

## L'aquifère des sables de la presqu'île de Dakar (Sénégal): état de la ressource et impacts anthropiques

JC. Comte<sup>(1,2)</sup>, O. Banton<sup>(3)</sup>, S. Sambou<sup>(4)</sup>, Y. Travi<sup>(3)</sup>, I. Ouédraogo<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Queen's University Belfast ; <sup>(2)</sup> HYDRIAD ; <sup>(3)</sup> Laboratoire d'Hydrogéologie – UMR EMMAH, Université d'Avignon ; <sup>(4)</sup> Laboratoire d'Hydraulique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar  
j.comte@qub.ac.uk

La presqu'île de Dakar au Sénégal abrite près de 2,5 millions de personnes sur un territoire d'environ 100 km<sup>2</sup>. Autrefois alimentée en eau grâce aux ressources souterraines locales, en particulier la nappe des sables quaternaires, la ville est désormais en majorité desservie par une conduite de 300 km amenant l'eau depuis le Lac de Guiers situé dans la vallée du Fleuve Sénégal. La gestion de la nappe des sables quaternaires n'en reste pas moins un enjeu environnemental et sanitaire pour l'agglomération dont le développement affecte fortement le régime des nappes et a pour conséquence préoccupante une intensification des inondations saisonnières dans les zones basses associées à d'importants débordements des fosses septiques. Les récents travaux de mise à jour de la cartographie hydrogéologique de la Presqu'île ont précisé le fonctionnement hydrodynamique actuel de la nappe, ainsi que ses niveaux de salinisation marine et de contamination agricole. Ces résultats confirment le niveau élevé, actuel et anticipé, de pollution de l'aquifère, renforçant sa condamnation à court et moyen terme pour toute exploitation aux fins de l'alimentation en eau potable. En outre, des investigations hydrogéologiques et géophysiques détaillées dans le secteur très urbanisé de Pikine ont précisé le régime de renouvellement de la nappe et confirmé en particulier l'augmentation significative de la recharge de la nappe due à l'infiltration des eaux usées dans les secteurs urbains. Cette augmentation constitue un facteur important de modification du régime hydrogéologique dont le lien de cause à effet avec l'intensification des inondations saisonnières est fortement suspecté. La gestion de la nappe demeure de ce fait, avec le développement et la gestion de l'assainissement urbain, un enjeu de développement durable dans cette métropole côtière en forte expansion.

### I. CONTEXTE REGIONAL ET ETAT DE LA RESSOURCE

La presqu'île de Dakar a fait depuis plus de 50 ans l'objet de nombreuses études hydrogéologiques régionales, la plupart motivées par la recherche et la quantification de ressources en eau souterraine pour l'alimentation de l'agglomération de Dakar [1-2] qui avoisine aujourd'hui les 2.5 millions d'habitants sur une péninsule confinée d'environ 100 km<sup>2</sup>. Le principal aquifère de la presqu'île est constitué par les sables quaternaires [2]. Les sables du Quaternaire ancien constituent l'aquifère infrabasaltique, recouvert par les coulées volcaniques quaternaires des Mamelles (Figure 1). Au-delà de la limite d'extension des coulées, l'aquifère devient libre et forme le système dunaire de Thiaroye, regroupant plusieurs prismes dunaires superposés recouvrant l'isthme de Dakar jusqu'à Saint Louis. Dans la presqu'île de Dakar ce système aquifère repose sur le substratum marneux éocène et affiche une épaisseur moyenne de 50 à 80 m [1].

L'aquifère des sables quaternaires est exploité pour fins d'alimentation en eau potable par deux principaux champs captants dans le secteur de Dakar : (1) le centre de Point B-Mamelles captant la nappe infrabasaltique à hauteur de 4.4 millions de m<sup>3</sup>/an (année 2007), et (2) le centre de Thiaroye captant la nappe libre des sables à hauteur de 1.8 millions de m<sup>3</sup>/an (année 2007) [2].

En termes de qualité, le taux de nitrates dans les eaux souterraines atteignait en 2004 un niveau de contamination très élevé [3], dépassant fréquemment les 50 mg/L (Figure 1). D'après de nombreux auteurs, cette contamination est essentiellement d'origine urbaine et liée aux rejets d'eaux mal ou non assainies [3-4-5-6]. Les sables de la presqu'île renferment également de nombreuses cuvettes salines, les « niayes » qui représentent des dépressions évaporatoires à inondation temporaire résultant de l'effet conjugué du ruissellement et de l'affleurement de la nappe. La nappe y étant en relation directe avec l'océan, les niayes constituent des zones privilégiées d'intrusion saline due à l'abstraction d'eau par évaporation. A Pikine en

particulier, la Grande Niaye affiche une altitude négative, jusqu'à environ -3m/nmm et l'évaporation peut y atteindre 2000 mm/an [7-8].

Du fait de la très forte vulnérabilité de la nappe des sables au regard de la contamination urbaine et de l'intrusion marine, l'approvisionnement local en eau souterraine à partir des sables quaternaires a progressivement diminué dans les dernières années [9].

