

# Détection d'une cavité remplie de saumure par imagerie électrique

## J.-M. MIEHE

BRGM  
3, av. Claude-Guillemain  
BP 6009  
45060 Orléans  
Cedex 02  
jm.miehe@brgm.fr

## B. FEUGA

GEORDERIS  
15, rue Claude-Chappe  
BP 95038  
57071 Metz Cedex 3  
bernard.feuga  
@industrie.gouv.fr

## C. VACHETTE

GEORDERIS  
av. de Tsukuba  
14209 Hérouville-Saint-Clair  
christian.vachette  
@industrie.gouv.fr

### Résumé

Dans le cadre des problématiques minières liées à l'exploitation du sel et aux vides abandonnés, le BRGM a réalisé une étude géophysique pour GEORDERIS sur la concession saline d'Art-sur-Meurthe propriété de la société NOVACARB. L'objectif est d'expérimenter les potentialités de l'imagerie électrique 2D pour la mise en évidence de cavités pleines de saumures. La cavité LR45 de forme circulaire avec un diamètre de 90 m et une épaisseur de 7 m se trouve à 115 m de profondeur. Des modélisations préliminaires ont validé la démarche. Les mesures de résistivité ont mis en évidence une structure conductrice dont les caractéristiques sont en accord avec la géométrie connue de la cavité. Les mesures de polarisation provoquée ont détecté des niveaux polarisants dont l'origine reste à déterminer.

*Mots-clés :* imagerie électrique 2D, résistivité, chargeabilité, cavité, saumure.

## 2D electrical imaging of a brine filled cavity

### Abstract

Within the domain of mining problems linked to salt exploitation and abandoned cavities, BRGM has carried out a geophysical study for GEORDERIS in the Art-sur-Meurthe brine field which belongs to NOVACARB company. The objective is to test the potential of 2D electrical imaging so as to focus on salt brine filled cavities. The LR45 cavity, having a circular shape with a 90 m diameter and a 7 m thickness, is situated at a depth of 115 m. Preliminary trial runs have given validity to the concept. Resistivity measurements have shed light on a low resistivity structure, of which the characteristics coincide with the established geometry of the cavity. IP measurements detected polarising levels whose origin remains to be determined.

*Key words :* 2D electrical imaging, resistivity, IP, cavity, salt brine.

## Introduction

Dans le cadre des problématiques minières liées à l'exploitation du sel et aux vides abandonnés, le BRGM a réalisé pour GEODERIS une étude pour expérimenter les potentialités des méthodes géophysiques dans la mise en évidence de cavités pleines de saumures. Le terrain d'expérimentation a été proposé par la société NOVACARB sur les communes de Lenoncourt et Art-sur-Meurthe. Il s'agit de la concession saline d'Art-sur-Meurthe où les cavités sont bien connues en profondeur et géométrie. En particulier, la cavité LR45 a été auscultée par sonar (SOCON) et pour cette raison a été retenue pour les investigations géophysiques. Les modélisations préliminaires ont montré que l'imagerie électrique 2D est une technique adaptée à cette problématique. La méthode retenue est celle du panneau électrique en dispositif dipôle-dipôle de longueurs  $D = 50$  et  $100$  m avec mesure simultanée de la résistivité apparente et de la polarisation provoquée.

## Principe du panneau électrique en dispositif dipôle-dipôle

La méthode électrique consiste à injecter un courant électrique d'intensité  $I$  entre deux électrodes A et B (dipôle émetteur) et à mesurer la différence de potentiel résultante  $V$  entre deux électrodes M et N (dipôle récepteur). L'ensemble émetteur-récepteur constitue un quadripôle. Les grandeurs mesurées sont les suivantes :

- la résistivité apparente, définie comme étant la résistivité du sol homogène et isotrope qui, avec le quadripôle utilisé, donnerait entre M et N la différence de potentiel  $V$  ;

- la polarisation provoquée (PP) ou chargeabilité. Lorsqu'on envoie dans le sol un courant entre A et B et que l'on coupe brutalement ce courant, la différence de potentiel entre M et N ne chute pas instantanément mais nécessite quelques centaines de millisecondes à

quelques secondes pour se dissiper. La polarisation provoquée caractérise l'aptitude du sol à conserver une charge de courant pendant un temps très court (effet capacitif).

Ces deux paramètres sont enregistrés simultanément et dépendent des propriétés électriques du sol et de la géométrie du dispositif utilisé. La résistivité apparente permet de mettre en évidence les structures présentant un contraste de résistivité électrique. La chargeabilité a été essentiellement appliquée à la recherche de minéralisations à sulfures disséminées ou de ressources en eau et plus récemment à la détection de pollutions par hydrocarbures. La méthode du panneau électrique utilise un ensemble d'électrodes régulièrement espacées le long d'un profil rectiligne. Les grandeurs caractéristiques du dispositif dipôle-dipôle (Fig. 1) sont la dimension des dipôles AB et MN de longueur  $D$  et le rang  $n$ , grandeur entière qui indique la distance exprimée en longueurs de dipôles entre la partie émettrice AB et la partie réceptrice MN du dispositif.

