

Apport de la tomographie électrique à la modélisation des intrusions salines dans les aquifères côtiers. Exemple des aquifères gréseux des Îles-de-la-Madeleine (Québec, Canada)

Jean-Christophe COMTE ^{1,2} et Olivier BANTON ²

¹ HYDRIAD Solutions Technologiques, Valat de Gourgon, Rte de St-Geniès, 30730 St-Bauzély

² Laboratoire d'Hydrogéologie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 33 rue Pasteur, 84000 Avignon

Abstract

Seawater intrusion is the major risk of groundwater degradation in coastal regions. Density dependent flow modelling that simulates seawater/freshwater equilibrium constitutes a powerful tool for groundwater management. Representative models are however obtained only by a good knowledge on field hydrogeological features. The Electrical Resistivity Tomography (ERT) can provide relevant information about geological structure and seawater/freshwater interface position that is very useful for the parameterization, calibration and validation of mathematical models. ERT has been applied to sandstone aquifers of the Magdalen Islands (Canada) to assist the modelling of seawater intrusion and to determine the maximal pumping rates and the optimal well distribution.

Introduction

La salinisation des aquifères côtiers est un risque hydrogéologique majeur touchant les régions littorales ou insulaires, souvent densément peuplées et fortement tributaires des eaux souterraines (Cheng, 2003). Pour le maintien de la pérennité et de la qualité de la ressource, la modélisation mathématique de l'équilibre entre les eaux douces continentales et les eaux salées marines s'avère un puissant outil de gestion (Oude Essink, 2003). Il permet en particulier l'optimisation des prélèvements et de leur répartition spatiale. Toutefois, la représentativité et la qualité du modèle dépendent essentiellement de la caractérisation préalable du milieu. La tomographie électrique constitue à cet effet une méthode géophysique particulièrement pertinente puisqu'elle fournit d'une part une information géologique et structurale précieuse, et d'autre part une image relativement précise de la géométrie de l'interface eau douce / eau salée à un instant donné (Griffiths et Baker, 1993, Bates et Robinson, 2000). Ces deux informations sont de première importance pour la paramétrisation et la calibration des modèles d'écoulement densitaire. L'archipel canadien des Îles-de-la-Madeleine est un exemple type de région totalement dépendante de ressources d'eau souterraine vulnérables à la salinisation. La tomographie électrique a permis d'y dresser un état des lieux et le développement d'un modèle de gestion efficace de la ressource en eau.

Tomographie de résistivité électrique

La tomographie (ou imagerie) de résistivité électrique est une technique géophysique apparue à la fin des années 1980, dérivant des méthodes classiques du sondage et du traîné électrique et permettant une imagerie continue 2D ou 3D des variations de résistivité électrique du sous-sol (Dahlin, 2001). Grâce au développement récent d'outils performants d'acquisition automatisée (Dahlin, 1993) et d'inversion mathématique (Loke et Barker, 1996a et 1996b), cette technique est devenue relativement facile à mettre en œuvre et largement utilisée pour des applications industrielles et environnementales (Dahlin, 1996).

Du fait des contrastes marqués dans les propriétés électriques des matériaux géologiques, de l'eau douce et de l'eau salée, la tomographie électrique s'avère particulièrement adaptée à l'observation du biseau salé dans les aquifères côtiers. Dans la présente étude les acquisitions géophysiques ont été réalisées avec un système ABEM Lund (4 câbles de 100 m de long avec espace inter-électrode de 5 m). Les inversions mathématiques ont été effectuées à l'aide du logiciel RES2DINV (Loke et Baker, 1996a ; version 3.4).

Imagerie de l'interface eau douce / eau salée aux Îles-de-la-Madeleine

L'archipel canadien des Îles-de-la-Madeleine regroupe plusieurs îlots de diamètres inférieurs à 5 km, dont la plupart sont reliés entre eux par des cordons sableux. L'alimentation en eau potable des 13 000 habitants de cet archipel s'effectue exclusivement à partir des formations aquifères gréseuses du Permien, hydrauliquement très productives (transmissivités de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ permettant des débits de plusieurs dizaines de L/s).

Dans les secteurs non pompés, l'interface eau douce / eau salée régulière présente un fort pendage vers l'intérieur des terres. Cette interface, qui respecte presque partout la relation de Ghyben-Herzberg (1901), implique une profondeur de l'interface égale à 40 fois la hauteur piézométrique. De ce fait, l'interface plonge rapidement en dessous de la profondeur maximale d'investigation géophysique (environ 60 m) dès que la piézométrie dépasse 1,5 m.

