

# Hydrogéologie des milieux volcaniques côtiers sous climat aride.

## Modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti

Dr. Abdourahman Houmed-Gaba

*CERD-IST- Laboratoire d'Hydrogéologie et Hydrologie*

### Résumé

L'aquifère de Djibouti a été étudié dans le cadre du projet Mawari. Il est constitué de basaltes datés de 1 à 7 Ma mis en place lors de l'ouverture du golfe de Tadjourah. Les séries basaltiques sont fracturées essentiellement dans la direction de la déchirure du golfe N80 et N140. Les joints de refroidissement morcellent les séries en prisme de dimension décamétrique. C'est un aquifère côtier exploité par 30 forages qui alimentent la capitale. Les Sondages électriques ainsi que certains forages profonds indiquent un niveau d'eau douce et un niveau d'eau saumâtre sous jacente sur la majorité des sites prospectés mais pas partout. Les campagnes de tomographies électriques et de sondages Magnétotelluriques ont montré des niveaux conducteurs discontinus attestant d'une configuration discontinue des eaux saumâtres. Les coupes hydrologiques corroborent cette observation. La nappe est influencée par de l'eau de mer issue de l'intrusion marine, l'eau de pluie rechargeant la nappe et des eaux saumâtres. La qualité de l'eau distribuée est à la limite des normes de potabilité internationales avec près de 3 g/l en TDS. La modélisation numérique indique une recharge de 15.3 millions de m<sup>3</sup>/an. L'exploitation en constante augmentation atteint 11.1 millions de m<sup>3</sup>/an. Cet aquifère est soumis à un risque de surexploitation.

**Mot clés :** Aquifère basaltique, eau saumâtre, sondage électrique, modélisation hydrodynamique.

### Abstract

Djibouti aquifer has been studied under Mawari project. It is constituted with basalt of 1 to 7 My from de Tadjourah gulf opening event. The fissure is high at the direction of N80 and N140 which is Tadjourah gulf opening direction. The shrinkage cracks parcel up basalts into decametre scale prisms. Djibouti aquifer is exploited for capital water supply by 30 wells. Vertical electrical sounding and some deep wells shows freshwater at the top and brackish water at the bottom. Electrical tomography and MT sounding indicate discontinue brackish water. Hydrological profiles conclude at the same way. Water of this coastal aquifer is influenced by sea water intrusion at coastal area, underlying brackish water resulting from old sea water. The recharge occurs in the wadi bed during the flows period. Water quality is at the limit of drinkable water with 3g/l of TDS. Water balance result of numerical modelling show a 15.3 million m<sup>3</sup>/year of recharge. The pumping reaches 11.1 millions m<sup>3</sup>/year. This aquifer is under over-exploitation risk.

**Keys word :** basaltic aquifer, brackish water, vertical electrical sounding, hydrodynamic modelling.

## Introduction

La nappe côtière de Djibouti s'étend sur une surface de 600 km<sup>2</sup>. Elle est contenue dans les basaltes du Golfe et de Goumarré. Cet aquifère est en exploitation pour l'alimentation en eau potable de la capitale grâce à une trentaine de forages. Une vingtaine de puits d'observation et d'étude est également recensé. Le climat est aride à semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle dans la région est de 150 mm/an. Il n'existe aucun cours d'eau pérenne. La recharge se produit à partir des lits d'oueds durant les crues.

Les besoins en eaux augmentent et la ressource en eau reste limitée par les facteurs climatiques. Le contexte côtier augmente le risque de dégradation de la qualité des eaux de cet aquifère par l'intrusion marine. La région est soumise à une activité tectonique liée à la déchirure du rift est africain. Le projet Scientifique MAWARI qui a permis de réaliser ce travail a été financé par le Ministère des Affaires Etrangères et Européennes français et géré par le Centre International pour la Formation et les Echanges en Géosciences. Ce projet regroupe Djibouti, le Kenya et l'Ethiopie sur la problématique de la gestion durable des ressources en eau dans le système du rift Est-africain.

Des investigations multidisciplinaires regroupant, la géologie, la fracturation, la géochimie, la géophysique et l'hydrogéologie conduit sur l'aquifère de Djibouti apportent des nouvelles informations sur cet aquifère. Ces résultats ont été utilisés pour bâtir un modèle numérique de l'aquifère de Djibouti. Ce modèle est élaboré avec des hypothèses de travail, fondées sur les observations scientifiques.