Pour une position donnée de l'émetteur AB, les mesures sont effectuées en augmentant progressivement la distance entre AB et MN. La séquence est répétée pour toutes les positions du dipôle AB le long du profil. Les mesures sont conventionnellement représentées sous forme de pseudo-coupes de résistivité apparente ou de chargeabilité en fonction du rang  $n$ . La position d'une mesure donnée est celle du milieu du segment émetteur-récepteur sur la bissectrice à  $45^\circ$ . Le paramètre  $n$ , indicateur de la dimension du dispositif d'électrodes, ne constitue pas une vraie échelle de profondeur. Les pseudo-coupes sont généralement interprétées par calcul direct ou par inversion. L'interprétation permet d'établir une coupe de résistivité vraie en fonction de la profondeur directement interprétable en termes de structures géologiques.

## Modélisations préliminaires

La cavité LR45 est de forme cylindrique avec un diamètre de 90 m et une hauteur de 7 m. Le toit de la cavité

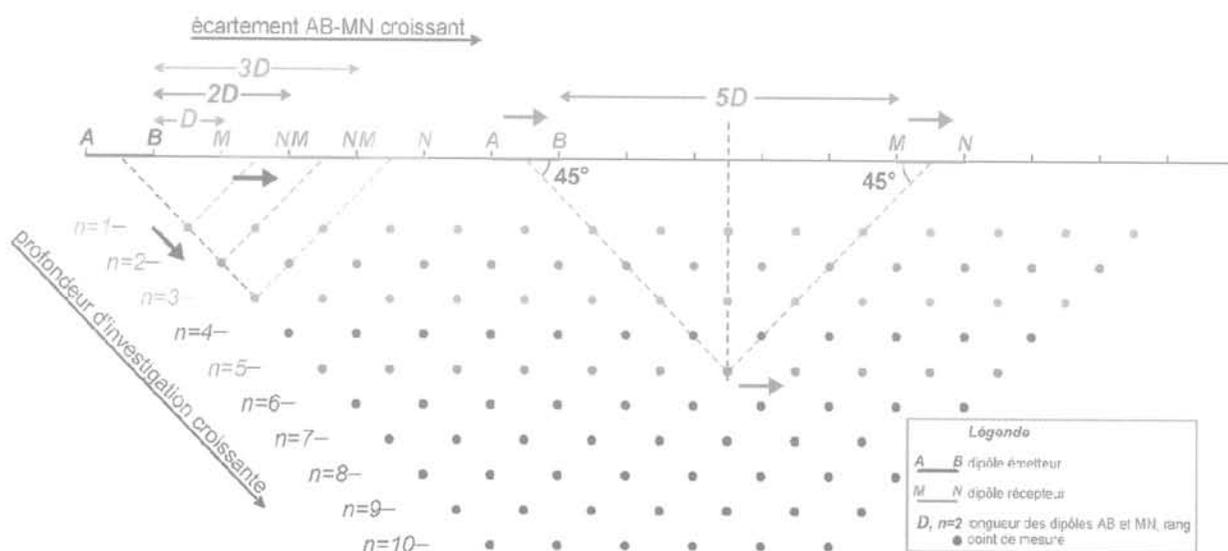


FIG. 1 Principe de la mesure en dispositif dipôle-dipôle. Principle of measurement using a dipole-dipole array.

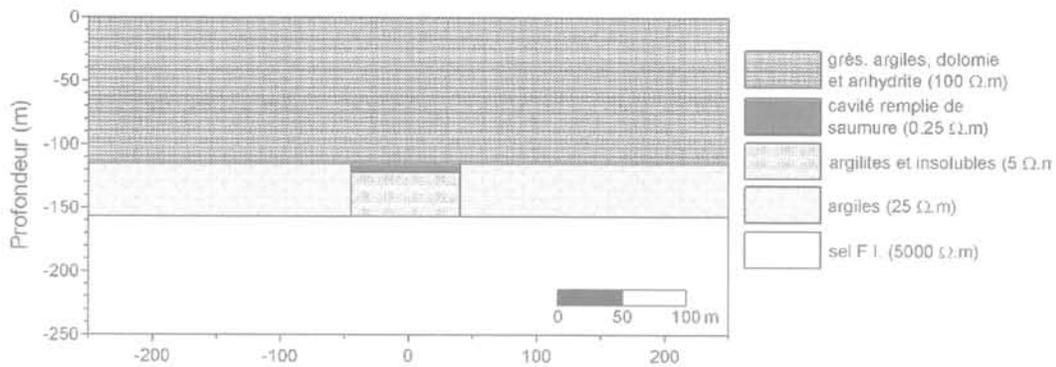


FIG. 2 Modèle géoélectrique simulé.  
Simulated electrical model.

