

## *Étude d'un aquifère salé de l'Altiplano bolivien par prospection TDEM*

Roger Guérin<sup>1</sup>, Marc Descloitres<sup>2</sup>, Anne Coudrain-Ribstein<sup>3</sup>, Amal Talbi<sup>3</sup>,  
Edson Ramirez<sup>4</sup>, Robert Gallaire<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Département de Géophysique Appliquée, UMR 7619 Sisyphe, UPMC, Paris, France.

<sup>2</sup>Laboratoire de Géophysique, IRD (ex-Orstom), Bondy, France.

<sup>3</sup>Laboratoire de Géologie Appliquée, UMR 7619 Sisyphe, UPMC, Paris, France.

<sup>4</sup>Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA, La Paz, Bolivie.

<sup>5</sup>IRD, La Paz, Bolivie.

### ABSTRACT

*The french research program « PNRH Altiplano » is dedicated to the study of the main aquifer in the central part of the Altiplano in Bolivia. A TDEM survey has been carried out in order to investigate the global resistivity arrangement related to the aquifer. Three ranges of resistivities can be identified : 0.1-1  $\Omega.m$  (clays and brines), 1-10  $\Omega.m$  (clays and salt water), 10-50  $\Omega.m$  (clayey to sandy formations). The conductive substratum, outcropping in the south-east part, deepens north-westward to depths of more than 250 m and is related to impermeable layer.*

### INTRODUCTION

Le Programme National de Recherche en Hydrologie (PNRH) « Altiplano » a pour objectif de décrire l'évolution spatiale et temporelle de la géochimie de l'eau souterraine dans la partie centrale du bassin versant endoréique de l'Altiplano (fig. 1). La zone d'étude a été dans le passé (11 000 ans BP) recouverte par le lac salé Tauca. Depuis cette période, le retrait vers le sud puis la disparition de ce lac ont favorisé la recharge progressive par le nord de l'aquifère salé par des eaux plus douces, d'origines diverses (ruissellements temporaires près des piedmonts et rio Desaguadero, fleuve actuellement pérenne qui est un effluent du lac Titicaca). Cette recharge s'effectue actuellement dans un contexte climatique semi-aride. Une première modélisation de la dynamique sur 10 000 ans des flux hydriques et des chlorures a été esquissée grâce à des données issues d'une centaine de piézomètres (Coudrain-Ribstein *et al.*, 1995). Cependant le modèle obtenu peut être mieux contraint par la connaissance de l'épaisseur de l'aquifère. En conséquence, l'objectif de l'étude géophysique entreprise en août 1998 est d'évaluer les épaisseurs des formations en présence et repérer les zones les plus

salées de l'aquifère. Une première étude par sondages électriques à courant continu a montré que cette méthode ne permettait pas une pénétration suffisante en raison des faibles résistivités (1 à 5  $\Omega$ .m) des terrains superficiels et ce, pour des longueurs de ligne de 500 m. Notre choix s'est porté vers la méthode de sondages électromagnétiques en domaine temporel (Time-Domain Electromagnetism, TDEM ; McNeill, 1994 ; Descloitres, 1998).

## PROSPECTION

La zone prospectée s'étend sur 2000 km<sup>2</sup>. En 15 jours de terrain, 100 sondages TDEM ont été réalisés. Ils sont répartis sur l'ensemble de la zone selon huit profils (fig. 1). L'équipement utilisé est un PROTEM 47 (Geonics Ltd.), spécialement conçu pour la sub-surface (première fenêtre de mesure à 6.8  $\mu$ s). La configuration géométrique adoptée comporte une boucle d'émission de 100 x 100 m et une bobine de réception de 15 x 15 m placée au centre. Avec un courant injecté de 2 A, cela permet une investigation sur plus de 250 m de profondeur dans ce contexte particulier (terrain conducteur, bruit EM extérieur extrêmement faible).

