcanique océanique de Mayotte. *Hydrog.* 2, 135-151.
- Younsi, A. (1994) Etude des mécanismes des intrusions marines vers le système aquifère côtier compris entre oued Oum-er-Rbia et Bir Jdid (Province d'El Jadida, Maroc): Hydrogéologie, Hydrodynamique, Hydrochimie et Modélisation mathématique. Th. 3^e Cycle, Fac. Sci. El Jadida.