remplie de saumure est à 115 m de profondeur. Au toit, la cavité est surmontée d'un ensemble grès/argile/dolomie/anhydrite. L'encaissant est constitué d'argiles, le toit du sel est à environ 35 m sous la base de la cavité, constituée d'une cavité remplie d'insolubles imbibés d'eau salée. Le paramètre déterminant est la résistivité apparente. Un modèle géoélectrique a été défini à partir de la géométrie connue de la cavité et d'hypothèses réalistes de résistivité des différentes formations en présence (Fig. 2). L'eau salée ( $< 1 \Omega.m$ ) présente un très fort contraste de résistivité avec les formations géologiques environnantes (ensemble grès/argile/dolomie/anhydrite environ  $100 \Omega.m$ , argiles  $10$  à  $50 \Omega.m$ , sel  $> 5\ 000 \Omega.m$ ). La réponse de ce modèle a été calculée par simulation d'un dispositif dipôle-dipôle  $D = 100 m$ . Le résultat de la simulation est une pseudo-coupe de

résistivité apparente (Fig. 3a) qui met en évidence une anomalie conductrice (environ  $60 \Omega.m$ ) à l'aplomb des cavités remplies de saumure et d'insolubles, dans un contexte de  $90$  à  $180 \Omega.m$ . Les figures 3b et 3c montrent, avec les hypothèses de résistivité adoptées, que la contribution de la cavité remplie d'insolubles est prépondérante devant l'effet de la cavité remplie de saumure. Même en intégrant le bruit géologique (variations d'épaisseur ou de résistivité des formations), les contrastes de résistivité sont suffisants pour être mesurés de façon fiable.

La pseudo-coupe simulée (Fig. 3a) a été inversée avec le logiciel RES2DINV (M.H. Loke). L'exercice a pour but de comparer le modèle géoélectrique de départ avec la coupe de résistivité inversée, pour évaluer les performances du processus d'inversion.

