



ÉTUDE DE L'INTRUSION MARINE DANS LES AQUIFERES COTIERS ET SES REPERCUSSIONS SUR LA DEGRADATION DES SOLS PAR L'UTILISATION D'UNE APPROCHE MULTIDISCIPLINAIRE

STUDY OF MARINE INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS AND ITS REPERCUSSIONS ON THE LAND DEGRADATION BY THE USE OF A MULTIDISCIPLINARY APPROACH

MORSLI B.¹, HABI M.², BOUCHEKARA B.²

¹Institut National de la Recherche Forestière (INRF), Unité Érosion et Désertification,
Tlemcen, Algérie

²Université de Tlemcen, Faculté de l'Ingénieur, Tlemcen, Algérie

morsli_boutkhil@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Ce travail de recherche a été consacré à l'étude d'un problème d'actualité, à savoir la pollution des nappes phréatiques côtières par l'invasion des eaux marines qui s'accroît de plus en plus avec les changements climatiques et l'accroissement de la démographie et des besoins. Sur la nappe côtière d'Alger Est, caractérisée par une exploitation intensive et anarchique, nous avons essayé par une approche pluridisciplinaire, combinant plusieurs méthodes (piézométrique, chimique et géophysique) de mettre en évidence une intrusion marine et de déceler les zones sensibles à la pollution marine dans cette zone côtière et d'analyser les répercussions sur la dégradation des sols par l'utilisation des eaux d'irrigation polluées par la mer.

Les résultats obtenus par cette approche ont permis de mettre en évidence une invasion marine et de localiser différentes zones sensibles dans cet aquifère côtier. Les causes principales de ce phénomène sont dues principalement aux pompes intensives associées au déficit pluviométrique et à la nature lithologique des aquifères. Ces facteurs engendrent une perturbation au niveau de l'interface eau douce - eau salée et accentuent l'avancement des eaux marines vers le continent.

Mots clés : Intrusion marine - aquifère côtier - salinité - sol - Alger Est.

ABSTRACT

In this research work, we focus on an actuality problem which is the sea water intrusion in coastal aquifers which is increasingly becoming more acute by climate change and population growth. The research was conducted on the east Algiers valley. On the Algiers coastal aquifer, characterized by an intensive and anarchic exploitation, we tried by a multidisciplinary approach combining several methods (piezometric, chemical and geophysical) to identify a marine intrusion and to detect areas sensitive to marine pollution in this coastal zone and to analyze the implications for soil degradation through the use of water polluted by the sea for irrigation. This approach was very interesting to reveal sea water intrusion, to determine the salinity source and to identify risk zones. The sea water intrusion in coastal aquifers has also an effect on soil salinity, caused by an extensive use of aquifer. The monitoring of extraction and the control of drawdown are recommended.

Key words: *Sea water intrusion - Coastal aquifers– Salinity - Soil- Algeria.*

INTRODUCTION

Le phénomène d'invasion marine, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe située à proximité de la mer. Par ailleurs, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux.

En Algérie, ce problème s'est peu posé dans le passé mais durant les dernières années, on a décelé des salinisations des eaux des nappes côtières d'Annaba et d'Oran (phénomène analogue au niveau des sebkhas). L'exploitation intensive et anarchique des nappes par l'agriculture a créé localement des problèmes de pollution et de dégradation du sol. Ce phénomène s'est accentué avec les changements climatiques, la croissance démographique et surtout de l'augmentation de la densité des populations près des côtes. *Les densités près des côtes ne cessent d'augmenter* (UNESCO, 2006).

Ce problème de salinisation des aquifères littoraux et d'une grande importance pour toute zone côtière comme l'Algérie qui s'ouvre largement sur la mer Méditerranée (1200 km de côte) et dont les zones côtières constituent de grandes régions vivrières. Dans ces aquifères littoraux, on peut émettre l'hypothèse que la pollution des nappes (salinisation) est due à l'intrusion marine.

