

Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol*

par

Laurent MARESCOT¹

Résumé.—MARESCOT L., 2006. Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 90.1: 23-40.

L'objectif de l'imagerie électrique est la reconnaissance multidimensionnelle des résistivités électriques d'un milieu. Ce travail donne une brève introduction descriptive destinée aux personnes intéressées par cette technique. Dans cette méthode d'auscultation, un courant électrique est injecté au moyen d'une paire d'électrodes dans l'objet étudié (le sol par exemple). Le champ électrique qui en résulte est une fonction de la distribution de la résistivité électrique dans le corps et est mesuré à l'aide d'un autre couple d'électrodes. Les mesures des résistivités apparentes sont ensuite répétées un grand nombre de fois en positionnant les électrodes à un autre endroit de l'objet. Différents dispositifs peuvent être utilisés dans ce but et les mesures sont fréquemment effectuées au moyen d'un câble multiconducteur permettant une automatisation de la prise de données. Par une procédure d'interprétation, appelée inversion, on cherche ensuite à définir la présence d'hétérogénéités plus ou moins résistantes ou conductrices dans l'objet, qui ont influencé la répartition du champ électrique pour les différentes mesures. Le résultat obtenu est une coupe du sous-sol en résistivités calculées, donnant une image plausible de la répartition des propriétés électriques réelles du sous-sol. L'imagerie électrique est couramment utilisée en géophysique dans le but de détecter des cavités ou des corps gelés, d'imager des migrations d'eau salée ou de polluants dans le sol, de détecter la présence de vestiges archéologiques ou encore de délimiter d'anciennes décharges. Les deux exemples de mesures réelles appliquées à la recherche de paléo-vallées et à la prospection archéologique illustrent bien le potentiel et la versatilité de la méthode. Les techniques d'imagerie électrique suscitent également un intérêt grandissant pour l'auscultation des structures du génie civil en pierre, en béton ou en terre.

Mots clés: imagerie électrique, tomographie électrique, panneaux électriques, pseudo-section, résistivité, inversion, hydrologie, archéologie.

Abstract.— MARESCOT L., 2006. An introduction to electrical imaging. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 90.1: 23-40.

The aim of electrical imaging is to recover the multidimensional properties (electrical resistivities) of a surveyed object. This work gives a brief introduction to the data

*Contribution n°1460 de l'Institut de Géophysique, EPFZ, Zürich.

¹ETH-Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Geophysics, HPP O7, ETH Hoenggerberg, CH-8093 Zurich.

Tél./fax.: (+ 41) 44 633 75 61 / (+ 41) 44 633 10 65

E-mail: laurent@aug.ig.erdw.ethz.ch

acquisition process and the inversion method for non-specialists interested in this technique (e.g. geologists, environmental specialists, pedologists or archaeologists). In this method, an electric current is applied into the investigated object (e.g. the Earth) using a pair of electrodes. The resulting electric field depends on the resistivity distribution in the subsurface and is measured using another pair of electrodes. The measurements are then repeated a large number of times, changing the location of the electrodes on the surface. The measurement process can be speeded up using a multicore cable and various electrode configurations can be used. An interpretation process, named inversion, allows recovering a calculated resistivity distribution in the ground. This results in a plausible image of the electrical properties of the subsurface. Electrical imaging is frequently used in geophysical surveying for detecting cavity or permafrost, imaging salt water or pollutant migration or locating archaeological structures or ancient waste sites. The real data examples show that this technique is very versatile and can provide useful information for hydrogeological or archaeological studies. This technique is also increasingly used in civil engineering studies, to survey rock or concrete structures as well as to monitor dams' integrity.

Keywords: electrical imaging, resistivity imaging, electrical tomography, pseudosection, inversion, hydrology, archaeology.