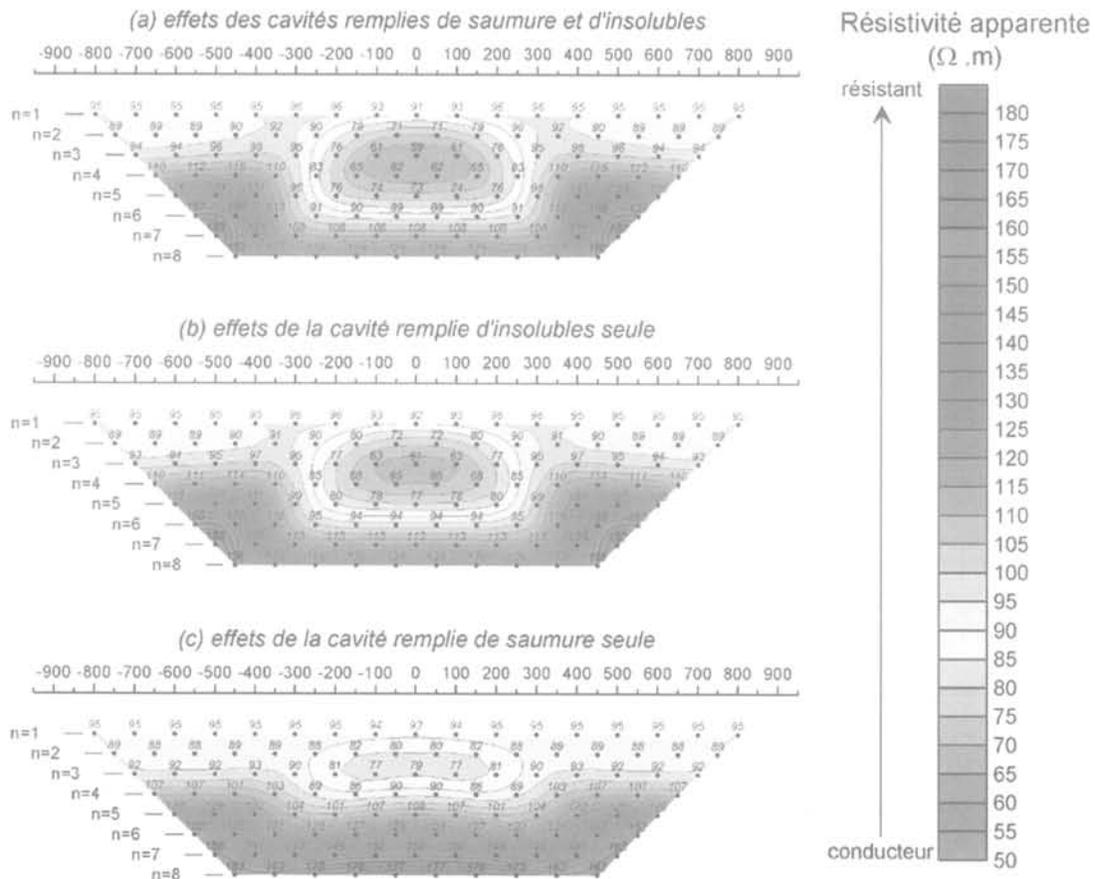


FIG. 3 Modélisation 2D de la cavité LR45, pseudo-coupes de résistivité apparente.  
2D modelisation of LR45 cavity, apparent resistivity pseudo-sections.

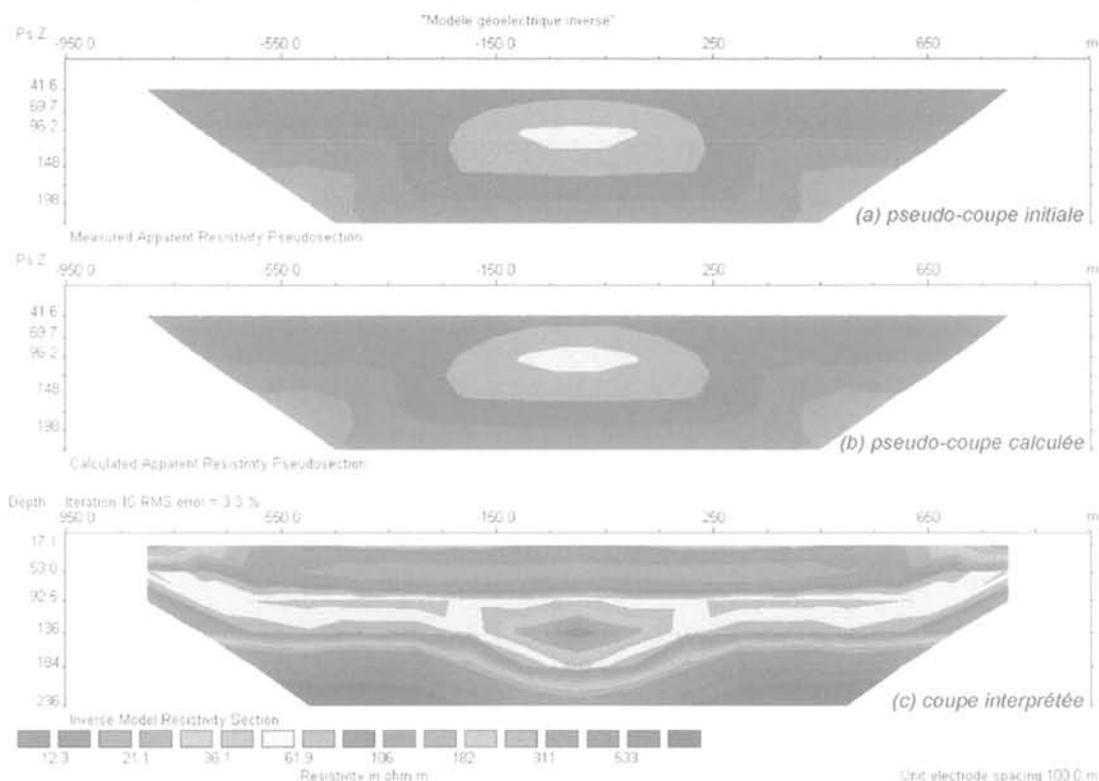


FIG. 4 Inversion de la pseudo-coupe modélisée.  
Inversion of simulated pseudo-section.

Les résultats de cette opération sont présentés sur la figure 4. La coupe (a) est la pseudo-coupe de résistivité apparente simulée par calcul direct, la coupe (b) est la coupe de résistivité apparente calculée à partir de la distribution de résistivité (c) résultat de l'inversion. Le processus d'inversion minimise l'écart quadratique moyen (RMS) entre les pseudo-coupes (a) et (b). En ce sens l'interprétation est satisfaisante puisque les deux coupes sont très semblables et l'écart quadratique moyen (RMS) est faible (3,3 %).

La coupe inversée (Figs 4c et 5) met bien en évidence une structure conductrice centrée et calée en profondeur sur les cavités. L'inversion ne permet cependant pas de distinguer la cavité remplie de saumure de la cavité remplie d'insolubles, ce résultat était prévisible d'après les modélisations par calcul direct.