Dans la zone côtière d'Alger – Est (fig. 1), la nappe alluviale constitue la principale ressource à laquelle on fait appel tant pour l'irrigation (zone vouée à l'agriculture maraîchère) que pour les besoins industriels et d'adduction publique. Par suite des exploitations excessives, la nappe de ces zones côtières pourrait être ainsi atteinte par le phénomène d'intrusion marine. Une première prospection a déjà révélé l'existence de zones polluées très localisées. Cependant, pour mettre en évidence l'intrusion marine et analyser son effet sur la salinisation des sols, une étude était nécessaire. C'est dans cette optique que ce situe ce travail. L'objectif est de mettre en évidence l'intrusion marine et les facteurs déterminants, d'identifier les secteurs vulnérables et étudier les répercussions de l'utilisation de ces eaux sur la dégradation des sols.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude – nappe côtière d'Alger Est

METHODOLOGIE

Pour mettre en évidence l'intrusion marine et déceler les zones de pollution marine ainsi que les zones sensibles, nous avons adopté une approche pluridisciplinaire : étude piézométrique de la nappe (deux campagnes piézométriques ont été menées, bases eaux et hautes eaux sur une centaine de puits et forages) pour étudier les fluctuations de la nappe et le sens d'écoulement, étude chimique des eaux souterraines (deux campagnes

d'échantillonnage sur 50 points d'eau ont été réalisées, l'une en basses eaux, l'autre en hautes eaux, les analyses ont porté sur les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+), les anions (Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , HCO_3^- , NO_3^-), le résidu sec, le pH et la conductivité), étude hydrodynamique de l'aquifère (réalisation des pompages d'essai) et étude géophysique.

Pour déterminer les risques de salinisation des sols, différentes études ont été menées : étude des caractéristiques physiques et chimiques du sol, étude de la relation qui peut exister entre la salinité du sol et celle des eaux d'irrigation et étude des embruns marins qui peuvent apporter au sol situé à proximité de la mer une quantité en sels solubles non négligeable. Pour apprécier l'apport de ces embruns marins, nous avons placé des capsules sur différents endroits de la zone étudiée. Après 4 mois, nous avons recueilli ces capsules pour analyser les sels qui y sont déposés. Les ions dosés sont les chlorures et les sodiums.

RESULTATS ET DISCUSSION

Etude piézométrique

La nappe alluviale s'écoule vers la mer qui constitue son seul exutoire naturel. A cet écoulement naturel se superpose un autre écoulement vers les pompages. Le gradient hydraulique étant très faible à nul comme à Stamboul (ex Les Dunes), le contact eau douce- eau salée est situé assez loin de la côte. Les fluctuations saisonnières de la surface piézométrique ne dépassent pas généralement les 2,5m sauf dans quelques cas (fig. 2).

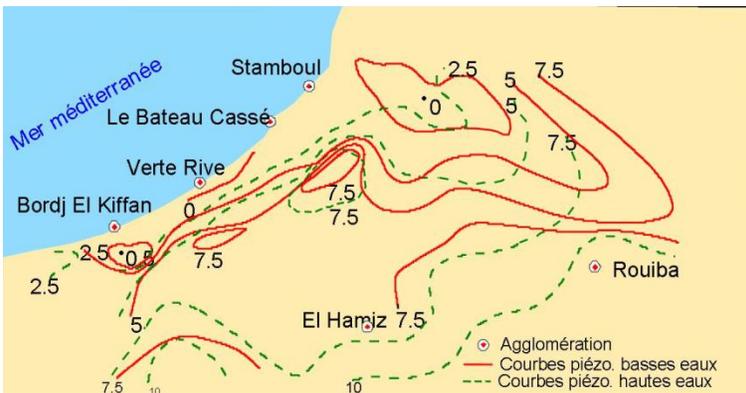


Figure 2 : carte piézométrique des basses et hautes eaux

Au bord de la mer où les fluctuations sont quasi nulles, la côte piézométrique est presque égale à celle de la mer et même moins à certains endroits, ce qui n'empêche pas l'eau de mer de pénétrer à l'intérieur des terres, selon les règles hydrodynamiques. Toute dépression même légère de la surface piézométrique peut se traduire, même si le niveau demeure au-dessus de la mer, par une élévation considérable de l'interface qui peut rapidement atteindre le fond du puits (fig. 3). Les pompages d'essai accompagné des prélèvements d'eau le long du rabattement (abaissement piézométrique) a montré une relation positive entre la salinité de l'eau et abaissement piézométrique ce qui révéla des pénétrations des eaux salées à l'intérieur du système aquifère comme le montre la figure 3. La zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée d'une épaisseur ne dépassant pas quelques mètres (Ledoux, 1986), est souvent assimilée à une interface abrupte sans mélange séparent l'eau douce et l'eau salée (Bear, 1979 et Marsily, 1986). L'épaisseur de la zone de transition varie de quelques mètres dans les aquifères de sable à des centaines de mètres dans les aquifères de basalte (Bobba, 1993).