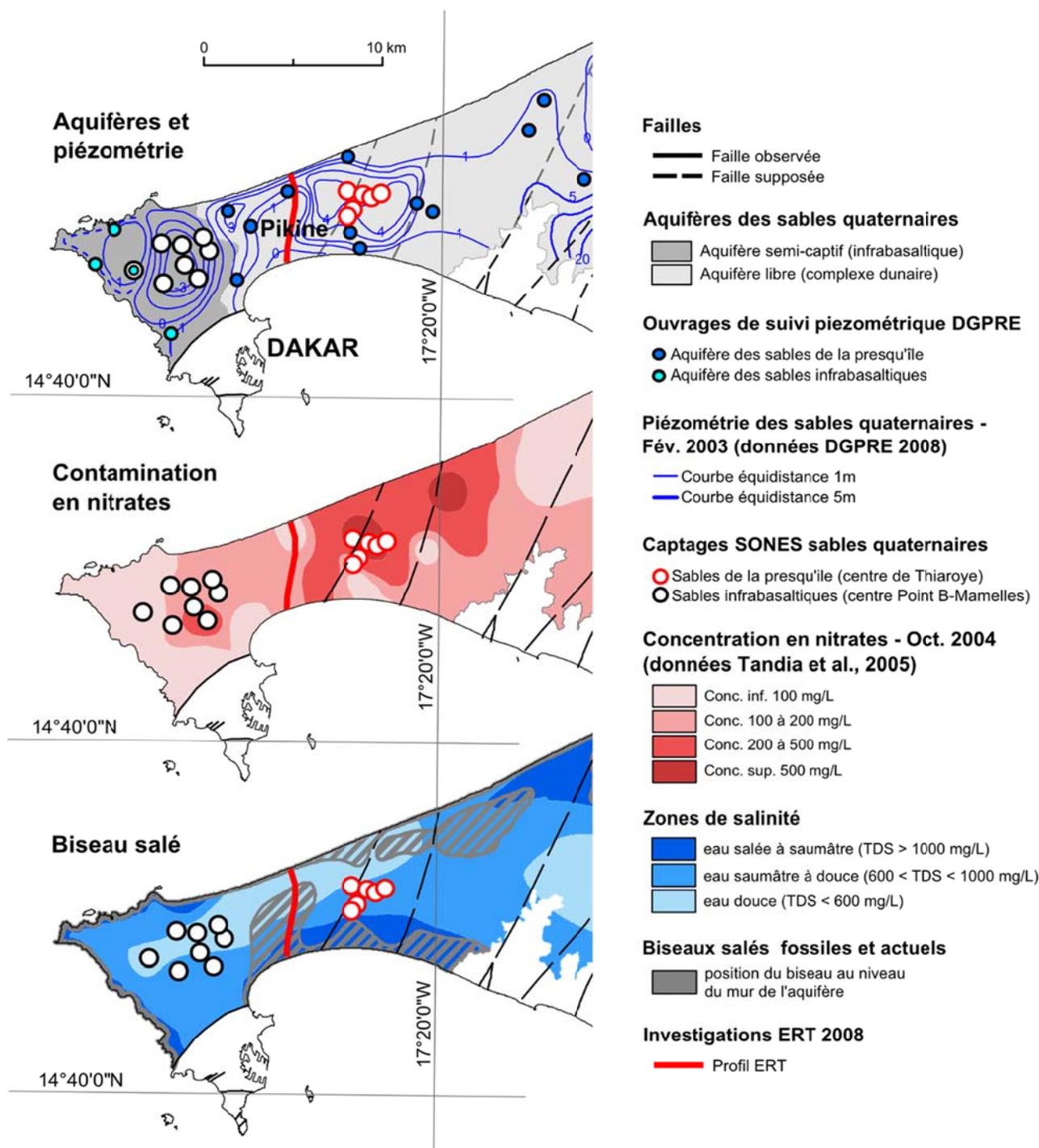


Figure 1 – Aquifères de la presqu'île de Dakar et leur contamination par les nitrates et les intrusions salines. La zone à l'Ouest du méridien 17°20' présente la plus forte urbanisation.

Dans les dix dernières années, il a également été constaté une intensification des inondations durant la saison des pluies, causées au moins partiellement par des remontées et débordements de la nappe au voisinage des niayes [10]. Outre les dommages directs occasionnés par les inondations, ces remontées posent d'importants problèmes sanitaires dans les nombreux quartiers où elles provoquent également les débordements des fosses septiques. La diminution progressive des prélèvements des forages de Thiaroye est un facteur avéré d'aggravation des remontées de nappes et inondations [11-12-13].

Afin de quantifier finement le fonctionnement hydrodynamique de la nappe des sables et des niayes, des investigations géophysiques et hydrogéologiques ont été mises en œuvre dans le secteur de la Grande Niaye de Pikine, secteur très densément urbanisé et parmi les plus touchés par les inondations, la contamination nitratée et la salinisation. Une approche couplant les résultats de la géophysique et un modèle d'écoulement densitaire a été mise en œuvre afin de préciser les phénomènes de recharge et d'évaporation au sein de la nappe des sables et d'éclairer l'impact de l'urbanisation sur le fonctionnement de l'aquifère.