La coalescence avec les argiles conductrices ne permet pas de délimiter les cavités de façon précise le long du profil. Les artefacts liés à l'inversion font que le toit

des argiles conductrices est mal placé alors que le toit de la formation salifère résistante est nettement mieux défini. Les contrastes de résistivité sont conservés et suffisamment marqués pour caractériser les différentes unités géologiques même si en valeur absolue on ne retrouve pas les résistivités du modèle géoélectrique simulé.

#### 4

### Acquisition des données

Le panneau électrique est centré sur le forage LR45 et couvre une longueur de 1600 m le long d'un profil orienté N° 69 (Fig. 6).

Le dispositif dipôle-dipôle combine deux longueurs de dipôle,  $D = 50$  m et 100 m pour assurer une définition homogène aux différentes profondeurs et pour atteindre une profondeur d'investigation maxi-

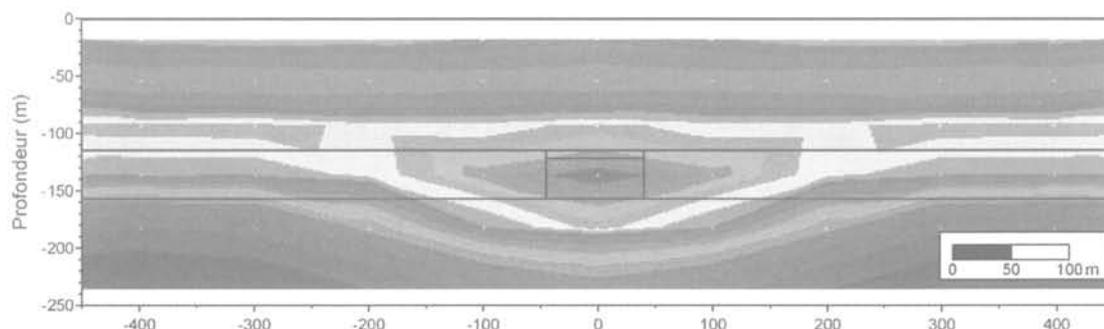


FIG. 5 Coupe de résistivité interprétée par inversion.  
Depth section of interpreted resistivity.