INTRODUCTION

L'objectif de l'imagerie électrique (*Electrical Resistivity Tomography* ou *Electrical Impedance Tomography*) est la reconnaissance multidimensionnelle des propriétés électriques intrinsèques du milieu étudié (sol ou échantillon de matériau). Dans cette méthode d'auscultation, un courant électrique est injecté au moyen d'une paire d'électrodes dans l'objet étudié. Le champ électrique qui en résulte est une fonction de la distribution de la résistivité électrique dans le corps et est mesuré à l'aide d'un autre couple d'électrodes. Les mesures sont ensuite répétées en positionnant les électrodes à un autre endroit de l'objet. Par une procédure d'interprétation, nommée inversion, on cherche alors à définir la présence des hétérogénéités, plus ou moins résistantes, dans l'objet qui ont influencé la répartition du champ électrique pour les différentes mesures.

La prospection électrique est couramment utilisée en géophysique dans le but de caractériser des fractures (RAMIREZ et DAILY 2001), détecter des cavités ou des corps gelés (MARESCOT *et al.* 2003a), imager des intrusions ou des migrations d'eau salée dans le sol (ABDUL-NASSIR *et al.* 2000), détecter la présence de vestiges archéologiques (PANISSOD 1997), étudier la structure des sols et de la proche surface (MICHOT 2003) ou encore délimiter des décharges et déceler des migrations de polluants dans le sol (CHAMBERS *et al.* 1999). Les techniques d'imagerie électrique suscitent également un intérêt grandissant pour l'auscultation non destructive des structures du génie civil et de leur environnement, qu'elles soient en pierre, en béton ou en terre (YARAMANCI 2000, MARESCOT 2004). Dans ce cadre, la détection de zones altérées et de la fissuration représentent des enjeux importants. Les méthodes électriques semblent bien adaptées à la mise en évidence d'anomalies de porosité ou à la

présence de fissuration, grâce au fort contraste de propriétés électriques que ces défauts impliquent. Des recherches dans le domaine de l'imagerie électrique médicale sont également en constant développement. Dans cette dernière application, c'est l'intérieur du corps humain qui doit être imagé, les différents organes (graisse, muscles, os) étant plus ou moins résistants (FAES *et al.* 1999, LIONHEART 2004).

Une imagerie électrique complète (fig. 1) consiste tout d'abord en la collection de données (résistivités apparentes) sur le terrain. Cette étape constitue le problème direct. Une fois les données collectées, il est nécessaire d'en effectuer le traitement, via un processus d'inversion afin de reconstituer un modèle du sous-sol (résistivités inversées). Cette étape constitue le problème inverse. La troisième étape consiste en une procédure d'évaluation de la qualité du résultat afin de voir si le modèle de sous-sol reconstruit est fiable. Cette dernière étape est actuellement au centre de recherches actives.

Ce travail a pour but de donner une brève introduction aux personnes intéressées par cette technique (ingénieur géologue, spécialiste de l'environnement, pédologue ou archéologue). L'objectif principal est d'initier le plus grand nombre et de populariser ainsi cette méthode d'investigation. La stratégie de mesure d'un panneau électrique au moyen d'un câble multi-conducteur est tout d'abord détaillée dans ce travail. On s'intéresse ensuite à l'inversion des données, c'est-à-dire à l'obtention d'un modèle à partir des données mesurées. Un exemple synthétique illustre le processus d'inversion. Finalement, deux exemples de mesures réelles appliquées à la recherche de paléo-vallées et à la prospection archéologique illustrent la méthode.