## Géologie de l'aquifère

L'aquifère de Djibouti se trouve dans les formations volcaniques de la plaine de Djibouti qui couvrent une surface de 600 km<sup>2</sup>. Il s'étend vers le sud jusqu'à la frontière somalienne et il est bordé vers l'Ouest par les reliefs des zones d'Arta et du bloc d'Ali Sabieh. Sur cette zone affleurent trois séries volcaniques. Il s'agit de la série initiale du Golfe de Tadjourah affleurant aux bordures du Golfe de Tadjourah, de la série des basaltes Somali plus au Sud, et de la série des basaltes Goumarré intrusifs dans les Somali (figure 1).

Les basaltes du Golfe (2.8-1.0Ma) de la plaine de Djibouti sont essentiellement représentés par des coulées basaltiques provenant de l'axe actuel du Golfe auxquelles sont associées des intrusions magmatiques alimentées localement par des centres éruptifs de type fissural. Cette unité est souvent intercalée avec des niveaux sédimentaires détritiques d'origine marine ou continentale, des scories et des paléosols (Gasse et al. 1985). Elle est confinée sur un plateau côtier fracturé de 10x30km de dimension limité au sud, le long de l'ouéd Ambouli, par les basaltes Somali plus anciens.

Les basaltes Somali se présentent sous forme d'empilement de coulées basaltiques de 1 à 10 m d'épaisseur qui sont souvent séparées par des niveaux de brèches et/ou par des horizons de lapilli stromboliens. Les basaltes Somali datés

de 7.2 - 3.0 Ma couvrent toute la partie SE de la plaine de Djibouti et s'étendent en Somalie. Cette série est plus érodée que les basaltes du Golfe mais elle est relativement peu fracturée (Chessex, 1974).

Les basaltes Goumarré ont été injectés dans la série des basaltes Somali par un volcanisme fissural le long des accidents, globalement, parallèle à l'axe actuel du Golfe de Tadjourah (Daoud, 2008). Les basaltes Goumarré forment ainsi trois corridors tectono-magmatique découpant les basaltes somali et comprenant un essaim de cônes volcaniques et des intrusions de dykes et sills, daté de 1.7-2.4 Ma. Les formations des basaltes Somali, des basaltes du Golfe et des basaltes Goumarré forment le substratum de l'aquifère basaltique de Djibouti.

L'analyse géochimique des cuttings recueillis sur le forage pk20-2 a montré la présence de basalte somali à 223m de profondeur sous les basaltes du golfe (Daoud, 2008).

### Fracturation des basaltes

La fracturation des basaltes de la région de la nappe de Djibouti a été étudiée pour l'essentiel par Vincent, 1990 ; Jalludin et Arthaud, 1993 et Daoud, 2008. Ces études sont basées sur l'analyse des photographies aériennes et des images satellites.

La direction prépondérante se situe entre N80 et N140 correspondant à la direction de la déchirure du golfe de Tadjourah. Une deuxième direction complémentaire entre N20 et N50 est également observée. Les failles N80 et N140 descendent les coulées avec des rejets verticaux faibles au sud mais qui prennent de l'importance vers les côtes. La densité des failles normales va également en augmentant à l'approche de la mer. Des alignements de quelques petits cônes de scories avec des coulées limitées prennent naissance sur les failles N140 (figure 2).

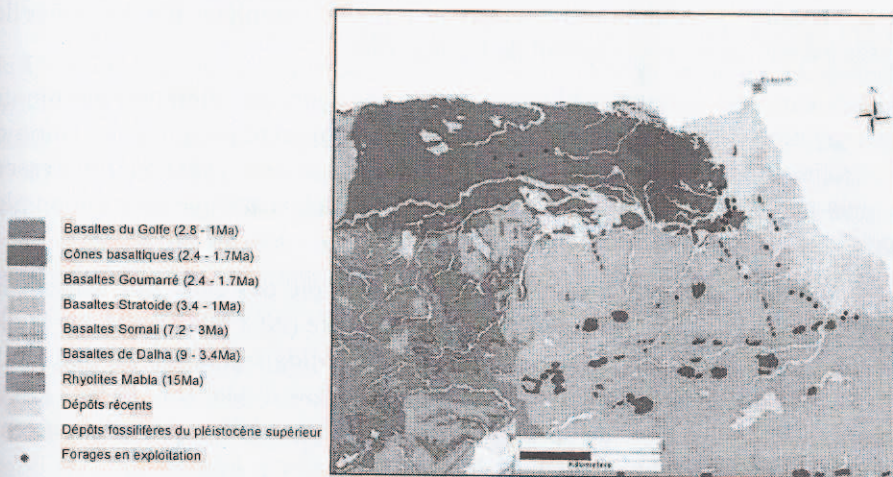


Figure 1 : Carte géologique de la région de Djibouti

Les failles peuvent avoir un rôle de drain préférentiel d'écoulement lorsqu'elles sont ouvertes ou au contraire freiner l'écoulement lorsqu'elles sont colmatées et deviennent des barrières imperméables.