## II. RECHARGE NATURELLE, EVAPOTRANSPIRATION ET IMPACT ANTHROPIQUE

Le facteur clé affectant le fonctionnement actuel de la nappe des sables est la modification de la recharge due à l'urbanisation. Les auteurs antérieurs [1-7-9] évaluent la recharge de l'aquifère entre 200 mm/an dans les secteurs non urbanisés (recharge naturelle) et 450 mm/an dans les secteurs urbanisés comme Pikine, soit une augmentation de 125% par rapport à la recharge naturelle. Ces auteurs justifient cette valeur très élevée par les retours importants à la nappe en l'absence de réseau de collecte des eaux usées. Ces 450 mm/an pourraient en effet s'infiltrer dans les secteurs où l'infiltration est rapide et où la reprise évaporatoire est nulle, comme par exemple dans les hautes dunes non végétalisées. Il s'agit donc d'une valeur maximale de recharge. Toutefois, une reprise évaporatoire intervient dans les dunes basses et/ou végétalisées, quand la zone non saturée est peu épaisse (nappe sub-affleurante). Cette reprise diminue la recharge, jusqu'à l'annuler voire la dépasser avec un maximum atteignant annuellement 1850 mm à 2000 mm quand la nappe affleure [7-8]. Ces deux dernières valeurs induisent donc respectivement à une recharge nette de -1400 à -1550 mm/an.

Les travaux précédents [9] fournissent également des valeurs de reprise évaporatoire en fonction de la profondeur de la nappe. Ces valeurs diminuent de 900 mm/an, pour une nappe située à 25 cm de profondeur, à 1 mm pour un niveau statique situé à 7 m/sol. L'ajustement d'une courbe de régression sur ces données permet de calculer la reprise évaporatoire (RET en mm/an) pour une profondeur donnée de nappe (Figure 2) avec l'équation suivante ( $R^2 = 0.999$ ) :

$$RET = \frac{1}{0.02018564\Delta z^2 + 0.00148047\Delta z + 0.00054054} \quad (1)$$

Où  $\Delta z = Z_{sol} - Z_{nappe}$  ;  $Z_{sol}$  correspond à l'altitude du sol et  $Z_{nappe}$  à l'altitude de la nappe c'est-à-dire la hauteur piézométrique (en m/nmm). La borne supérieure de l'évapotranspiration, fixée à 1850 mm/an, implique que cette valeur maximale est atteinte à l'affleurement de la nappe, c'est-à-dire pour  $\Delta z = 0$  m. La recharge nette RN s'exprime par la différence entre recharge maximale  $R_{max}$  et reprise évaporatoire :

$$RN = R_{max} - RET \quad (2)$$

Ainsi calculée, la reprise évaporatoire compenserait la recharge, bornée à 450 mm/an, pour une profondeur de nappe de 25,4 cm, annulant ainsi la recharge nette. Pour une profondeur supérieure, la recharge dépasserait la reprise évaporatoire.

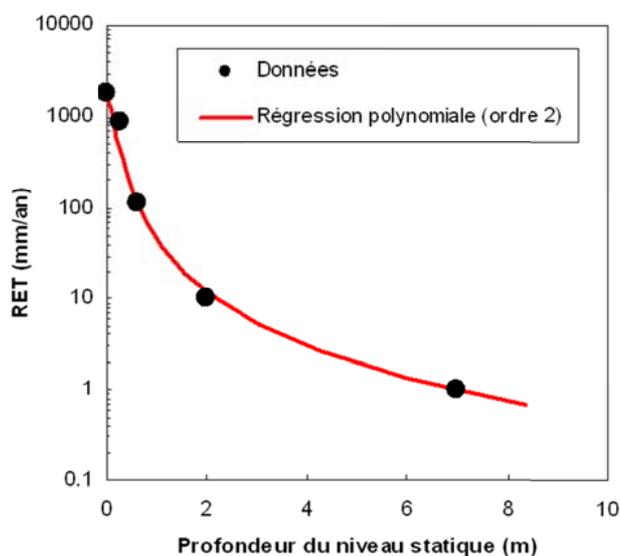


Figure 2 – Diminution de la reprise évaporatoire avec la profondeur de la nappe. Les points noirs correspondent aux données tirées de travaux précédents [7-8-9] et la courbe rouge représente la régression polynomiale appliquée sur ces points (RET=reprise évaporatoire en mm/an).

### III. PROSPECTION GEOPHYSIQUE ERT

Une prospection géophysique ERT a été mise en œuvre dans le secteur de Pikine du littoral Sud Nord et recoupant la Grande Niaye. Du fait de l'urbanisation très importante, les investigations n'ont pas pu permettre la réalisation d'un profil continu du Sud vers le Nord (Figure 3), néanmoins, quatre profils en ligne ont été levés, totalisant une longueur cumulée de 3465 m. L'acquisition a été réalisée avec le dispositif Wenner-Schlumberger pour un espacement inter-électrode de 5 m. L'inversion des données de résistivités apparentes a été effectuée par RES2DINV avec application de la contrainte L1-normée qui permet la restitution d'interfaces nettes et d'ensembles homogènes.