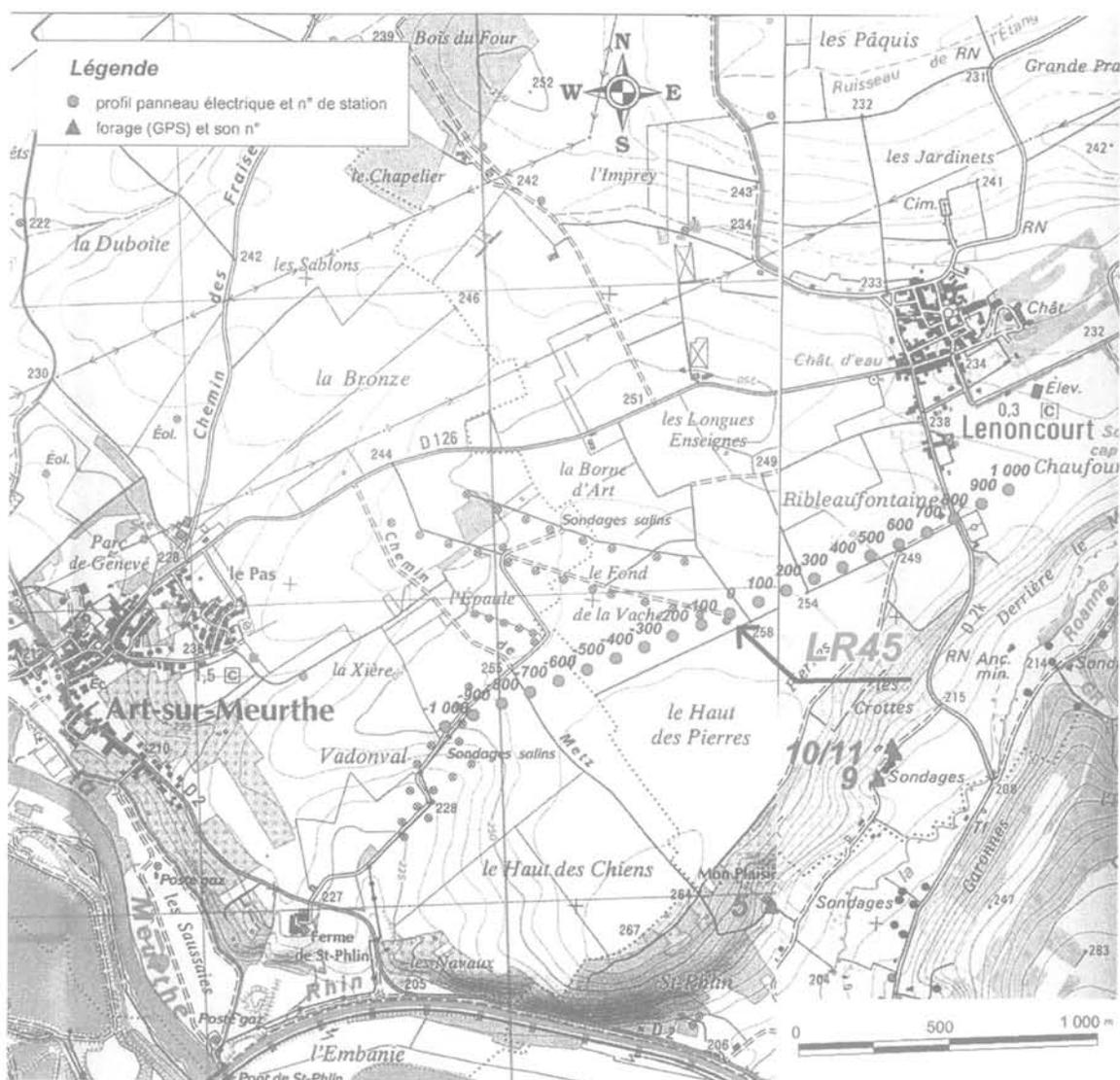


FIG. 6 Localisation du panneau électrique (extraits des cartes IGN 3415 Est Saint-Nicolas-de-Port et 3315 Est Nancy-Toul). Location of the study area.

male d'environ 180 m. La topographie a été mesurée par nivellement direct pour prendre en compte les variations de relief. Les statistiques relatives aux mesures de résistivité apparente sont résumées dans le tableau I.

Sur l'ensemble du panneau mesuré, les écarts constatés sur les mesures répétées n'excèdent pas 0,5 mV/V en polarisation provoquée et quelques dixièmes d' $\Omega \cdot m$  en résistivité apparente. Les pseudo-coupes intègrent des artefacts liés, d'une part, au mode

de représentation et à la géométrie des dispositifs électriques (chapeaux chinois, branches inclinées à 45°) et, d'autre part, les effets des à-coups de prise produits par les hétérogénéités superficielles. Les pseudo-coupes ont été interprétées par inversion. Le logiciel permet de calculer et de corriger l'effet du relief topographique, le modèle peut être contraint par des informations *a priori* (résistivité vraie des formations, profondeur des interfaces, structures horizontales, verticales ou inclinées).

TABLEAU I Statistiques relatives au panneau électrique. Statistics on electrical measurement.

Dispositif	Nombre de mesures	Nombre de lignes	Valeur minimale de résistivité apparente ( $\Omega \cdot m$ ) et de chargeabilité (mV/V)	Valeur maximale de résistivité apparente ( $\Omega \cdot m$ ) et de chargeabilité (mV/V)
D = 50 m	120	n = 1 à 4	14/0,8	56/8,6
D = 100 m	113	n = 1 à 8	19/0,7	96,2/6,5

## Résultats – discussion

Les pseudo-coupes de résistivité apparente et de polarisation provoquée sont représentées sur la figure 7.

Les coupes de résistivité et de polarisation provoquée interprétées sont représentées sur la figure 8. La coupe de résistivité met en évidence plusieurs unités géoélectriques. La structure conductrice C1 est conforme au modèle géoélectrique connu. Les cavités remplies de saumures et d'insolubles sont clairement localisées sur l'emprise du conducteur C1. La zone