Globalement il est convenu que la densité de fracturation est élevée sur l'ensemble de l'aquifère. La petite fracturation correspondant aux joints de refroidissement des basaltes est active sur l'écoulement au moins autant que les failles. Tous ces éléments d'observation semblent conduire à un système à écoulement continu.

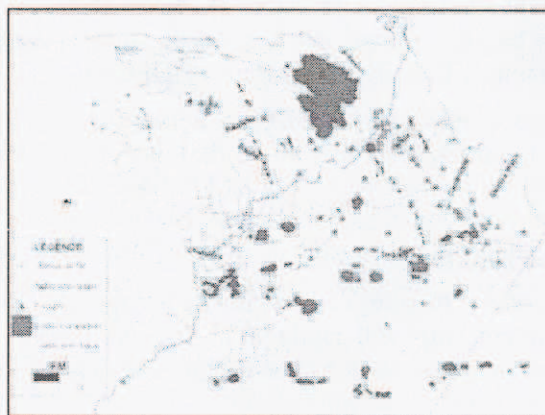


Figure 2 : Carte de fracturation 1/30000 d'après J. Vincent. 1990.

### Géochimies des eaux de l'aquifère de Djibouti

Des analyses chimiques et isotopiques des eaux de la nappe de Djibouti ont été faites par de nombreux auteurs BGR, 1982 ; Fontes et Adams, 1984 ; Fontes, 1987 ; Gamaladin, 1988 ; Hafiz, 1993 ; Jalludin et Ibrahim, 1997 ; Bouh, 2006. Le CERD dispose d'un suivi chimique de la nappe de Djibouti depuis 1985. La synthèse des résultats géochimiques des eaux de Djibouti complétée par des nouvelles analyses est exposée dans le travail de Bouh (2006).

Les eaux ont un faciès chloruré alcalin. Les analyses chimiques ont montré une dégradation de la qualité chimique de l'eau notamment par l'augmentation de la minéralisation totale et de la conductivité électrique entre 1985 et 2003 essentiellement par l'enrichissement en NaCl. Il est aussi remarqué une salinisation plus importante près de la côte. Ceci témoigne de l'intrusion marine progressive.

Cependant, sur certains sites éloignés de la côte des eaux très salées sont trouvées. Il s'agit des forages Guelilé à 4 km de la côte (20.8 mS/cm), HG (=Hidka Guissiyed) à 12 km, Naasley à 2 km (7.36 mS/cm), Midgaoune2 à 5 km (26.1 mS/cm) et les forages du site expérimental hydrogéologique d'Atar (SEHA) à 5 km de la côte (20.7 mS/cm). Pour comparaison l'eau de robinet à Djibouti ville présente une conductivité électrique moyenne de 3.5 mS/cm.

La présence des eaux saumâtres mises en évidence dans la thèse de Bouh (2006) et citées dans plusieurs travaux antérieurs (Gamal-Eldin, 1988 ; Brunke,

1993) permettraient d'expliquer l'augmentation de la salinité des forages situés à plusieurs kilomètres de la côte. Il s'agit d'eau de mer ancienne piégée sur le continent et qui a eu le temps d'évoluer par interaction physico-chimique avec la roche basaltique.

Les eaux de la nappe de Djibouti peuvent grossièrement être schématisées comme un mélange entre l'eau de mer, l'eau de pluie rechargeant la nappe et les eaux saumâtres sous-jacentes. Les échantillons d'eau prélevés sur les forages se positionnent entre la droite de dilution marine et une autre droite passant par le pôle chimique de l'eau saumâtre représenté par exemple, par le forage HG. Les forages à eaux saumâtres, se dégagent nettement de la tendance eau de mer actuelle et forme un pôle chimique distinct (figure 3).