## INTERPRÉTATION

Le contexte géologique est celui d'un bassin sédimentaire. Les terrains en présence sont des graviers, des sables et des argiles. La mesure des trois composantes du champ EM secondaire a confirmé l'absence de signal notable sur les composantes horizontales, ce qui est caractéristique d'une structure 1D. Les données sont en conséquence interprétées en modèle tabulaire, avec le logiciel d'inversion 1D TEMIX (Interpex). Pour chaque sondage, nous avons conduit en première approche deux interprétations distinctes : i) une inversion avec un modèle comportant le minimum de terrains nécessaire à l'ajustement correct de la courbe expérimentale (RMS < 5 % en général), avec les domaines d'équivalence, et ii) une inversion lissée avec 15 terrains d'épaisseurs fixées. A titre d'exemple, la figure 2 présente les interprétations des sondages TDEM 5 et 41. Le sondage 5 auprès du seul forage dépassant 100 m de profondeur permet de relier les résistivités calculées avec la géologie de cette zone : les terrains à forte proportion de graviers et de sables, contenant une eau de 5  $\Omega$ .m, ont des résistivités de 20 à 30  $\Omega$ .m environ tandis que le substratum argileux présente des résistivités de l'ordre de 10  $\Omega$ .m. Le sondage TDEM 41 révèle un substratum encore plus conducteur, de l'ordre de 0.1  $\Omega$ .m. Cette valeur très basse est néanmoins réaliste et est attribuée à des argiles et des saumures. En effet, un sondage TDEM réalisé sur le Salar d'Uyuni au sud révèle que ces terrains ont des résistivités de 0.3  $\Omega$ .m sur plus de 60 m d'épaisseur. L'interprétation de l'ensemble des sondages TDEM permet de dégager les gammes de résistivité suivantes : 0.05-1  $\Omega$ .m : argiles et saumures, 1-10  $\Omega$ .m : argile et eaux salées, 10-50  $\Omega$ .m : argiles et/ou sables (eaux moins salées ou douces). L'interprétation lissée permet de dresser des cartes de résistivité selon la profondeur représentées figure 3. En surface, les terrains plus résistants prédominent dans la partie ouest, et sont attribués à un aquifère peu ou pas salé au sein de sable argileux, passant rapidement vers l'est à des terrains de surface très argileux, dont la résistivité diminue vers le sud-est, alors que la conductivité des eaux augmente. Cet aquifère semble se prolonger vers le sud. En profondeur, la tendance majeure est l'approfondissement du substratum conducteur (et

probablement imperméable) depuis une situation affleurante au sud-est vers le nord-ouest, où il atteint des profondeurs supérieures à 250 m.

## CONCLUSION

Les premiers résultats de la prospection TDEM confirment l'intérêt de la méthode pour reconnaître les terrains conducteurs de ce bassin versant sur des épaisseurs de plus de 250 m pour des dispositifs peu étendus en surface, ce qui réduit le temps de prospection. L'aquifère de surface le moins salé est repéré à l'ouest de la zone. Le substratum reconnu par les sondages est très conducteur et devrait former une limite probablement importante à la circulation des eaux souterraines, limite dont la géométrie pourra être intégrée dans le programmes de modélisation des écoulements des eaux souterraines.

## Remerciements

Ce projet a été financé dans le cadre du Programme National de Recherche en Hydrologie de l'INSU. Les auteurs remercient vivement Julio Cesar Salinas, Manuel Guzman, Andres Osco, Felix Fernandez et l'équipe de l'IRD à La Paz pour leur contribution lors de la prospection.

## RÉFÉRENCES

- Coudrain-Ribstein A., Loosemore T., Rochat P., Quintanilla J., Younger P. (1995) - Use of a groundwater model in assessing possible sources of salinity on the central Bolivian Altiplano. Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality. Proceedings of a Boulder Symposium. IAHS Publ., n° 227.
- Descloitres M. (1998) - Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM). Applications à la recherche d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap-Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion). Thèse de l'Université de Paris 6, 238 p.
- McNeill J.D. (1994) - Principles and applications of time domain electromagnetic techniques for resistivity soundings. Geonics, technical note TN 27, Missisauga, Ontario.