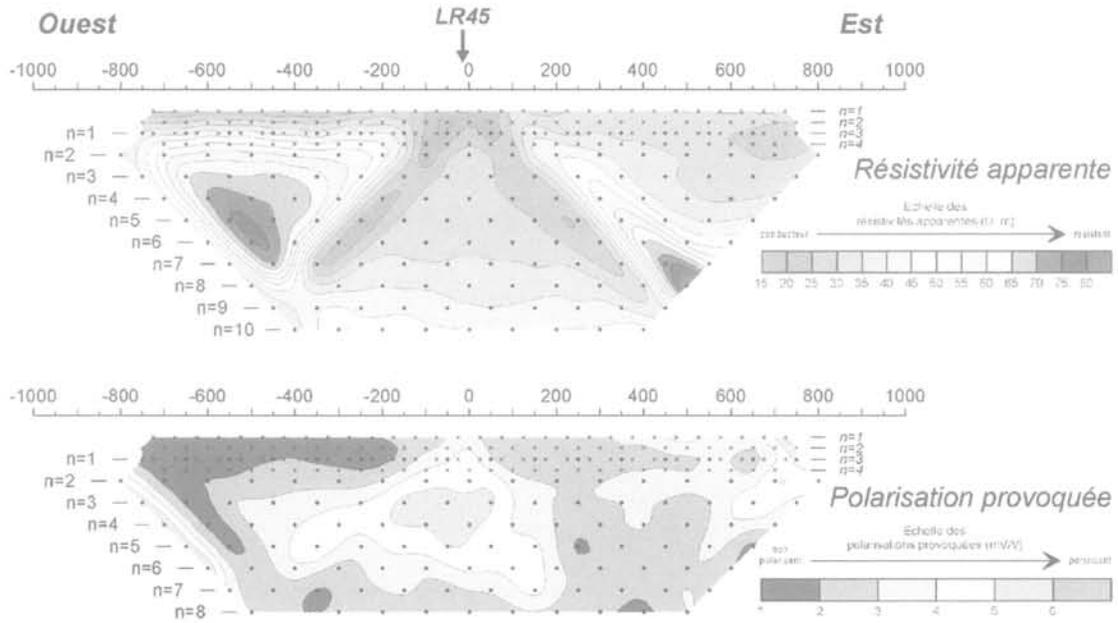


FIG. 7 Pseudo-coupes de résistivité apparente et de polarisation provoquée. Apparent resistivity and IP pseudo-sections.

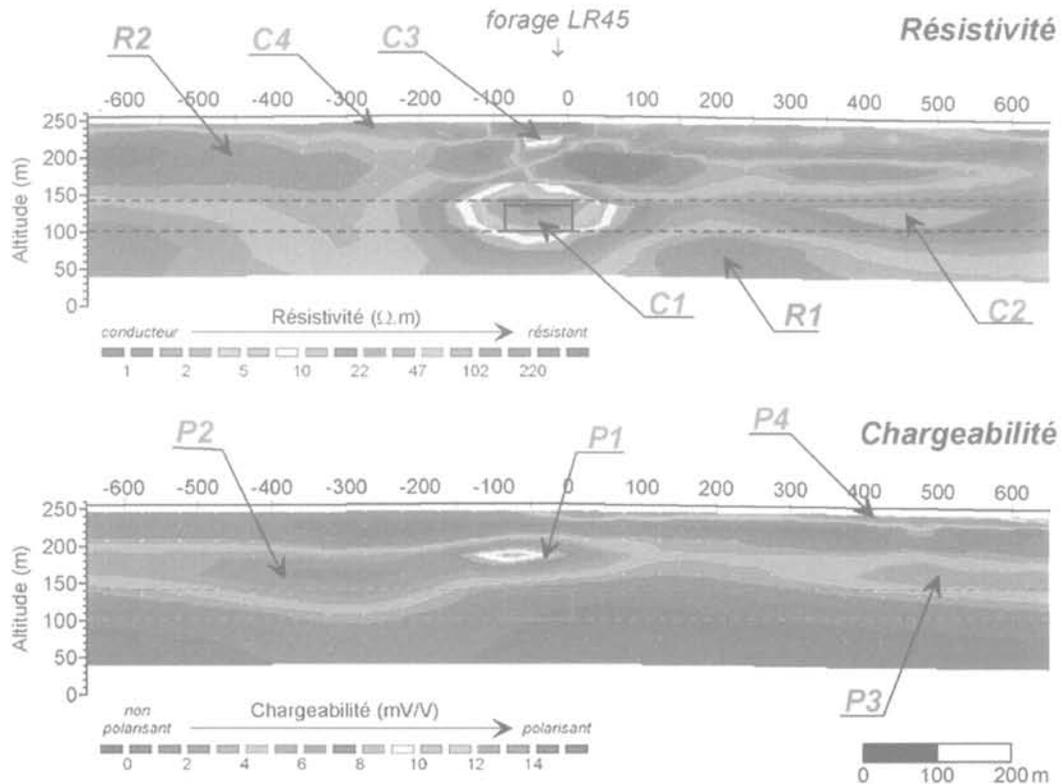


FIG. 8 Coupes de résistivité et de chargeabilité interprétées. Interpreted resistivity and IP sections.

d'amplitude minimale ( $< 1 \Omega.m$ ) est proche de la cavité remplie de saumure. Vers l'est le conducteur C2 (10 à 30  $\Omega.m$ ) coïncide avec les argiles et surmonte un ensemble résistant R1 ( $> 300 \Omega.m$ ) dont le toit correspond à celui de la formation salifère (altitude 100 m).

Vers l'ouest le schéma est plus complexe, la formation salifère (altitudes inférieures à 100 m) apparaît plus conductrice (20 à 70  $\Omega.m$ ). Les argiles semblent céder la place à un ensemble plus résistant et subvertical entre les stations - 450 et - 200. La structure résistante R2 (70 à 150  $\Omega.m$ ) correspond à l'ensemble grès/argiles/dolomie/anhydrite. Ce résistant se poursuit tout le long du profil, très homogène vers l'ouest il semble marqué par des alternances plus argileuses vers l'est et est interrompu entre les stations -50 et 0 par une structure très conductrice C3 ( $< 10 \Omega.m$ ). Ce conducteur n'est pas directement lié au forage (fuite d'eau salée), les contrôles effectués par NOVACARB dans le forage LR45 n'ont détecté aucune anomalie dans la structure du forage. L'origine de ce conducteur pourrait être liée à l'existence d'une faille dans le rhétien situé à proximité du forage LR45, avec des remontées de saumures le long de cette faille, suivant un mécanisme qui reste à déterminer.