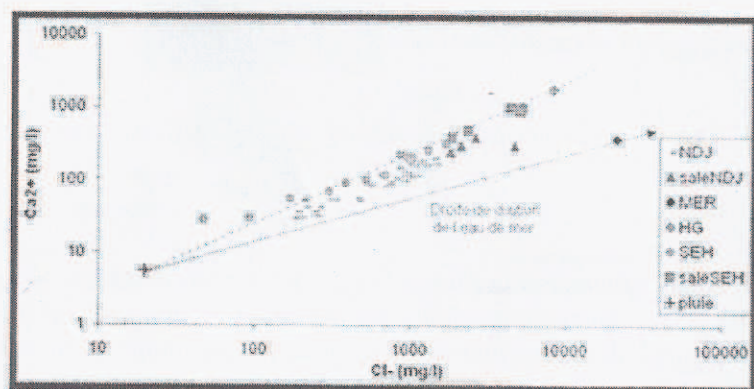


Figure 3 : Diagramme CaCl de répartition des eaux de Djibouti

### Prospection géophysique

Plusieurs séries de campagne géophysique ont été conduites sur l'aquifère de Djibouti pour la reconnaissance du sous-sol et la recherche d'eau souterraine. Arlab, 1984, CGG, 1960 ; 1965 ; 1972 ; 1987, BGR, 1990 ; Tractebel Lavalin: 1992 ; Mawari, 2006 ; 2007. L'essentiel de ces campagnes ont appliqués la méthode de sondages électriques verticaux sauf pour le travail du projet Mawari qui a utilisé les techniques Magnétotellurique (MT). Dans la compréhension de la géométrie qui nous intéresse, les résultats des sondages électriques de la campagne CGG 1987 et les résultats de la tomographie électrique Mawari 2007 effectuée sur le SEHA sont utilisés (Magareh, 2009).

Un sondage électrique correspond à l'analyse, en un endroit donné, des variations de la résistivité électrique des terrains en fonction de la profondeur. Les forages ne sont pas assez nombreux et surtout très mal repartis sur l'ensemble de l'aquifère car ils sont disposés essentiellement sur la plaine côtière où la nappe est moins profonde. Les sondages électriques verticaux constituent un outil très utile pour accéder à la dimension verticale d'un système géologique lorsque les

forages ne sont pas suffisants. Ce travail est basé sur 135 sondages interprétés en terme d'horizon électrique suite au traitement d'inversion 1D effectué par l'équipe CGG 1987 à l'aide du logiciel d'interprétation 1D «SEAM». Ces 135 sondages sont disposés selon 8 profils électriques ; 4 de direction Est-Ouest et 4 Nord-Sud. Les profils sont constitués de 7 à 23 sondages électriques sur une longueur de 9 à 20 km. La profondeur d'investigation des profils est entre 60m et 300m. De plus onze sondages électriques étalons (S.E.E.) ont été réalisés à proximité de forages ou de piézomètres existant pour déterminer une correspondance entre les résistivités et les niveaux lithologiques. La profondeur de ces forages va de 22m pour le forage de Doua à 150m pour le forage F9b (Figure 4).

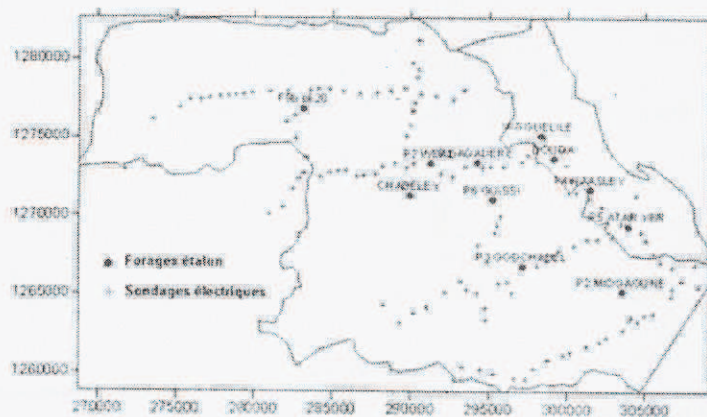


Figure 4 : Carte de disposition des profils électriques et des forages étalon

Sur les 135 sondages électriques formant les 8 profils électriques, 104 montrent une disposition des horizons électriques représentée sur la coupe schématisée de la figure 5. Les horizons électriques sont issus de l'interprétation 1D de CGG 1987 et les niveaux lithologiques correspondant ont été déterminés par les observations sur les 11 forages étalons.

Un premier niveau de résistivité très variable entre 1 et 4000 ohm.m correspondant au niveau superficiel de basalte altéré ou aux dépôts sédimentaires. Puis un faible niveau de résistivité compris entre 10 à 400 ohm.m signalant respectivement un niveau argileux ou du basalte massif sain. Un troisième horizon est visible sur les sondages électriques avec des résistivités allant de 86 à 26 ohm.m correspondant sur les logs lithologiques des forages étalons à un niveau de basaltes ou scories ou sédiments saturé en eau. Plus bas une interface de résistivité se distingue nettement avec des valeurs inférieures à 25 ohm.m. Ce niveau a été mis en corrélation avec un niveau imbibé d'eau saumâtre.