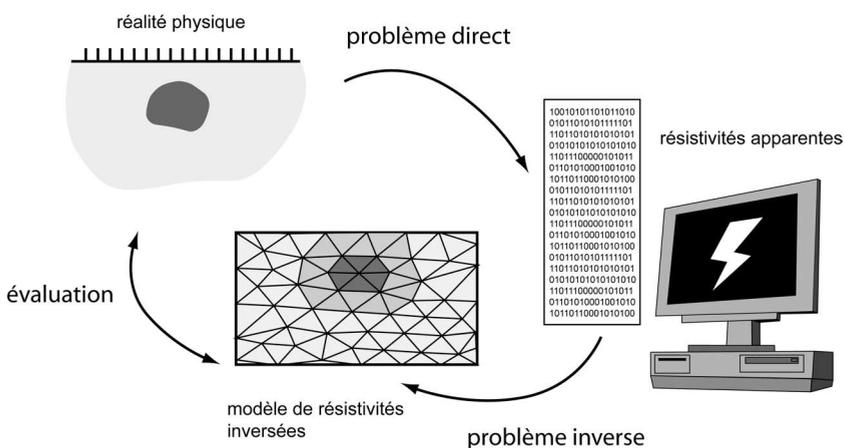


Figure 1.—Principe de l'imagerie électrique et définition du problème direct et du problème inverse.

Principle of electrical imaging: forward and inverse problems.

MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Les méthodes électriques ont pour but la détermination de la résistivité électrique ρ (en Ωm) des structures étudiées. Dans ce qui suit, le terme de résistivité électrique sera remplacé par le terme de résistivité. La résistivité est la capacité d'un milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique. Cette résistivité dépend de différents facteurs tels que la salinité du fluide, la saturation, la porosité ou encore la température du milieu étudié (KELLER et FRISCHKNECHT 1966, ZHDANOV et Keller 1994). Dans le cas de la prospection électrique en courant continu, le courant électrique est principalement transporté par les ions (conduction électrolytique dans les fluides) ou plus rarement par les électrons (conduction électronique dans les métaux). La résistivité des différents matériaux, inertes ou vivants, est donc une propriété physique variant dans de grandes proportions, ce qui constitue un atout majeur des méthodes électriques. Dans la nature, la gamme des résistivités est très étendue, variant de moins de 1 Ωm à plusieurs milliers d' Ωm (fig. 2).

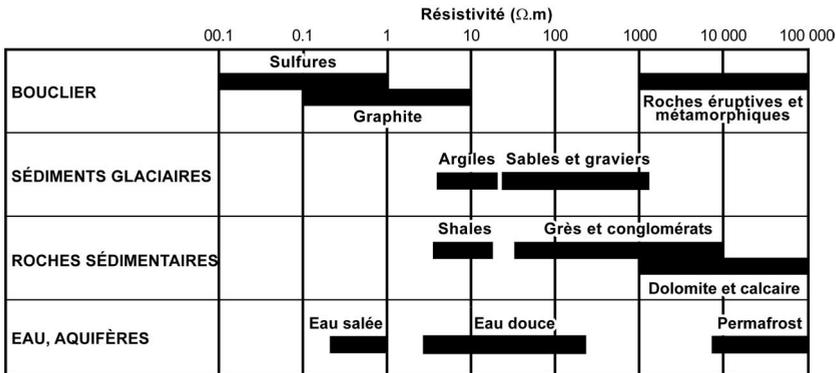


Figure 2.—Gamme des valeurs de résistivité électrique pour différents matériaux géologiques.

Electrical resistivity range for various geological materials.

La mesure de la résistivité d'une structure s'effectue en injectant un courant électrique dans celle-ci au moyen d'électrodes d'injection (souvent nommées *A* et *B*) et en mesurant la différence de potentiel créée par le passage du courant au moyen d'électrodes de mesure du potentiel (souvent nommées *M* et *N*), figure 3. Le nombre d'électrodes, ainsi que leur agencement définit le dispositif électrique utilisé. La configuration du dispositif est choisie selon la problématique de l'étude. Les électrodes peuvent être sur ou sous la surface du sol. En tomographie 2D (deux dimensions) de surface, les principaux dispositifs communément utilisés sont le Wenner, le Wenner-Schlumberger, le dipôle-dipôle, le pôle-dipôle et le pôle-pôle (fig. 4). Le dispositif pôle-pôle est un peu particulier puisque les secondes électrodes de courant et de potentiel