Dans les secteurs d'habitat dispersé, le prélèvement sur la ressource s'effectue de manière diffuse par des puits individuels. La pression exercée par ces captages induit fréquemment une invasion d'eau saumâtre depuis la mer (exemple de la figure 1). Sur les îles plus urbanisées, des prélèvements très importants sont réalisés par des puits AEP à gros débits impliquent une forte modification des conditions naturelles d'écoulement et de la piézométrie. Dans ces secteurs, on constate presque toujours une intrusion saline depuis la mer ou une remontée saline depuis la base de l'aquifère. Ce cas de remontée saline est illustré sur la figure 1 (côté NW) et sur la figure 2.

Modélisation mathématique du biseau salé et des intrusions salines

Une modélisation mathématique des équilibres densitaires a été réalisée à l'aide du logiciel SUTRA (version 2D3D.1, Voss et Provost, 2002). La construction et la calibration du modèle a permis de retrouver les principaux traits de l'interface observée par géophysique dans les différents cas d'une absence de prélèvement, d'un prélèvement diffus (figure 1) et d'un pompage important et localisé (figure 2). De façon globale, les cônes de remontée sont très comparables entre les résultats du modèle et les observations géophysiques, exception faite des oscillations observables sur les profils géophysiques et attribuables aux artefacts d'inversion reliés aux hétérogénéités de résistivités dans les horizons supérieurs (sables et grès parfois très secs).

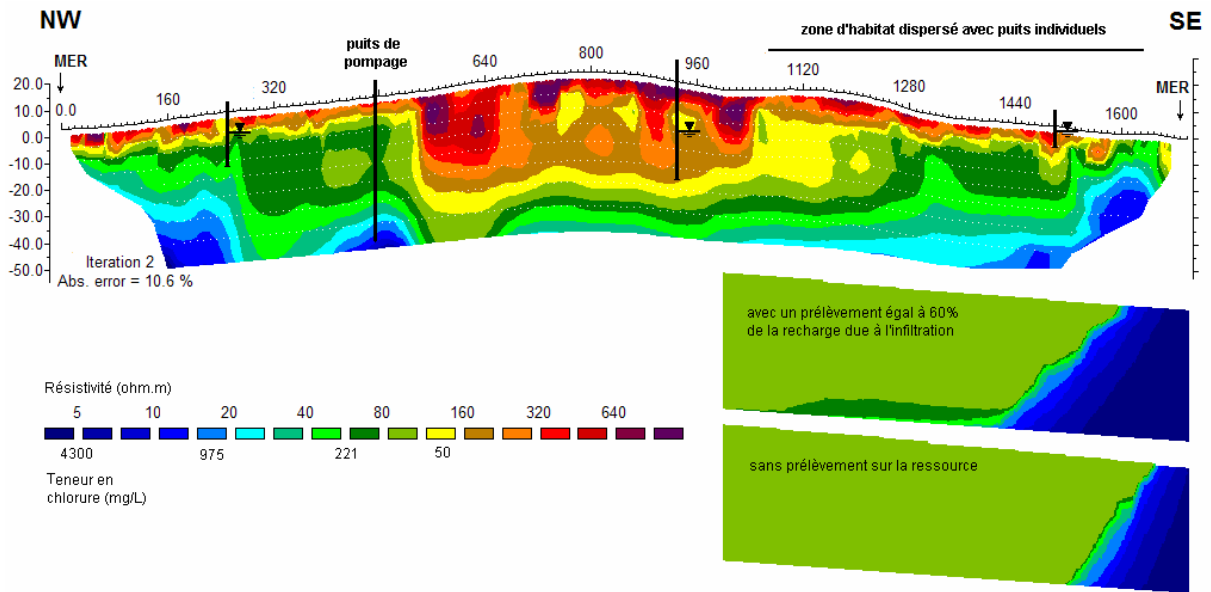


Figure 1 : Profil ERT (figure du haut en $\Omega.m$) et simulation SUTRA des concentrations (figure du bas en mg/l) pour le cas d'un prélèvement diffus sur la ressource (les relations entre résistivités et teneurs en chlorure sont exposées dans le texte)