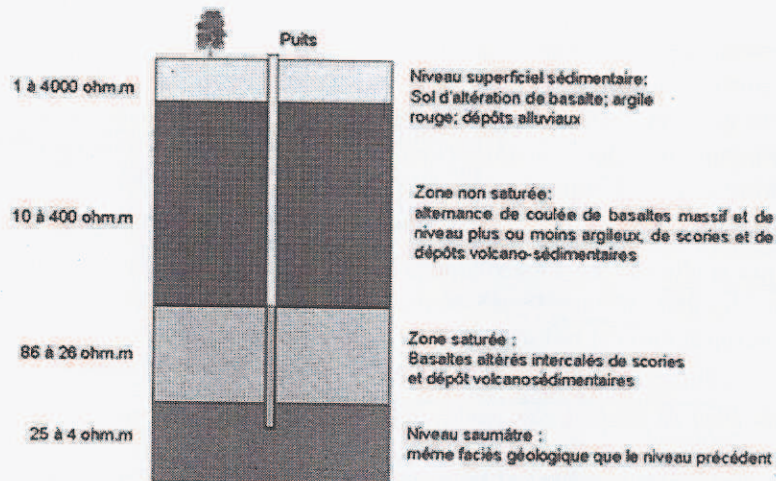


Figure 5 : Coupe schématique de l'aquifère basaltique de Djibouti

Les 31 sondages restant sur les 135 exposent une configuration non représentée les forages existants. Aucune interprétation géologique ne peut être adoptée par manque de log lithologique de forage présentant ces cas de figure.

Les études géophysiques ont mis en évidence un niveau très conducteur en profondeur. Ce niveau a été identifié sur plusieurs forages comme étant des eaux saumâtres.

L'un des objectifs des prospections géophysiques conduites dans le cadre du projet Mawari est la détermination de la géométrie de ce conducteur profond. La première approche concernant la géométrie de l'aquifère sur la base d'un traitement statistique des résultats des sondages électriques des études antérieures a consisté à appliquer l'hypothèse de continuité spatiale de la nappe saumâtre en générant par interpolation géostatistique une surface saumâtre sur l'ensemble de l'aquifère basaltique.

Les dernières études se sont intéressées essentiellement à la zone du site expérimental hydrogéologique d'Atar (SEHA) où 5 grands profils de tomographie de 640m et 8 petits profils de 320m ont été réalisés pour la reconstruction 2D d'un modèle du sous sol.

Les résultats de la tomographie sur le SEHA montrent des niveaux conducteurs discontinus, sous forme de poches d'échelle kilométrique. Les eaux saumâtres formeraient des poches de faible envergure. Comme les résultats de la tomographie concernent un espace restreint, il est difficile de tirer des conclusions sur la structure de la nappe saumâtre à l'échelle de l'ensemble de l'aquifère (figure 6).

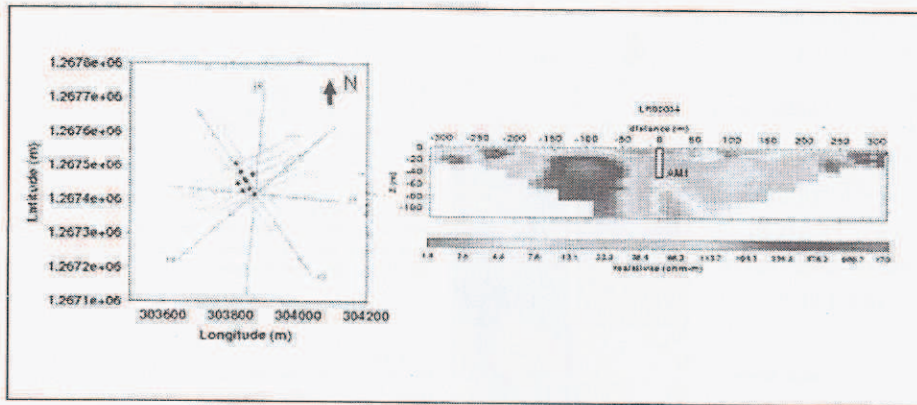


Figure 6: Plan de position des panneaux et modèle 2D sur le panneau P4 (Magarreh, 2009).

NB : les points représentent les forages et piézomètres du SEH : le panneau P4 est centré sur le forage AMI.

Une campagne de sondages magnétotelluriques (MT) de 18 points a été conduite sur un large périmètre de 33 x 26km de l'aquifère de Djibouti. Un modèle 3D a été élaboré sur la base de ces données. Ces résultats sont à prendre avec précaution compte tenu de la faible couverture géographique des campagnes de sondages mais là aussi une configuration discontinue des eaux saumâtres se dessine (figure 7).