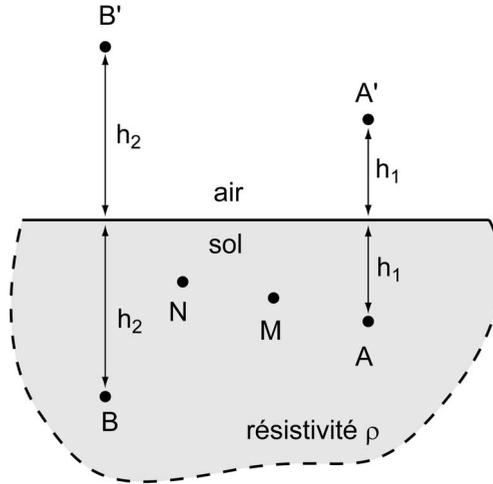


Figure 3.—Le quadripôle électrique de mesure. Comme les électrodes d’injection de courant A et B se trouvent sous la surface du sol, il est nécessaire de tenir compte des images de ces électrodes (A' et B') lors du calcul du facteur géométrique G .
The electrical quadrupole. As the current electrodes A and B are below the ground surface, images of these electrodes (A' and B') must be considered in the calculation of the geometric factor G .

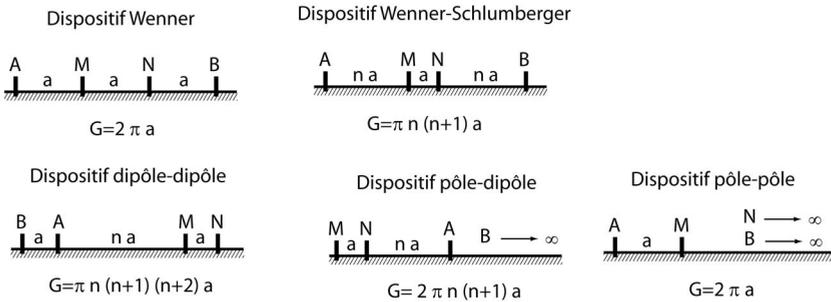


Figure 4.—Les différents dispositifs utilisés en imagerie électrique. A et B sont des électrodes d’injection de courant et M et N des électrodes de mesure du potentiel.
The different electrode arrays used in electrical imaging. A and B are the current electrodes and M and N are the potential electrodes.

doivent être placées théoriquement «à l’infini» (dans la pratique en un endroit très éloigné de la zone de mesure). Si les distances des dispositifs utilisées sont grandes, le respect de cette contrainte théorique peut rapidement devenir un problème. Le dispositif pôle-dipôle souffre du même inconvénient mais dans des proportions moindres puisque seule une électrode de courant est «à l’infini».

La différence de potentiel dépend de l'intensité du courant injecté, de la disposition des électrodes et de la résistivité électrique du matériau constituant l'objet étudié. Il est alors possible de déduire une répartition de la résistivité dans la structure en se basant sur la forme du champ de potentiel. Dans le cas d'un milieu théoriquement homogène et isotrope, la résistivité mesurée correspond à la résistivité vraie du matériau, ce qui n'est pas le cas pour des milieux hétérogènes. Nous faisons appel, dans le cas d'un milieu hétérogène, au concept de résistivité apparente (KUNETZ 1966) dont la définition est la suivante:

$$\rho_{app} = G \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Avec ΔV la différence de potentiel mesurée (mV) et I le courant injecté (mA). Le paramètre G est appelé le facteur géométrique (en mètres); il permet l'expression de la résistivité apparente dans un espace de géométrie simple (demi-espace par exemple, fig. 3). Il est défini pour un quadripôle dont les électrodes sont sur ou sous la surface et pour un demi-espace homogène avec une limite plane par:

$$G = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N}} \quad (2)$$

A' et B' étant les images de A et B par rapport à la surface du sol (fig. 3), l'analogie avec les lois de l'optique étant valables pour le courant continu. Certaines électrodes peuvent en effet se trouver sous la surface du sol lors de mesures en forage par exemple.