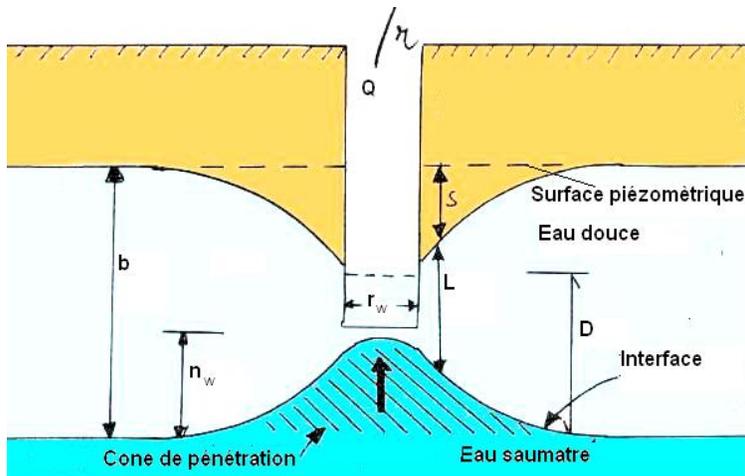


Figure 3 : Action du pompage - élévation du biseau salé vers le fond du puits.

$$n_w = \frac{Q\rho_d}{2\pi(b-1)(\rho_s - \rho_d)K}$$

D'autre part, le changement du sens de l'écoulement par les pompages à proximité de la mer généralise la diffusion de l'eau marine dans l'eau douce. La mer engendre aussi, localement, des écoulements dans le sens mer nappe, favorable à la contamination de la nappe, cas observé à Bordj-El-Kiffan (ex

Fort de l'Eau) sous l'influence de pompages intensifs. Le niveau de la nappe est descendu jusqu'à -5m. En effet, l'augmentation de la concentration saline rencontrée dans cette zone pourrait être un signe d'un flux d'eau salée de la mer vers les pompages.

Etude chimique

La salure s'accroît de plus en plus vers la mer, ainsi que vers les zones de dépression piézométrique (fig. 4), avec un faciès chimique des eaux qui tend à évoluer vers un enrichissement en sodium et en chlore ($7 < \text{Na}^+ < 35$ méq/l et $15 < \text{Cl} < 50$ méq/l). Le développement de ce type de salinité pourrait être un indice d'une invasion marine. L'augmentation de la proportion d'eau de mer (représentée par la quantité de chlorures en méq/l) dans le mélange eau douce-eau de mer est une caractéristique des mouvements de mélange eau douce-eau de mer (Pulido et al., Wilson et al., 2006). Quelquefois, le passage de faibles aux fortes concentrations est brutal (le resserrement des courbes d'iso-concentration est très marqué), indice d'une intrusion salifère. Le diagramme de Piper, montre que les eaux de la nappe côtière d'Alger Est sont chlorurées calciques et parfois chlorurées sodiques : 65 % de faciès (Ca, Cl) et 35 % de faciès (Na, Cl). La salinité de type (Na, Cl) est associée à des valeurs de CE élevées, ce type de salinité s'observe surtout dans les zones qui sont proches de la mer.

Les différents résultats obtenus et l'analyse des différentes cartes d'iso concentration établies, nous ont permis de déceler trois zones probables d'intrusion marine : la zone de Stamboul qui est la plus polluée (la pollution est due essentiellement à l'intrusion marine), la zone de Verte Rive où les fortes concentrations observées sont dues à des intrusions salifères du genre de celles qui apparaissent à Stamboul mais où la zone polluée reste très limitée dans l'espace et enfin la zone de Bordj El Kiffan, où l'augmentation saline pourrait être due à l'affluence de l'eau de mer vers les pompages. Dans cette zone, c'est le pompage lui-même qui est le moteur de l'intrusion marine. Il est alors évident que plus celui-ci est intense et prolongé, plus le degré de pollution augmente. Ainsi, l'exploitation de la nappe doit être contrôlée de près, de façon à éviter l'extension de la pollution.