L'interprétation combinée des profils permet d'extrapoler la géométrie des ensembles hydrogéologiques (Figure 3), en particulier (1) le contact entre l'aquifère et son substratum, conforme aux connaissances existantes [1] et (2) l'interface eau douce/saumâtre – eau salée. Pour cette interface, les modèles géo-électriques soulignent la discontinuité des lentilles qui ne se développent qu'au niveau des dômes topographiques, c'est-à-dire dans les zones où la nappe est suffisamment profonde pour que la recharge domine la reprise évaporatoire. Au contraire, dans les zones basses, la nappe sub-affleurante est totalement salinisée du fait d'une évapotranspiration largement prépondérante. Dans le cordon sableux Nord, une lentille de taille significative semble être présente, conformément aux observations précédentes [1], révélée par ses résistivités importantes. Le développement de cette lentille est permis par l'altitude élevée de la dune impliquant une profondeur importante de la nappe (c'est-à-dire une épaisseur importante de la zone non saturée) et donc une recharge élevée autorisée par une évapotranspiration faible. La décharge de cette lentille d'eau douce est identifiable par la présence d'un biseau au pied de l'escarpement dunaire, dans la partie Nord du profil central réalisé dans la niaye.

### IV. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE

Afin de quantifier le renouvellement des lentilles douces/saumâtres, en particulier les phénomènes évaporatoires, un modèle d'écoulement densitaire a été appliqué à l'aide du code SUTRA v2.1 [14]. Le modèle a été structuré en 2D vertical, conformément à la géométrie de l'aquifère (profondeur du substratum imperméable) décrite par les précédents auteurs, et considérant une entité aquifère unique et homogène pour l'ensemble des sables quaternaires [1].

Les conductivités hydrauliques horizontales de l'aquifère sableux sont assez homogènes, de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s [15-16-9-17], et les conductivités verticales environ 100 fois plus faibles [17]. La porosité efficace affiche une valeur d'environ 20% pour une porosité totale de 35% [18-15-19-1-20-9-17]. Par ailleurs, des

études récentes [20] rapportent pour l'aquifère infrabasaltique des dispersivités longitudinale de 120 m et transversale de 0,6 m. Ce sont les paramètres retenus pour la modélisation. L'océan correspond à une condition aux limites de pression constante, avec une salinité de l'eau de mer de 35,7 g/L [14]. La recharge est appliquée selon les équations (1) et (2) avec une salinité de 200mg/L correspondant au fond hydrochimique régional [2].

Sur le long terme (régime moyen stabilisé), la recharge nette montre d'importantes variations spatiales du Sud au Nord (Figure 4) ; elle est positive sous les cordons dunaires Sud et Nord et atteint la recharge maximale de 450 mm/an, là où la profondeur de nappe est maximale ; elle est minimale dans la vaste zone en dépression centrale, caractérisée par une importante reprise évaporatoire où la nappe est salée et sub-affleurante, c'est-à-dire dans les niaves. Dans ces zones basses, la sursaturation en sel liée à l'évaporation de l'eau est importante (Figure 4), atteignant en moyenne 1,5 mg sel/m<sup>2</sup>/s, soit environ 53 g/m<sup>2</sup>/j c'est-à-dire près de 20 kg sel/m<sup>2</sup>/an. Si la totalité de ce sel précipitait, cela constituerait chaque année une croûte saline d'une épaisseur de l'ordre du cm.

En régime moyen stabilisé, la piézométrie calculée montre deux dômes coïncidant avec les cordons littoraux Nord et Sud, séparés par une dépression piézométrique centrale (Figure 4). Sous le cordon Sud, la piézométrie est faible (au maximum 20 cm/nmm) alors que sous le massif dunaire Nord, elle atteint 1,3 m/nmm. Dans la niave, la dépression piézométrique est d'au moins 2,7 m sous le niveau marin. Du fait des variations spatiales importantes de la recharge nette dues à la variation de la topographie, la piézométrie montre dans la niave une succession de dômes et creux correspondant respectivement aux zones hautes et zones basses.

## V. COUPLAGE ENTRE LES MODELES GEOPHYSIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

Une relation hydro-pétrophysique peut être établie entre les résistivités du modèle géo-électrique et les salinités du modèle hydrogéologique grâce à la combinaison des lois d'Archie et de Hem et Arps (voir [21]). L'utilisation de la loi d'Archie est justifiée par la teneur négligeable en particules argileuses des sables de la presqu'île. La porosité est prise à 30 %, soit une valeur intermédiaire entre la porosité efficace de 20 % et la porosité totale de 35 %, considérant que tout le milieu poreux ne participe pas à la propagation du courant électrique. Le coefficient de cimentation est fixé à 1,45 d'après les données existantes pour les sables quartzueux typiques [22]. La température de la nappe est fixée constante à 30 °C [17].