Dans la pratique, le courant employé est rarement un véritable courant continu. Pour pallier les phénomènes de polarisation spontanée et pour améliorer le rapport signal sur bruit, un courant alternatif en créneaux ou sinusoïdal basse fréquence est utilisé (de quelques fractions de hertz à quelques hertz).

IMAGERIE ÉLECTRIQUE

Principe général

En surface, les mesures peuvent être effectuées en gardant le centre du dispositif fixe et en écartant les électrodes d'injection (méthode du sondage électrique) ou en déplaçant un dispositif à écartement constant (méthode du trainé électrique).

Avec la première méthode nous obtenons la variation de la résistivité en 1D sous le dispositif et avec la seconde méthode nous étudions les variations latérales de ce paramètre, pour une profondeur approximativement constante. En effet, plus l'écartement entre les électrodes d'injection s'accroît, plus la profondeur à laquelle le courant circule augmente. En combinant ces deux méthodes, il est possible de réaliser des panneaux électriques, sensibles aux variations de résistivité tant verticales qu'horizontales dans la sub-surface. Ces mesures sont habituellement représentées sous la forme de panneaux électriques (ou pseudo-sections en résistivités apparentes). Les points de mesure sont reportés à l'aplomb du centre du dispositif et à une ordonnée proportionnelle à la distance séparant les électrodes ($AM/2$ ou $AB/2$ par exemple) définissant des niveaux d'acquisition. Une méthode de positionnement vertical des points est celle de la profondeur médiane d'investigation du dispositif utilisé (EDWARDS 1977). La profondeur médiane d'investigation, pour un milieu homogène, peut être considérée comme étant la profondeur à laquelle la portion de terrain située au dessus de cette limite a la même influence que la portion de terrain située au dessous. Les valeurs sont ensuite interpolées pour tracer les lignes d'isoresistivité apparentes (fig. 5).

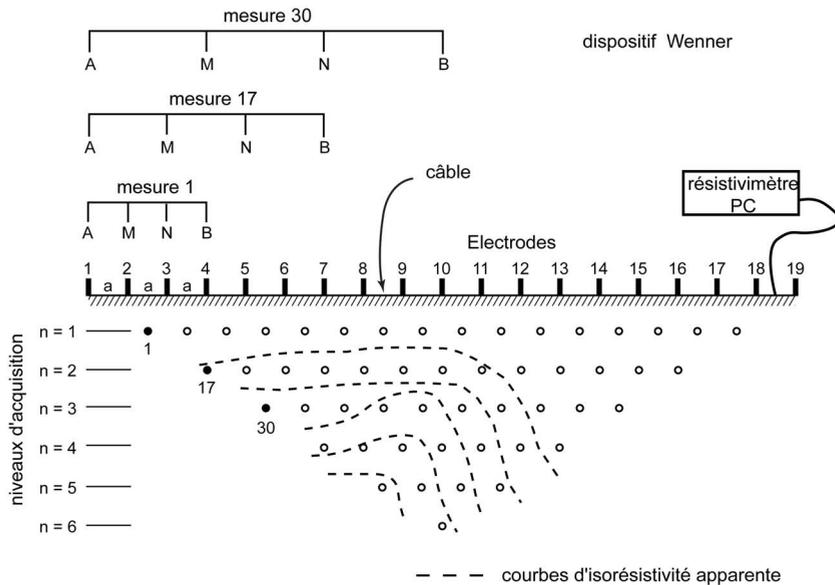


Figure 5.—Acquisition de données en imagerie électrique et représentation d'un panneau électrique en résistivité apparente.
Acquisition strategy in electrical imaging and representation of an apparent resistivity pseudosection.