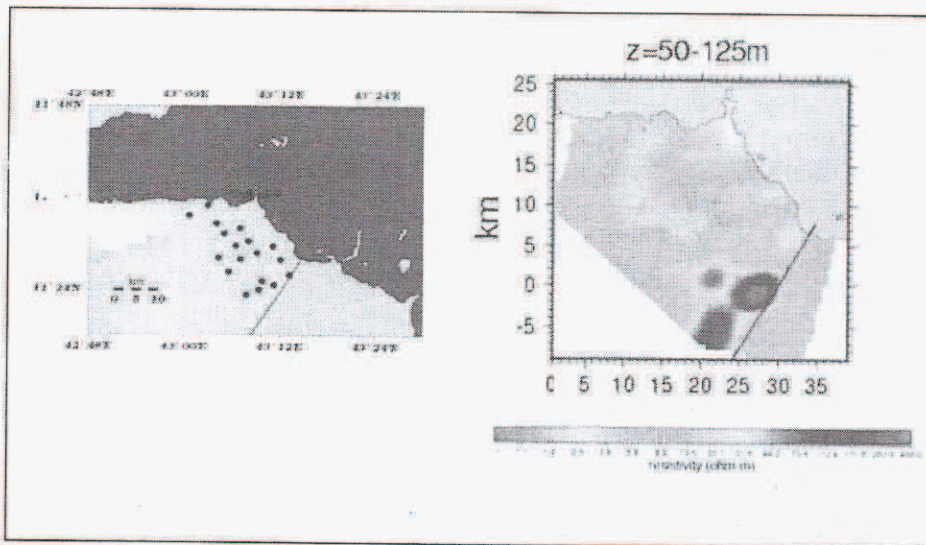


Figure 7: plan de position des sondages MT et modèle 3D de 50-125m de profondeur (Magarreh, 2009).

NB : les points représentent les 18 sondages MT

## Coupes hydrologiques

Pour analyser le comportement des eaux saumâtres dans l'aquifère il a été tracé deux coupes entre les trois sites qui captent les eaux saumâtres (figure 8). La coupe E-O passe par le forage HG et le forage AM3 du SEHA et la coupe NE-SO passe par le forage HG et Guelilé. Le forage HG touche l'eau saumâtre à une cote de -38m tandis que le forage AM3 capte ces eaux saumâtres à -15m d'altitude et le forage Guelilé à -39m.

Si l'on devait supposer que la nappe saumâtre est continue elle aurait un sens d'écoulement en contradiction avec celui connu dans l'aquifère de Djibouti. Cette observation est un argument supplémentaire pour signifier la configuration discontinue des eaux saumâtres sous-jacentes à la nappe d'eau douce.

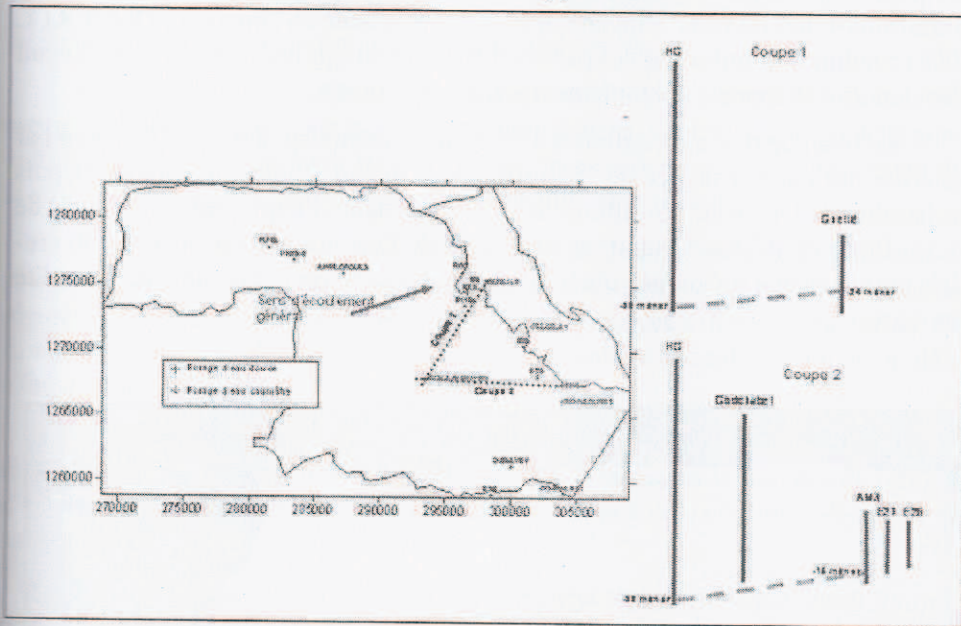


Figure 8 : Plan de position et coupes schématiques de l'aquifère en direction NE-SO, E-O

## Modélisation hydrodynamique de l'aquifère basaltique de Djibouti

Les investigations conduites sur cet aquifère ont démontré la complexité du système. Les études structurales et géologiques permettent d'établir une cartographie du réseau des fractures mais sans produire d'information sur leur hydraulicité.