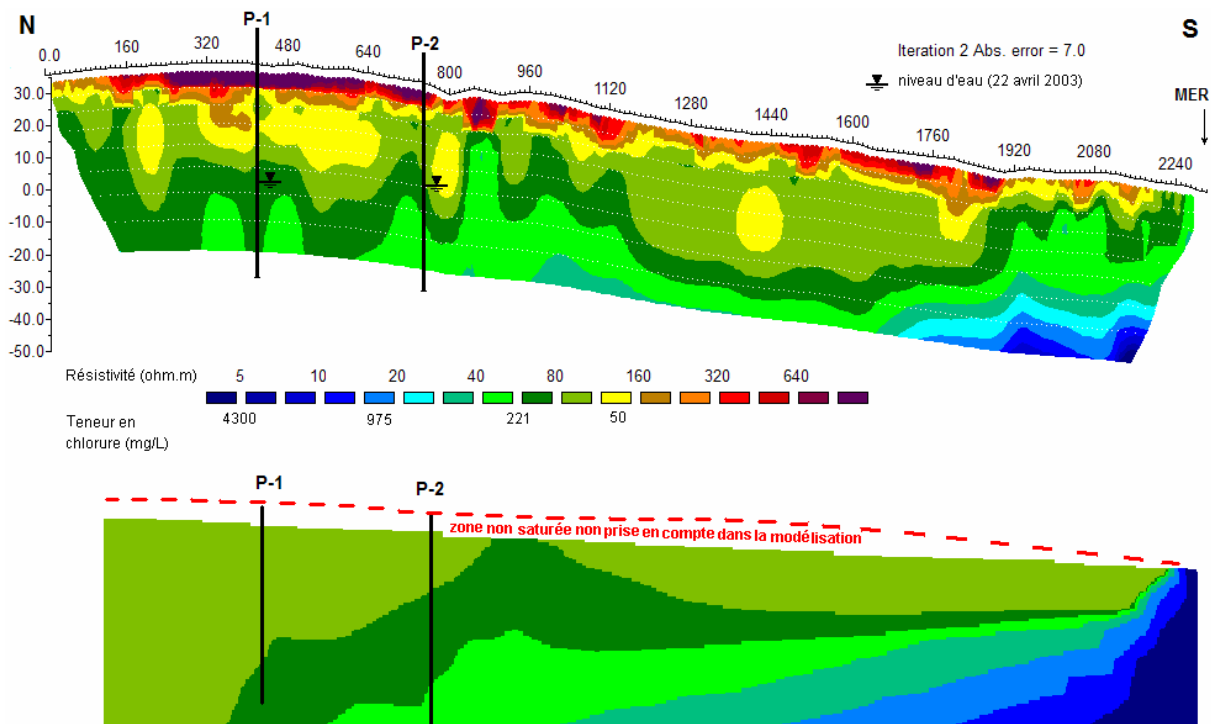


Figure 2 : Profil ERT (figure du haut en $\Omega.m$) et simulation SUTRA des concentrations (figure du bas en mg/l) pour le cas de deux puits de pompage à forts débits (les relations entre résistivités et teneurs en chlorure sont exposées dans le texte)

Dans ce dernier cas en particulier, le modèle restitue bien la dissymétrie observée des remontées salines, dont la position aval aux pompages résulte de l'effet de l'écoulement régional, qui transporte le biseau en direction de la mer et induit par ailleurs une zone de stagnation favorisant la diffusion du sel dans ce secteur. La corrélation entre conductivités électriques et concentrations en chlorure, utilisée dans les figures, a été calculée à partir de la relation : $\sigma_{\text{eau+roche}} = n \cdot \sigma_{\text{eau}} + \sigma_{\text{roche}}$ (Rhoades et al., 1976), où σ_{eau} est calculé en fonction de la concentration en chlorure de sodium et de la température ; $n = \text{porosité} = 30\%$; σ_{roche} du grès = 0,005 S/m.

Tel que le montrent les figures, les différents résultats obtenus des investigations géophysiques et de la modélisation mathématique sont cohérents entre eux et permettent après calage de préciser les hypothèses posées dans les deux cas. Les résultats présentés illustrent donc la pertinence d'une utilisation conjointe de la tomographie électrique et de la modélisation puisque chacune de ces deux méthodes permet de valider les résultats obtenus par l'autre méthode. Après une telle validation croisée du modèle et des interprétations géophysiques, différents scénarios de pompage peuvent alors être testés et conduire à l'élaboration d'un schéma de gestion durable de la ressource en termes de débits et de répartition spatiale des prélèvements.

Bibliographie

- Bates C.R. et Robinson R., 2000. Geophysical surveys for groundwater modelling of Coastal Golf Courses. *EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition – Glasgow, Scotland, 29 May – 2 June, 2000*. 1-5.
- Cheng A.H.D., 2003. Groundwater, Saltwater Intrusion in. *In Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker*. 404-406.
- Dahlin T., 1993. On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. *Doctoral thesis, ISRN LUTVDG/TVDG-1007-SE, ISBN 91-628-1032-4, Lund University*, 187 p.
- Dahlin T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First break*, 14 (7), 275-283.
- Dahlin T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers and Geosciences*, 27, 1019-1029.
- Griffiths D.H. et Barker R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Herzberg A., 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung (München)*. 44, 815-819, 842-844.
- Loke M.H. et Barker R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, (1), 131-152.
- Loke M.H. et Baker R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- Oude Essink G.H.P., 2003. Mathematical models and their application to salt water intrusion problems. *Coastal aquifer intrusion technology : Mediterranean countries. IGME. Madrid 2003*. ISBN 84-7840-470-8.
- Rhoades J.D., Raats P.A.C. et Prather R.S., 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 651-665.
- Voss C.I. et Provost A.M., 2002. SUTRA: A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 02-4231, version of June 21, 2003*, 260 p.