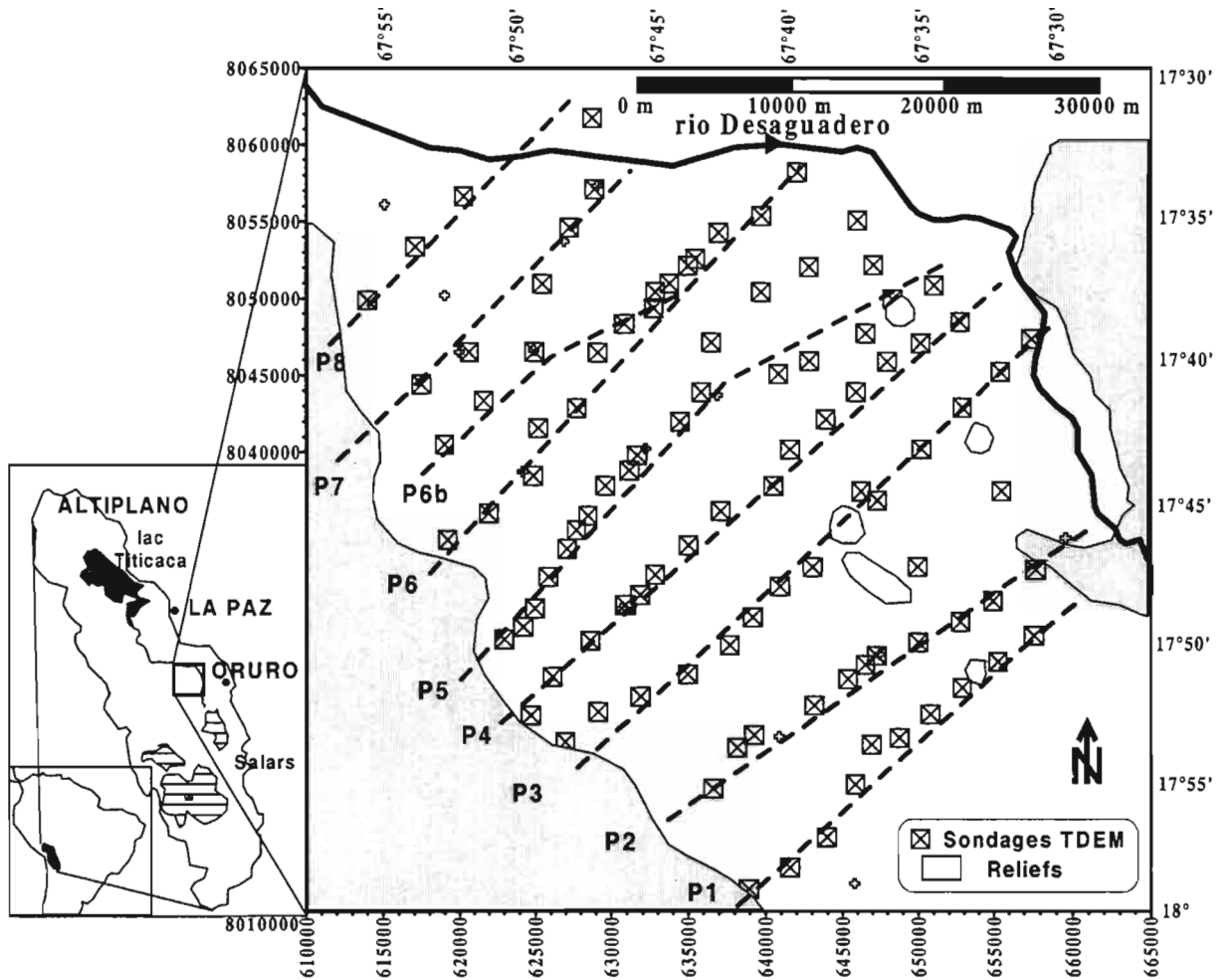


Fig. 1 - Localisation de la zone d'étude et des sondages TDEM.