Les résultats du modèle de résistivité et ceux du modèle hydrogéologique sont cohérents entre eux (Figure 3, section du haut). De manière générale, le modèle d'écoulement densitaire (Figure 3, section du bas) reproduit des lentilles d'eau douce (de salinité inférieure à 800 mg/L) et saumâtre (de salinité comprise entre 0,8 et 5 g/L) dont la distribution et la morphologie sont assez semblables aux zones résistantes mises en évidence sur les profils géo-électriques (Figure 3).

Dans la dépression centrale de la niave la reprise évaporatoire domine très largement la recharge, impliquant un développement très limité des lentilles douces/saumâtres et une très large prédominance de l'eau salée. Cette eau salée a une double origine : d'une part le mouvement intrusif de l'eau de mer en provenance de l'océan au Nord et au Sud, circulant dans les niveaux inférieurs de l'aquifère (sous les lentilles des cordons littoraux), et dont le prélèvement évaporatoires dans la niave constitue l'élément moteur ; d'autre part l'enrichissement en sel des niveaux superficiels de la nappe du fait de l'évaporation et la descente gravitaire de l'eau sur-salée. Dans les secteurs les moins déprimés de la niave, telles les petites buttes, l'existence d'une faible recharge permet le développement de petites lentilles saumâtres, conformément aux résultats de la géophysique.

Les principales différences observées dans la restitution de la structure et les dimensions des lentilles, qui apparaissent dans l'ensemble notablement plus développées dans les simulations hydrogéologiques qu'obtenues par imagerie géophysique, peuvent vraisemblablement s'expliquer en majeure partie par (1) une surestimation à la fois de la recharge maximale dans les secteurs dunaires moins urbanisés et de la reprise évaporatoire maximale dans les secteurs d'affleurement de nappe ; et (2) le régime de simulation du modèle d'écoulement densitaire, qui ne tient pas compte du caractère transitoire des conditions aux limites, en particulier la recharge et l'évaporation, alors que les investigations géophysiques ont été réalisées en fin de saison sèche. Une validation supplémentaire du modèle hydrogéologique pourrait

également être apportée par l'analyse chimique des eaux souterraines, pour lesquelles il serait en particulier possible de différencier d'eau salée venant de l'infiltration de celle venant de l'eau de mer en couplant l'analyse du rapport Cl/Br avec celles des teneurs en  $^{18}\text{O}$ .

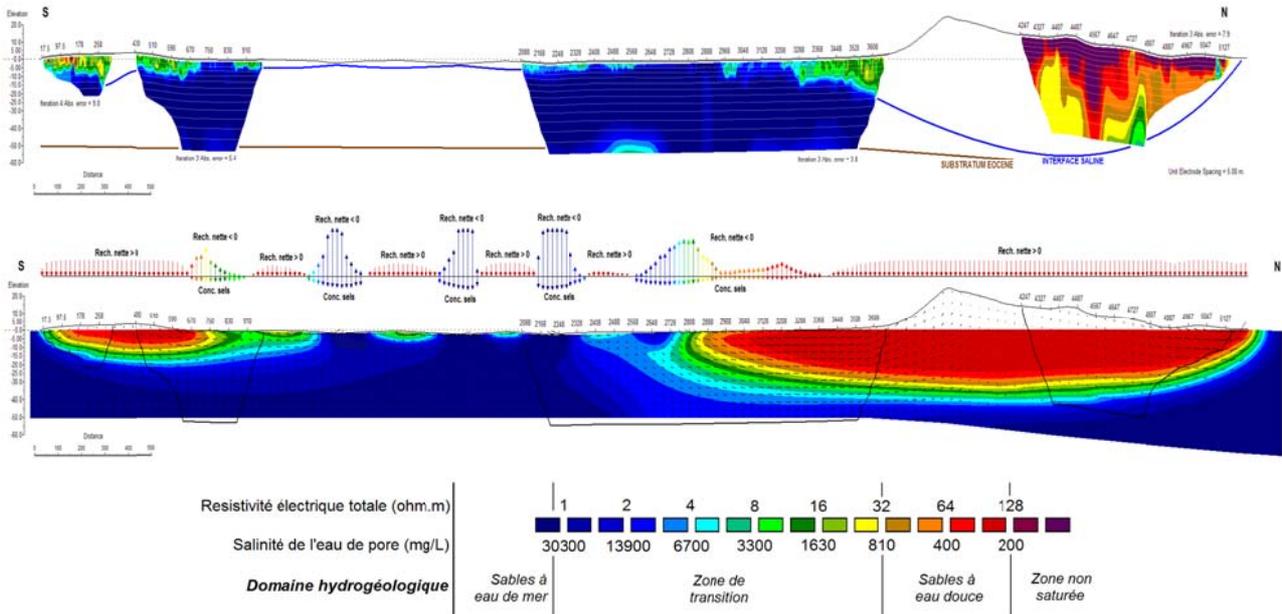


Figure 3 – Comparaison des sections ERT inversées (section du haut) et des résultats du modèle d'écoulement densitaire 2D (section du bas)