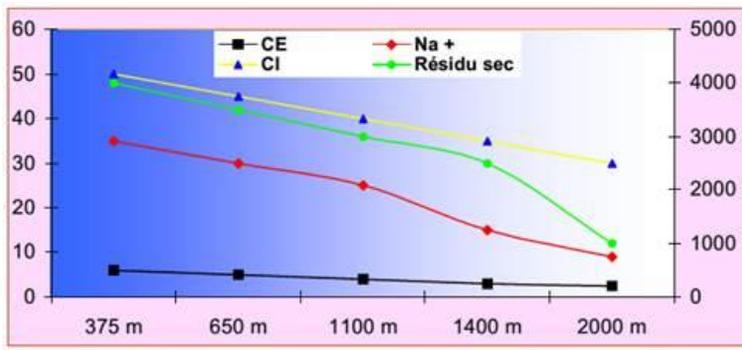


Figure 4 : Accroissement de la salinité de l'eau de nappe, de l'intérieur des terres vers la mer

Au niveau de Stamboul, les courbes d'isoconcentration accusent un resserrement très marqué, l'accroissement des concentrations des différentes variables cartographiées est dirigé de l'intérieur vers la mer. Cette salure qui s'accroît de plus en plus vers la mer est due probablement à la diffusion des sels de l'eau de mer. Tout en se rapprochant de la mer, le faciès chimique des eaux tend à évoluer vers un enrichissement en sodium et en chlore. Le faciès devient de moins en moins calcique et de plus en plus sodique. La zone toute proche de la mer présente une salinité essentiellement chlorurée sodique. Le développement de ce type de salinité vers la mer pourrait être un indice d'une invasion marine.

Au niveau de Bordj-El-Kiffan, les niveaux de salure et les valeurs de résidu sec sont assez élevées (fig. 5 et 6). L'accroissement des concentrations est dirigé vers la zone qui correspond à la dépression piézométrique, ainsi que vers la mer. L'augmentation de la concentration saline pourrait être un signe d'un flux d'eau salée de la mer vers les pompes. Dans cette zone, c'est le pompage lui-même qui est le moteur de l'intrusion marine. Il est alors évident que plus celui-ci est intense et prolongé, plus le degré de pollution augmente. Ainsi, l'exploitation de la nappe doit être contrôlée de près, de façon à éviter l'extension de la pollution.

A l'Est de Verte Rive, on observe un resserrement très marqué des courbes d'isoconcentration. Le passage de faibles aux fortes concentrations est brutal. Ces fortes concentrations sont dues à une intrusion marine qui reste ici très limitée dans l'espace