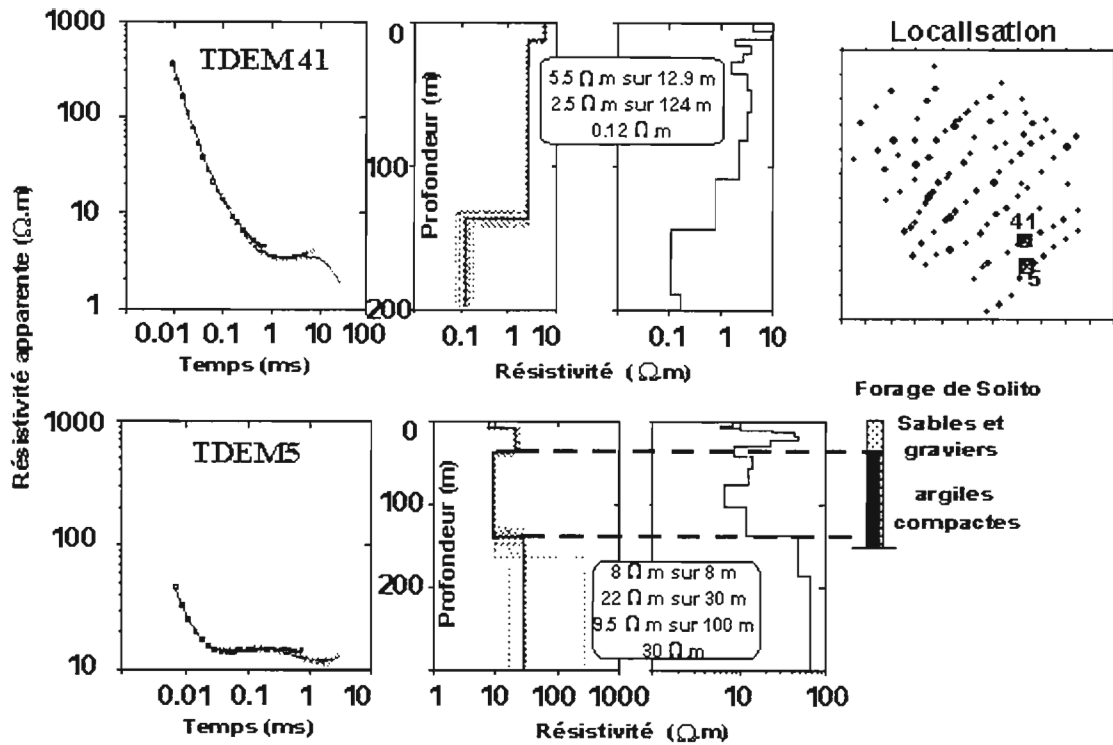


Fig. 2 - Sondages TDEM 5 et 41 (courbes de sondage, interprétation avec minimum de terrains et équivalences, interprétation lissée avec épaisseur fixe).