Les diverses observations sur le terrain, sur les photos aériennes et sur les images satellites permettent de considérer la fracturation comme suffisamment dense et d'en déduire que cet aquifère peut fonctionner comme un système poreux équivalent.

Les études géophysiques confirment l'existence d'eaux saumâtres sous la nappe d'eau douce mais ne permettent pas de produire une géométrie de ces eaux sur l'ensemble de l'aquifère à cause de la couverture parcellaire des sondages.

Un modèle numérique de l'aquifère de Djibouti a été construit en exploitant les connaissances disponibles sur ce système et en formulant des hypothèses simples. Cet aquifère est très hétérogène due à la fracturation et à l'altération des basaltes et aux intercalations des scories et des sédiments. Ce modèle est un travail préliminaire qui permet de synthétiser les données disponibles et de compléter les lacunes (champs de perméabilité, conditions aux limites, relations avec les formations de Dalha et quantification du bilan de flux).

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel GW Vistas™ V5 (Rumbaugh, 2007). Etant donné la forte hétérogénéité de l'aquifère, la méthode des points pilotes combinée au module PEST a été appliquée (figure 9). L'approche des points pilotes permet de conserver la variabilité spatiale de la distribution de la transmissivité. Le code d'inversion PEST (Parameter ESTimation ; DOHERTY, 2002) conduit l'optimisation des paramètres par itérations successives en exécutant plusieurs fois le modèle d'écoulement à chaque itération.

Le bilan de flux a été estimé à 17.6millions de m<sup>3</sup>/an, avec une recharge par les crues des oueds calculée de 15.3millions de m<sup>3</sup>/an et une alimentation depuis les basaltes de Dalha de 2.3millions de m<sup>3</sup>/an. Le débit d'exploitation actuel est de 11.1millions de m<sup>3</sup>/an. L'aquifère basaltique de Djibouti a atteint une limite cruciale qui rend cette ressource vulnérable à une dégradation irréversible de la qualité des eaux.

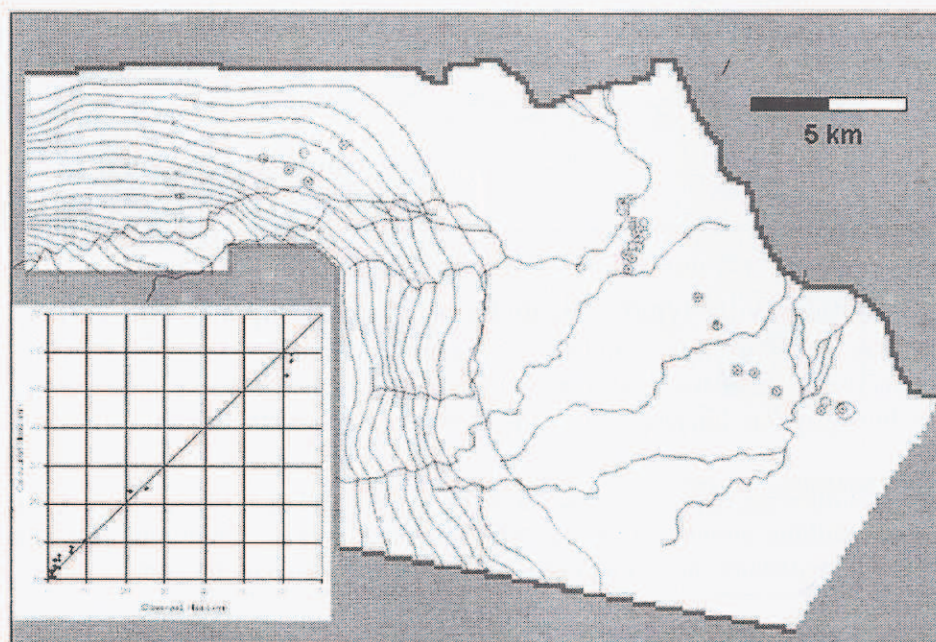


Figure 9 : Carte schématique de distribution des poches saumâtres sur l'aquifère

## Conclusion

La nappe de Djibouti présente une grande importance pour la ville de Djibouti. L'aquifère de Djibouti est constitué de basalte formant plusieurs séries de coulées avec des intercalations de sédiments et de scories. Les observations recueillies à partir de différentes études montrent un aquifère avec une géométrie complexe.

La fracturation est très intense, liée à l'activité tectonique importante générée par l'ouverture du golfe de Tadjourah. Une fissuration encore plus intense, de l'ordre du mètre est représentée par les prismes de refroidissement des coulées basaltiques. L'aquifère peut être considéré continu étant donné la forte densité de fracturation des basaltes.