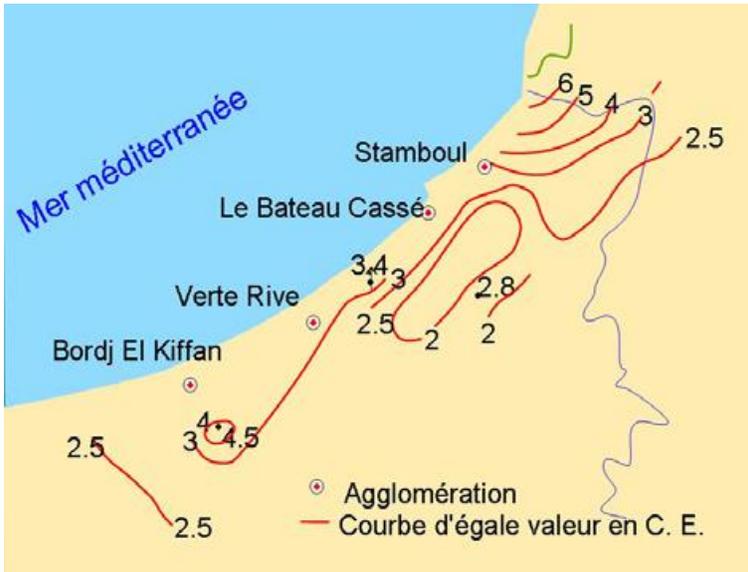


Figure 5 : évolution de la conductivité électrique

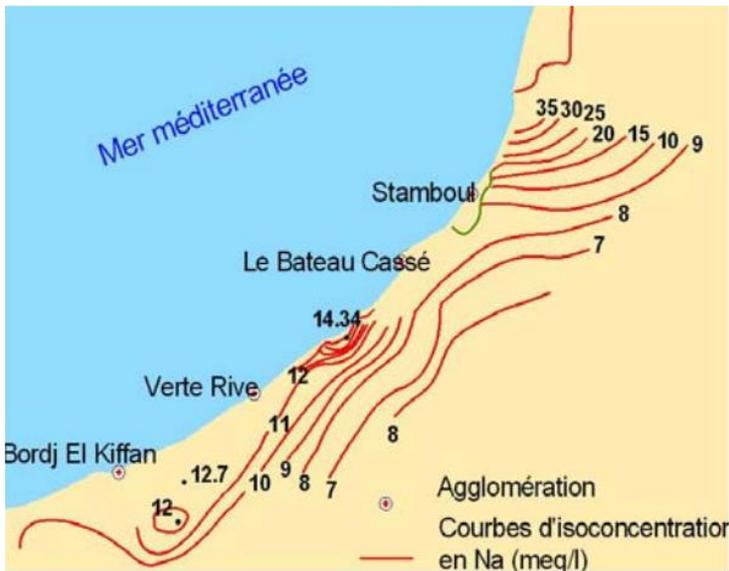


Figure 6 : évolution des concentrations en Na

Etude géophysique

Les méthodes géophysiques sont souvent utilisées pour détecter et évaluer l'extension de ce genre de contamination par l'eau de mer. Les valeurs de résistivité pour différentes profondeurs décroissent toutes de l'intérieur vers la mer. Les valeurs de résistivité varient de 300 à 10 Ω . m pour AB = 40m et de 100 à 15 Ω . m pour AB = 80m pour une distance de 1000 m environ.

Les faibles résistivités enregistrées au niveau de Stamboul pourraient être celles des formations perméables comprises dans le biseau salé, comme elles pourraient être dues à la présence des couches moins résistantes (couches argileuses). Les coupes géologiques, nous ont permis d'éliminer la seconde hypothèse. La profondeur d'investigation correspond à des alluvions meubles matures, non argileuses. Ces alluvions ont presque la même résistivité vue leur constitution. Il ressort de ces considérations, que dans cette zone à faible résistivité (10 Ω .m), le caractère conducteur de la base du niveau perméable à proximité du littoral est dû à l'intrusion d'eau salée depuis le domaine marin, sous la nappe d'eau douce.

A Bordj-El –Kiffan, les courbes iso résistivités accusent un resserrement très marqué. La variation est de 100 à 300 Ω . m pour une distance de 200m. La décroissance des résistivités est dirigée vers une zone privilégiée, celle de la dépression piézométrique, que nous avons déjà décelée lors de l'étude piézométrique.

Aptitude des eaux à l'irrigation

Du point de vue aptitude à l'irrigation, on peut admettre dans l'ensemble que les eaux ont une concentration assez élevée en sels (1,5 <CE< 7m.S/cm) et l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation dans cette zone pourrait engendrer éventuellement des problèmes de salinisation des sols. Les principaux facteurs qui entraînent des risques pour l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation sont : la teneur globale en sels, la part relative en Na et en Cl. Pour le danger d'alcalinisation, 72% des points d'eaux ont un SAR (Sodium Adsorption ratio) entre 0 et 10 et 24 % entre 10 et 18 suivant la classification de l'U.S. salinity laboratory (1954). Ces derniers points d'eau constituent un danger d'alcalinisation pour les sols à texture fine.