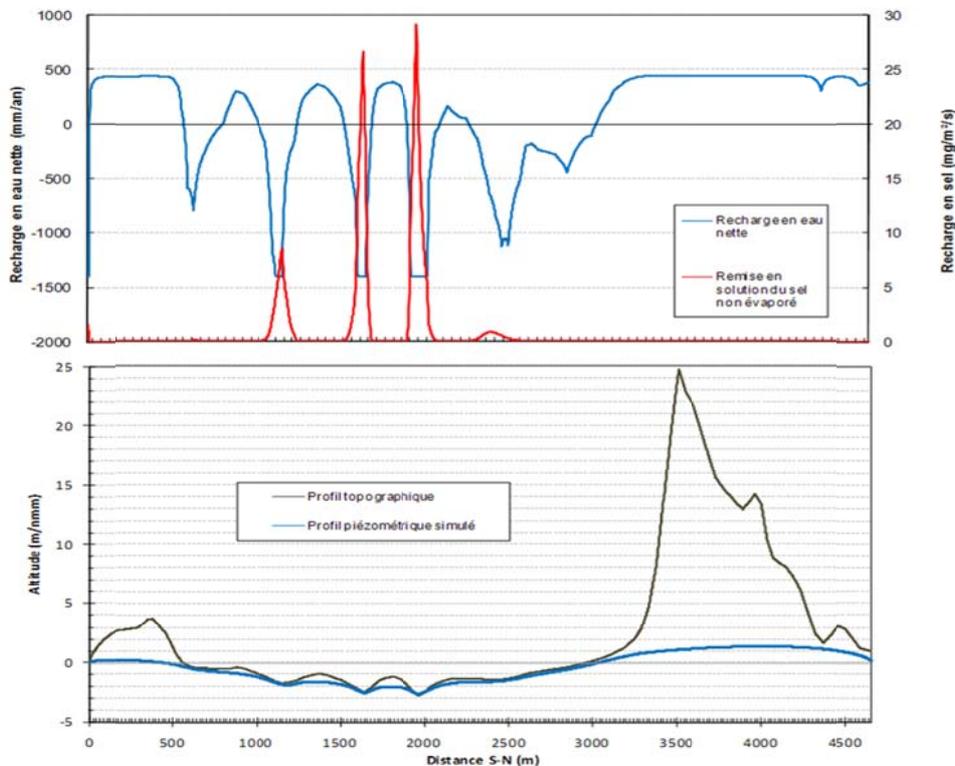


Figure 4 – Evolution sur le profil Sud-Nord du flux de recharge nette, du flux de sel remis en solution (graphique du haut), de la piézométrie simulée et la topographie (graphique du bas).

## VI. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La nappe des sables quaternaires de la presqu'île de Dakar est un exemple de nappe très vulnérable soumise à une forte pression anthropique, représentative de nombreuses métropoles côtières. Outre les importants niveaux de contamination atteints, en particulier la pollution par les nitrates d'origine anthropique, les eaux douces montrent un équilibre fragile avec les eaux salées marines. Un des impacts très significatif de l'urbanisation est une augmentation de la recharge de la nappe atteignant probablement 400 mm/an soit environ le double de la recharge naturelle. Cet excès de recharge est constitué d'eaux usées contaminées responsables de la forte pollution par les nitrates. Sur l'agglomération de Dakar, cet excès de recharge, considérant 200 mm/an, totaliserait environ 20 millions de m<sup>3</sup>/an, un volume qui n'est pas compensé par les prélèvements des forages infra-basaltiques et de Thiaroye, totalisant pour leur part 6.2 millions de m<sup>3</sup>/an (en 2007), soit tout juste le tiers. Bien que favorisant le développement des lentilles d'eau douce dans les cordons dunaires, les impacts de cet excès de recharge de l'aquifère se matérialisent aussi sous la forme d'une augmentation de la reprise évaporatoire dans les zones basses et donc de leur salinisation accrue, mais surtout d'une intensification des inondations et des remontées de nappe impactant directement l'assainissement urbain, en particulier par les débordements occasionnés des fosses septiques. A titre d'exemple, de récentes études menées dans le secteur de Thiaroye [11-12] ont montré l'impact négatif de la diminution des pompages sur les inondations et remontées de nappes. Ces forages, malgré leur niveau de contamination les rendant aujourd'hui impropres à la consommation ont été remis en service récemment pour fins d'irrigation agricole, de même que pour minimiser les inondations et remontées de nappes [12-23]. Cet exemple montre l'équilibre fragile et la forte vulnérabilité des nappes dans les zones côtières urbaines constituant par ailleurs un risque sérieux affectant à la fois les constructions et la santé humaine lorsque l'urbanisation n'est pas accompagnée rapidement d'une mise en place de systèmes de collecte d'eaux usées et d'assainissement.