Les eaux de l'aquifère de Djibouti sont de type Chloruré-alcalin, liée aux mélanges avec l'eau de mer et une eau saumâtre fossile.

Ces eaux saumâtres seraient confinées sous forme de poches isolées de dimensions kilométriques sous jacentes aux eaux douces. La détermination de la géométrie de ces eaux saumâtres est un exercice nécessaire pour la compréhension de la structure du système aquifère et pour la gestion de la ressource.

L'approche de modélisation utilisée dans ce travail, basée à la méthode des points pilotes combinée aux fonctionnalités de paramétrisation non-linéaire et de régularisation du logiciel d'inversion PEST, s'est avérée efficace pour traiter les fortes hétérogénéités de l'aquifère basaltique. Un calage très satisfaisant du modèle a été obtenu.

En terme de bilan de flux, les résultats du modèle montrent que l'exploitation de cet aquifère a atteint une limite cruciale. Augmenter le nombre de forages d'exploitation et leurs débits pourraient conduire à une dégradation irréversible de sa ressource.

Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour améliorer ce modèle et produire un modèle 3D à densité variable afin d'intégrer l'intrusion marine et les eaux saumâtres.

## Remerciements

Ce travail a été financé par le ministère des Affaires Etrangères Français dans le cadre du projet MAWARI. Nos plus vifs remerciements à Mr Pinard, Directeur et Mlle Orlyk secrétaire du CIFEG.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bouh H. O., 2006. Etude de l'aquifère basaltique de Djibouti et des aquifères adjacents : Approche hydrochimique et isotopique. Thèse de doctorat, université de Paris-Sud, 150p.
- Brunke H.-P., 1993. Modélisation par simulation numérique de l'écoulement des eaux souterraines dans la nappe de Djibouti. Coopération technique allemande CHA. Projet N°89.2138.9. Rapport 64p.

- CHA (Coopération Hydrogéologique Allemande)=BGR. 1982. Inventaire et mises en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti. 4 vol.
- CGG. 1987. Etude géophysique et analyses géochimiques de la nappe de Djibouti. Minist. Agricult. et Dévelop. Rural. Service du Génie Rural, Djibouti. Rapport d'étude 56 p. et 18 planches.
- Daoud M. A., 2008. Dynamique du rifting continental de 30Ma à l'actuel dans la partie Sud Est du Triangle Afar. Tectonique et magmatisme du rift de Tadjourah et des domaines Danakils et Ali-Sabieh, République de Djibouti. Université de Bretagne Occidentale, thèse de doctorat, 219p.
- Fontes J. Ch., Pouchan P., Saliege J.F. et Zuppi G.M. 1980. Environmental isotope study of groundwater systems in the Republic of Djibouti. In 'aride zone hydrology: Investigations with isotope techniques', Proceeding of an advisory Group Meeting 6-9 nov. 1978, International Atomic Energy Agency, Vienne, Autriche, p. 236-262.
- Gamal El Din H. A., 1988. Etude de l'aquifère basaltique de la zone de captage de la ville de Djibouti. Thèse de Doctorat, Université de Fribourg, Allemagne.
- Gasse F., Fournier M., Richard O. et Ruegg J.C. 1985. Carte géologique de la République de Djibouti à 1:100 000. feuille de Tadjourah. Notice. ISERST. Ministère Français de Coopération. Ed. ORSTOM, Paris.
- Gasse F., Fournier M., Richard O. et Ruegg J.C. 1983. Carte géologique de la République de Djibouti à 1:100 000. feuille de Djibouti. Notice. ISERST. Ministère Français de Coopération. Ed. ORSTOM, Paris.
- Houmed-Gaba A., 2009. Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti. Université de Poitiers, Rapport de Thèse, 215p.
- Jalludin M., 1993. Propriétés géométriques et hydrodynamiques des roches volcaniques fissurées sous climat aride. République de Djibouti. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 261 p.
- Joelle Vincent, 1990. Carte tectonique de la région de Djibouti. Rapport d'étude, 35p.
- Loke M. H., 1996-2002. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. All rights reserved. 132p.
- Magarreh M. H., 2009. Imagerie géoélectrique tri-dimensionnelle en contexte volcanique : Application à l'étude des aquifères de Djibouti. Université de Brest Occidentale, 206 p, Thèse de Doctorat.
- SEAM. 1987. Logiciel d'amélioration de diagramme de sondage. Compagnie Général de Géophysique.
- Surfer version 8.00. Copyright © 1993-2002. GoldenSoftware Inc. Surface Mapping System  
www.mawari.net