Les embruns marins

Des résultats obtenus, il ressort que les apports des embruns marins ne sont pas négligeables dans cette zone. Les quantités de sels les plus élevées, sont observées dans la zone la plus proche de la mer, avec 25 kg/ha de Cl et 17,7 kg/ha de Na (tableau 1). Les apports totaux en sels par les embruns marins, à Clairbois près d'Alger, ont été de 197,2 kg/ha/an (Durand, 1958). Les embruns marins qui sont très fréquents dans les zones maritimes peuvent apporter au sol, situé à proximité de la mer, une quantité en sels solubles non négligeables qui peuvent constituer un danger pour les cultures et les sols. Dans cette zone, les agriculteurs protègent leurs cultures par des brises vent en roseaux, disposés parallèlement au rivage.

Tableau 1 : Résultats des analyses des embruns marins, pour une période de 5 mois (15/01 au 15/06)

Emplacement (E)		E1 à 100 m de la mer	E2 à 1000 m de la mer	E3 à 3000 m de la mer	E4 à 4000 m de la mer
	X	518,990	518,73	525,75	522,25
	Y	384,450	383,25	385,55	383,75
	Z m	4	12	17	15
Cl	g/m ²	2,50	0,98	1,5	0,85
	Kg/ha	25	9,8	15	8,5
Na	g/m ²	1,77	0,2	0,3	0,07
	Kg/ha	17,17	2	3	0,7

Ces apports par les embruns marins peuvent être restitués facilement à la nappe par les pluies dans le cas où le sol est très perméable (cas des sols de minéraux bruts), comme ils peuvent être fixés par le sol dans le cas où celui-ci présente une mauvaise perméabilité (cas des sols argileux). La proximité de la mer a une influence sur la salinité par l'intermédiaire des pluies chargée de chlorures et des embruns marins (Margat, 1961).

Rapport entre la salinité du sol et celle de l'eau d'irrigation

L'étude pédologique nous a montré que la plupart des sols irrigués sont affectés par la salinité. Cette dernière est liée à la salinité de l'eau d'irrigation.

La salinité développée au niveau du sol va de pair avec celle de l'eau d'irrigation. Plus la conductivité électrolytique de l'eau d'irrigation est forte plus la teneur en Na augmente, provoquant ainsi un enrichissement net en sodium soluble. Lorsque la conductivité croît, le faciès chimique passe du type (Ca, Cl) au type (Na, Cl).

Les résultats ont montré que la salinisation était la conséquence d'une irrigation avec des eaux assez concentrées en sel. Bien que dans certains endroits, les eaux ne soient pas très salées, ce sont pourtant elles qui ont donné naissance aux différentes manifestations de salinisation à cause des caractéristiques spécifiques des sols (sols argileux). Cette zone est occupée par des sols peu évolués, des sols calcimagnésiques et des sols hydromorphes (Ecrement et al., 1974.).

En Algérie, la superficie des sols perdus par la salinisation est déjà très élevée. Il est donc nécessaire, pour les sols de la région étudiée d'essayer de contrôler ce phénomène d'intrusion marine et de salinisation des sols. Les sels peuvent être éliminés et leur accumulation empêchée si les sols sont bien drainés. Le drainage s'avère indispensable pour maintenir la productivité du sol à long terme surtout dans les sols lourds.

Moyens de prévention et de lutte

La meilleure prévention des nappes côtières qui présentent un risque d'intrusion marine c'est l'adoption d'un système d'exploitation adéquat :

- Le volume annuel prélevé de la nappe doit être inférieur à la recharge totale. Les dépressions des niveaux piézométriques peuvent entraîner un avancement du biseau salé.
- La position des pompes ou des crépines et le débit de pompage doit être bien étudié.
- Etant donnée les conditions climatiques et les exploitations intensives, la mise en place d'un réseau de surveillance du niveau de la nappe et de la salinité est nécessaire.

Dans le cas où nous sommes devant ce problème, des méthodes de lutte sont recommandées :

- Réduire les débits de pompage d'eau souterraine dans les zones sensibles à la pénétration du biseau d'eau salée.

- Arrêter le fonctionnement des forages qui captent l'interface eau douce - eau salée.
- La réalimentation artificielle de la nappe dans. Cette méthode est parfois coûteuse et demande des connaissances précises sur les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques.
- La mise en place des barrières hydrauliques (la recharge de la nappe avec de l'eau douce le long de la côte sur les zones proches de la mer, soit par pompage des eaux salées de l'aquifère, soit en combinaison les deux méthodes).