Un panneau électrique en résistivité apparente donne une image très approximative de la répartition des résistivités dans une structure. Cette image est distordue car elle dépend de la répartition des résistivités dans l'objet mais également du dispositif utilisé. Un panneau électrique est donc uniquement une manière commode de représenter les résistivités apparentes. C'est la raison pour laquelle il est quasiment impossible d'interpréter en terme géologique un panneau électrique non inversé, c'est à dire sans traitement visant son interprétation.

Procédures d'acquisition

La méthode d'imagerie électrique 2D fut mise au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil. Dans ce cas, on suppose que la résistivité ne change pas dans la direction perpendiculaire au profil d'où le terme d'imagerie 2D. Cette supposition est raisonnable pour beaucoup de corps allongés et dans ce cas la méthode pourra être appliquée. Il faudra alors tenter de placer les profils perpendiculairement au corps à étudier. Une acquisition 2D utilise en général un grand nombre d'électrodes placées selon un profil et connectées à un câble multi-conducteurs. Un ordinateur portable, dans lequel est programmée la séquence de mesures (ou un résistivimètre possédant un disque dur), est relié à une boîte de commutation et sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel (fig. 5). Chaque électrode possède en effet une adresse numérique unique dans le dispositif, ce qui lui permet d'être identifiée par l'ordinateur. Le câble multi-conducteurs est relié à la boîte de commutation. Un contact galvanique est assuré avec le sol au moyen de piquets métalliques (acier inoxydable) ou encore d'électrodes spéciales éliminant la polarisation spontanée. Un espacement constant (nommé distance inter-électrode) est généralement utilisé d'une électrode à l'autre.

Durant la procédure d'acquisition de données, le résistivimètre sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel. La mesure est ensuite stockée en mémoire. Prenons comme exemple un dispositif Wenner avec 19 électrodes. La distance entre deux électrodes est notée a . En dispositif Wenner (fig. 4) la première mesure du fichier d'acquisition va se faire à l'aide des électrodes 1, 2, 3 et 4. Les électrodes 1 et 4 serviront à l'injection du courant (A et B), les 2 et 3 à la mesure du potentiel (M et N). Pour la mesure suivante, le dispositif est déplacé d'une distance a . Les électrodes 2 et 5 serviront alors d'injection du courant et les 3 et 4 de mesure du potentiel. Le processus se répète jusqu'à l'électrode 19. Le premier niveau d'acquisition présente donc 16 possibilités (19-3) de mesure. Comme la caractéristique géométrique du dispositif Wenner est de garder une distance constante entre toutes les électrodes, le second niveau d'acquisition

sera mesuré avec une distance inter-électrode égale à $2xa$. La première mesure du second niveau impliquera donc les électrodes 1 et 7 pour l'injection du courant et 3 et 5 pour la mesure du potentiel. Le processus se répète à nouveau jusqu'à l'électrode 19. Le second niveau comprendra alors 13 possibilités ($19-2 \times 3$). Dans le panneau électrique, le second niveau d'acquisition est représenté à une profondeur plus importante que le premier, étant donné que l'espacement entre les électrodes a été augmenté. On effectue ainsi les mesures de chaque niveau d'acquisition avec $3xa$, $4xa$, et ainsi de suite (il en existe 6 pour 19 électrodes en Wenner). Il est évident que plus la distance inter-électrode augmente, plus le nombre de possibilités diminue. Le nombre de mesures va dépendre du type de dispositif utilisé. Pour avoir de bons résultats, il est nécessaire d'effectuer les mesures de manière systématique de façon garantir un couverture uniforme. Pour le pôle-pôle, une procédure similaire au Wenner est utilisée. Pour un système avec 19 électrodes, 18 mesures sont d'abord effectuées avec une distance $1xa$ entre A et M , puis $2xa$ et ainsi de suite.