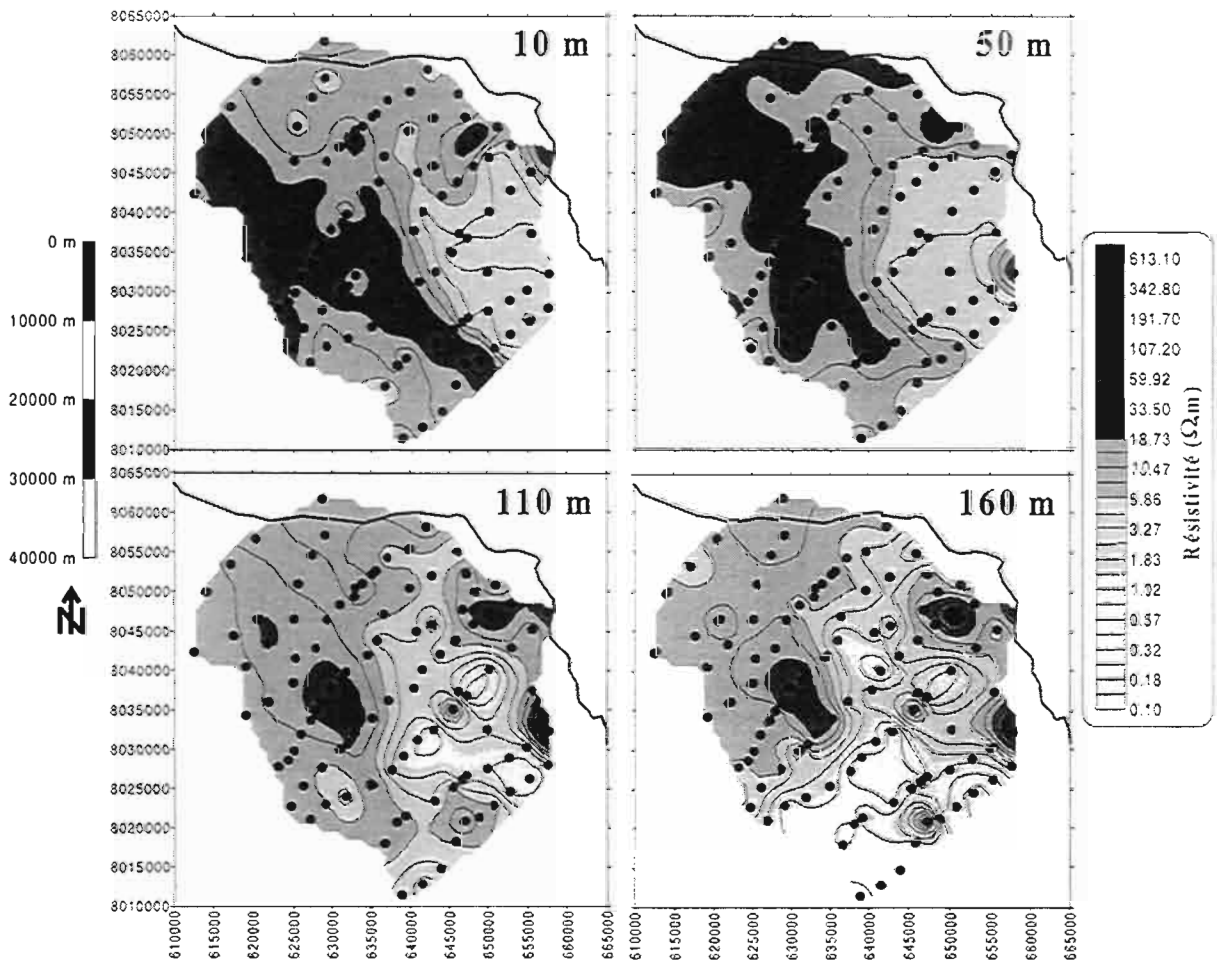


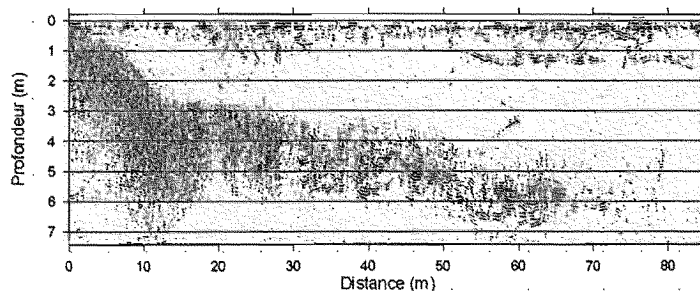
Fig. 3 - Carte d'iso-résistivités à différentes profondeurs d'après l'interprétation lissée.



# ACTES DU 2<sup>ème</sup> COLLOQUE DE GÉOPHYSIQUE DES SOLS ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

## GEOFCAN

21-22 septembre 1999  
BRGM - Orléans, France



*Section radar du toit d'une induration argileuse au Sénégal (mesures BRGM)*



*2<sup>ème</sup> colloque de Géophysique des sols  
et des formations superficielles*

*Résumés étendus*

*21-22 septembre 1999  
BRGM - Orléans, France*

*Organisé par :  
BRGM  
INRA  
IRD  
Université Pierre et Marie Curie*