CONCLUSION

La dégradation de la qualité des eaux souterraines en zones côtières, par le phénomène d'intrusion marine, devient un sujet inquiétant, résultant de multiples actions naturelles et anthropiques (changements climatiques accompagnés de sécheresses prolongées, exploitation intensive et anarchique des nappes...) Il en résulte comme conséquence la salinisation de la nappe et des sols par suite des irrigations avec ces eaux.

Pour étudier l'origine de la salinisation des eaux des nappes côtière, mettre en évidence l'intrusion marine et déceler les zones de pollution marine ainsi que les zones sensibles, nous avons adopté une approche multidisciplinaire : étude piézométrique, étude chimique, étude hydrodynamique, étude géologique et géophysique. Pour déterminer les risques de salinisation des sols, différentes études ont été menées : étude physiques et chimiques du sol, étude de la relation qui peut exister entre la salinité du sol et celle des eaux d'irrigation et étude des embruns marins qui peuvent apporter au sol situé à proximité de la mer une quantité en sels solubles non négligeable. Cette approche est appliquée à l'aquifère côtier de la zone côtière d'Alger Est qui constitue un bon exemple.

Les différentes méthodes ont abouti à des résultats convergents. Les résultats obtenus par cette approche multidisciplinaire ont permis de mettre en évidence une intrusion marine et de déceler différents zones sensibles à la pollution marine dans cette zone côtière. Les causes principales de ce phénomène sont dues aux pompages intensifs associés au déficit pluviométrique et à la nature lithologique des aquifères. Ces facteurs engendrent une perturbation au niveau de l'interface eau douce - eau salée et accentuent l'avancement des eaux marines vers le continent. Les résultats montrent aussi que l'utilisation des eaux contaminées par l'invasion marine pour l'irrigation, pourrait engendrer des problèmes de salinisation des sols.

L'exploitation dans ce type de milieu doit être contrôlée de près, de façon à éviter la contamination et l'extension de la pollution. Il est indispensable de proposer des périmètres de protection pour les aquifères côtiers et de contrôler les débits du pompage et plus particulièrement en pays semi-aride à aride où les ressources en eau sont rares.

BIBLIOGRAPHIE

- ALGEO, 1978. Prospection géophysique dans la baie d'Alger. (Alger Est); D.M.R.H. Alger
- BEAR J., 1979 – Hydraulic of Ground water. Mac Graw-Hill, Inc., 568 p.
- BOBBA A. G., 1993 – “Mathematical Models for saltwater intrusion in coastal aquifers”. In Water resources, management7: 3–37.
- DURANT J. H., 1983. Les sols irrigables. A.C.C.T. PUF Paris, 339p.
- ECREMENT Y., SEGHIR B., 1974. Etude agro pédologique de la Mitidja. DMRH Alger. 60p.
- LEDOUX E., 1986 – Modèles mathématiques en hydrogéologie. Ecole Nationale Supérieure des Mines Paris, Fontainebleau, LHM/RD/86/12.
- MARGAT J., 1961. Les eaux salées au Maroc: hydrogéologie et hydrochimie. Notes et Mem. Serv. Géol. Mar., n° 151, Rabat, pp.65-66.
- MARSILY G. 1986. Quantitative hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineering Academic Press, inc. New York, 440 p.
- PULIDO-LE BOEUF P., PULIDO-BOSCH A., CALVACHE M.L., VALLEJOS A., ANDREU J.M., 2003. Strontium, SO₄²⁻/Cl⁻ and Mg²⁺/Ca²⁺ ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro aquifer (SE Spain). C.R. Geosciences, 335:1039-1048.
- UNESCO. 2006. *Rapport mondial des Nations-Unies sur la mise en valeur des ressources en eau : L'eau : une responsabilité partagée*. Résumé. Paris. 52 p.
- United States Salinity, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. Laboratory Staff, Richards, L.A. (ed) . Department of agriculture laboratory Staff hand book n° 60; United States Department of Agriculture pp 37 & 38.
- WILSON S.R., INGHAM M. & MC CONCHIE J.A. 2006. The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. Journal of hydrology, 316: 301-312.