Le conducteur C4 (20  $\Omega.m$ ) entre les stations - 650 et - 100 est probablement dû à une composante plus limoneuse des terrains les plus superficiels.

La coupe de polarisation provoquée montre un contexte peu polarisant inférieur à 3 mV/V et met en évidence deux horizons polarisants. Le premier ensemble est situé au toit des argiles. D'une épaisseur relativement homogène d'environ 50 m ce polarisant couvre le profil d'est en ouest et regroupe les structures

P1, P2 et P3 avec des chargeabilités comprises entre 4 et 12 mV/V. L'amplitude maximale est relevée au-dessus de la cavité remplie de saumure (P1, 12 mV/V), entre les deux conducteurs C1 et C3, sans que l'on puisse établir un lien avec la cavité. Le second ensemble polarisant est superficiel et peu enraciné (P4, 4 à 8 mV/V), entre les stations 0 et 650. L'origine exacte des polarisants reste à déterminer.

## 6

## Conclusion

Le panneau électrique a mis en évidence une structure conductrice conforme au modèle géoélectrique connu. Les cavités remplies de saumure et d'insolubles sont clairement localisées sur l'emprise du conducteur. Un second conducteur, moins profond et moins étendu, a été détecté autour du forage. Il pourrait s'agir d'une remontée de saumure le long d'une faille observée au voisinage du forage LR45 dans le rhétien. La coupe de polarisation provoquée montre deux ensembles polarisants dont l'origine reste à déterminer. Le lien entre la structure polarisante localisée au-dessus des cavités et les cavités reste à démontrer. Ces mesures permettent d'identifier et de localiser sans ambiguïté les cavités remplies de saumure et d'insolubles et valident complètement la technique du panneau électrique mais montrent aussi ses limites: les dimensions en regard de la profondeur ne produisent pas un contraste de résistivité suffisant pour séparer les effets de la cavité remplie de saumure des effets de la cavité remplie d'insolubles.

## Bibliographie

- Cahyna F., Mazac O., Venhodova D. – Determination of the extend of cyanic contamination by surface geoelectrical methods. In *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Ward S.H. (ed.), vol. 2, *Environmental and Groundwater*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 1990, p. 97-99.
- Dam (van) J.C., Meulenkamp J.J. – Some results of the geo-electrical resistivity method in ground water investigations in the Netherlands. *Geophysical prospecting*, 15 (1), 1967, p. 92-115.
- Edwards L.S. – A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1977, p. 1020-1036.
- Gréau E. – *Le sel en Lorraine*. Berger-Levrault et Cie éditeurs, 1908.
- Ghoreychi M., Daupley X. – Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel. Colloque Après-mine, Nancy, 5-7 février 2003.
- Keller G.V., Frischknecht F.C. – *Electrical methods in geophysical exploration*. Pergamon, New York, 1966, 519 p.
- Loke M.H., Barker R.D. – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 1996, p. 131-152.
- Loke M.H., Barker R.D. – Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 1996, p. 499-523.
- Marchal C. – *Le gîte salifère keupérien de Lorraine-Champagne et les formations associées – Étude géométrique – Implications génétiques*. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université Nancy I, 30 juin 1982.
- Maubeuge P.L. – *Le bassin salifère lorrain*. Thèse, Imprimerie Georges-Thomas, Nancy, 1950.
- Ogilvy A.A., Kuzmina E.N. – Hydrogeologic and engineering geologic possibilities for employing the method of induced potentials. *Geophysics*, 37 (5), 1972, p. 839-861.
- Reynolds J.M. – *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons Ltd., England, 1997, 796 p.
- Summer J.S. – *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- Tweeton D.R., Cumerlato C.L., Jay C., Kuhlman H.H.L. – Field test of geophysical techniques for predicting and monitoring leach solution flow during *in situ* mining. *Geoexploration*, 28, 1991, p. 251-268.
- Vacquier V., Holmes C.R., Kintzinger P.P., Lavergne M. – Prospecting for groundwater by induced electrical polarization. *Geophysics*, 22 (3), 1957, 660-687.
- Ward S.H. – Resistivity and induced polarization methods. In *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Ward, S.H. (ed.), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 1990, p. 147-149.
- Yaramanci U. – Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *Journal of Applied geophysics*, 44, 2000, p. 181-196.