### Remerciements

Certaines parties de ce travail ont été réalisées grâce à l'appui du projet européen PASMI, du groupement GEOTER-BRGM-Université Avignon et des étudiants de Master du Département d'Hydraulique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Les données de prélèvements des forages AEP ont été fournies par B. Diakhaté (SONES).

### Références bibliographiques

- [1] Martin A., 1970 – Les nappes de la presqu'île du Cap-Vert (République du Sénégal) : Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar, *Notice et cartes hydrogéologiques 1/50 000*, BRGM, France.
- [2] Comte J.C., Banton O., Travi Y., 2009 – Chapitre Hydrogéologie, In: Roger J., Banton O., Barusseau J.P., Castaigne P., Comte J.C., Duval C., Nehlig P., Noël B.J., Serrano O., Travi Y. (Eds.), *Notice explicative de la cartographie multi-couches à 1/50 000 et 1/20 000 de la zone d'activité du Cap-Vert*, Min. Mines Indu. PME, Dir. Mines Géol., Dakar, 245 p.
- [3] Tandia A.A., Deme I., Sarr M., 2005 – Aquifère superficiel et pollution urbaine en Afrique, Rapport final du Sénégal, Doc. Dépt. Géol. UCAD, Rép. Sén., Dir. Gest. Planif. Ress. Eau, UNEP/UNESCO/UN-HABITAT/ECA, 52 p.
- [4] Cisse Faye S., Faye S., Wohnlich S., Gaye C.B., 2004 – An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal), *Environmental Geology*, 45(3), 12-322.
- [5] Diedhou M., Cisse Faye S., Diouf O.C., Faye S., Faye A., Re V., Wohnlich S., Wisotsky F., Schulte U., Maloszewski P., 2011 – Tracing groundwater nitrate sources in the Dakar suburban area: an isotopic multi-tracer approach, *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp.8172.
- [6] Re V., Cisse Faye S., Faye A., Faye S., Gaye C.B., Sacchi E., Zuppi G.M., 2011 – Water quality decline in coastal aquifers under anthropic pressure: the case of a suburban area of Dakar (Senegal), *Environmental Monitoring and Assessment*, 172, 605-622.
- [7] Vallet P., 1972 – Approvisionnement en eau et assainissement de Dakar et ses environs, Etude des eaux souterraines, Tome II : Etude hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires, Rapp. OMS, Projet Sénégal 3201, 139 p.
- [8] Dasylyva S., 2001 – Les bas-fonds des sables dunaires de la région de Dakar : Potentialités agricoles et contraintes urbaines, Thèse, Univ. Paris 1, Paris, France.
- [9] ANTEA-SENAGROSOL, 2003 – Projet Eau à Long Terme: Etude d'impact de l'arrêt des forages de Thiaroye sur les zones basses, Modélisation de la nappe, Phase A, Rapp. A27499/C, 77 p.

- 
- [10] Wade S., Faye S., Dieng M., Kaba M., Kane N.R., 2009 – Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine : le cas de la région de Dakar (Sénégal), Journées JAS09 de l'AUF, Alger, 7 p.
- [11] ANTEA-SENAGROSOL, 2004 – Projet Eau à Long Terme : Etude d'impact de l'arrêt des forages de Thiaroye, Modélisation des scénarios d'arrêt, Evaluation des impacts hydrogéologiques, Phases B-C, Rapp. A33129/A, 73p.
- [12] Urbanistes Sans Frontières International (2009), Programme de mitigation des inondations de Thiaroye, Dossier diagnostic, Octobre 2009, 35 p.
- [13] Ouédraogo I., 2009 – Contribution à l'étude hydrodynamique de la nappe du littoral dans la banlieue de Dakar, Mémoire de DEA, Univ. Cheikh Anta Diop Dakar, 95 p.
- [14] Voss C.I., Provost A.M., 2008 – SUTRA: A model for saturated-unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport, Ver. 2.1., USGS Water-Resources Investigations Rep. 02-4231, Reston, USA.
- [15] Debuissou J., 1965 – Analyse des facteurs régissant les contacts eaux douces-eaux salées dans les sables de la presqu'île du Cap-Vert (Dakar), Campagne 1964, Mise en place du dispositif d'observation et étude des fluctuations en équilibre naturel, BRGM, Rapp. DAK-65-A-10, 39 p.
- [16] Henry J.L., 1972 – Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la presqu'île du Cap-Vert, Rapp. Fin., GEOHYDRAULIQUE/OMS, 114 p.
- [17] Cabinet Merlin, 2005 – Mobilisation de ressources en eau alternatives pour l'irrigation dans la région de Dakar : Etude d'avant-projet détaillée, Rapport principal des phases 1 et 2, Tome 2/4 Rapport Hydrogéologique, M 070610/CJ, 76 p.
- [18] Moussu H., Debuissou J., 1966 – Etude expérimentale d'un équilibre eaux douces – eaux salées, sur le rivage maritime de Malika, près Dakar (Sénégal), *Bull. BRGM*, 1, 57–65.
- [19] Debuissou J., 1970 – La nappe aquifère du cordon dunaire de Malika (Sénégal), *Bull. BRGM*, 2e sér., sec. III, n°3, 148–161.
- [20] Faye S., Niang Diop I., Cisse Faye S., Evans D.G., Pfister M., Maloszewski P., Seiler K.P., 2001 – Seawater intrusion in the Dakar (Senegal) confined aquifer: calibration and testing of a 3D finite element model, *In: Seiler K.P., Wohnlich S. (Eds.), New Approaches to Characterizing Groundwater Flow*, 1183–1186, Swets & Zeitlinger, Lisse.
- [21] Comte J.C., 2008 – Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers, Application à trois contextes climatiques contrastés (Canada, Nouvelle Calédonie, Sénégal), Thèse, Univ. d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 200 p.
- [22] Friedman S.P., Robinson D.A., 2002 – Particle shape characterization using angle of repose measurement for predicting the effective permittivity and electrical conductivity of saturated granular media, *Water Resources Research*, 38(11), 1236.
- [23] Conseil des Ministres du 11 mai 2011 – Réactivation des forages de Thiaroye, République du Sénégal.

---

# Faire face à la salinisation et à la contamination des aquifères côtiers dans le contexte des changements environnementaux planétaires et sociétaux : Approches géochimique et isotopique appliquées aux ressources en eau de Recife (Brésil)

**E. Petelet-Giraud<sup>1</sup>, L. Cary<sup>1</sup>, H. Pauwels<sup>1</sup>, W. Kloppmann<sup>1</sup>, L. Aquilina<sup>2</sup>, S.  
Montenegro<sup>3</sup>, R. Hirata<sup>4</sup> et la COQUEIRAL team.**

<sup>1</sup> BRGM, 3 av. C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France

<sup>2</sup> CAREN Univ. Rennes 1 - Campus de Beaulieu - a. du Gal Leclerc, Bâtiment 15B, 35042 Rennes

<sup>3</sup> UFPE, Civil Engineering Department, 50740 Recife, Brésil

<sup>4</sup> USP, Instituto de Geociências - Rua do Lago, 562 ; Butantã - 05508-080 Sao Paulo, Brésil

En raison d'une pression démographique croissante, la région métropolitaine de Recife a subi d'importants changements d'utilisation des terres et de l'eau au cours des dernières décennies. Ces évolutions ont notamment généré une baisse spectaculaire des niveaux piézométriques, la salinisation et la contamination des eaux souterraines. Cette dégradation des ressources naturelles est liée à l'augmentation de la demande en eau, ponctuellement amplifiée par des périodes de sécheresse qui ont conduit à la construction de milliers de puits privés. La région de Recife apparaît ainsi comme un «point chaud» typique illustrant les problèmes des pays émergents tels que l'urbanisation, la répartition inégale de la richesse, la faiblesse des structures décisionnelles, les rapides développements industriel et touristique, induisant des pressions fortes sur les ressources en eau (quantité et qualité) dans le contexte des changements globaux sociétaux et environnementaux. Le projet COQUEIRAL a pour objectif d'étudier l'impact des activités humaines sur les aquifères côtiers surexploités en (1) analysant les pressions sur les ressources en eau souterraine et leurs raisons sociales et structurelles, (2) identifiant les sources et les mécanismes de la dégradation des ressources en eau souterraine en termes de qualité et de quantité, en se concentrant sur les processus physiques et chimiques en tant que vecteurs de la réaction du système aux pressions extérieures et (3) évaluant les impacts des changements globaux sur les ressources en eau à l'échelle régionale.

Un des objectifs du projet est d'élaborer des méthodes pour déterminer l'origine et les processus de salinisation, fondées sur une approche multi-traceurs (géochimie des éléments majeurs et traces et approche multi-isotopiques –  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ;  $\delta^{11}\text{B}$  ;  $\delta^{34}\text{S}$  &  $\delta^{18}\text{O}$  de  $\text{SO}_4$ ), pour identifier les sources et les voies de contamination, et pour évaluer le temps de séjour des eaux dans le système aquifère (gaz dissous CFC-SF6). Sur la base des contraintes dérivées de cette approche, des modèles hydrogéologiques conceptuel et numérique tridimensionnel seront élaborés pour appréhender le fonctionnement du système aquifère dans son contexte sociétal et sous l'influence de son environnement.

Dans le but d'améliorer les outils de gestion existants, les grandes lignes de meilleures pratiques seront proposées, basées sur des scénarios de l'évolution des ressources en eau souterraine issus des scénarios climatiques et sociologiques développés dans le projet. Les résultats obtenus dans le cadre spécifique de la région métropolitaine de Recife sont en grande partie transposables à des contextes similaires de «points chauds» de pressions humaine et climatique sur les ressources en eau souterraine dans les pays émergents.

COQUEIRAL est un projet ANR CEP&S / FACEPE / FAPESP. Il est labélisé par le Pôle de compétitivité DREAM Eaux et Milieux. Equipes partenaires françaises : BRGM, CeRIES Lille 3, CAREN Rennes 1, GEO-HYD, et brésiliennes : UFPE, USP, APAC, CPRM, INPE.