Pour un dipôle-dipôle, un Wenner-Schlumberger ou un pôle-dipôle, la séquence de mesure est légèrement différente. Pour un dipôle-dipôle par exemple, les mesures commencent habituellement avec une distance $1xa$ entre les électrodes d'injection du courant (A et B) et de mesure de potentiel (M et N). La première séquence de mesure est alors effectuée en donnant une valeur de 1 pour le facteur n (qui est le rapport AM/MN , fig. 4) puis une valeur de 2 toute en maintenant la distance AB et MN fixe à $1xa$. Lorsque n vaut 2, la distance AM est donc le double de la distance AB (ou MN). Pour les mesures suivantes, la valeur de n est habituellement incrémentée jusqu'à environ 6. A partir de $n=6$, la valeur du potentiel mesurée devient trop faible pour garantir un rapport signal sur bruit acceptable (c'est-à-dire que la mesure est très sensible au bruit électromagnétique ambiant). Pour accroître la profondeur d'investigation, on augmente la distance AB à $2xa$ et une même séquence de mesure est effectuée de manière similaire en incrémentant la valeur de n . Si nécessaire, cette opération peut être encore répétée. Pour le Wenner-Schlumberger et le pôle-dipôle, différentes combinaisons de a et n sont utilisées. Il est donc bien clair que dans le cas d'un Wenner-Schlumberger, le type exact du dispositif va donc être compris entre un Wenner au sens strict et un dispositif gradient (c'est à dire avec une distance MN très petite par rapport à la distance AB).

La procédure décrite pour les acquisitions 2D reste valable en 3D. Les électrodes sont par contre habituellement arrangées selon une grille carrée ou rectangulaire (bien que cela ne soit pas une obligation). La forme de la grille peut donc varier selon celle supposée du corps à étudier. Les fichiers d'acquisition sont alors élaborés de façon à contenir des mesures effectuées selon les directions x et y mais également selon des directions diagonales afin d'optimiser l'information sur la variation spatiale de la résistivité du sol. Il est également possible d'obtenir des modèles 3D à partir de la réunion de

profils 2D acquis séparément. La résolution de ces modèles est toutefois moins grande, car il n'y a pas de mesures effectuées diagonalement (uniquement des mesures selon les directions x et y).

Le choix du dispositif dépend du type de cible à étudier ainsi que du bruit électromagnétique présent sur le site (courants parasites d'origine anthropique, courants telluriques). Si le terrain à étudier est bruité et qu'une bonne résolution verticale est désirée, un dispositif Wenner peut être adapté. Ce dispositif peut par exemple être utilisé en recherche hydrogéologique ou environnementale (recherche de structures horizontales). Si une bonne couverture horizontale ainsi qu'une bonne résolution horizontale est désirée, que le terrain n'est pas trop bruité, un dispositif dipôle-dipôle peut être adéquat. Ce dispositif peut par exemple convenir en archéologie, en géophysique minière ou en génie civil (recherche des structures verticales). Si la géométrie *a priori* du milieu est inconnue, un dispositif Wenner-Schlumberger est certainement adapté. Ce dispositif, généralement recommandé dans la plupart des cas, peut être utilisé en recherche géologique à grande échelle, hydrogéologique ou environnementale. De bons résultats peuvent également être obtenus en génie civil et en archéologie. En 3D, les principaux dispositifs utilisés sont le pôle-pôle mais surtout le pôle-dipôle, car faciles à mettre en œuvre sur une grille d'électrodes bien que nécessitant une ou plusieurs électrodes éloignées. Les dispositifs Wenner ou Wenner-Schlumberger sont peu adaptés à une acquisition 3D étant donné que les électrodes sont colinéaires.

TRAITEMENT DES DONNÉES

Une fois les données de résistivité apparentes collectées, l'opération inverse du problème direct est résolue pour remonter aux caractéristiques inconnues du terrain (fig. 1). Autrement dit, il s'agit, à partir des données mesurées sur le terrain (résistivités apparentes mesurées), de retrouver les paramètres du modèle de terrain (résistivités inversées, proches des résistivités vraies), décrivant le sous-sol de manière plausible et expliquant bien les données de résistivités apparentes mesurées. L'inversion des données n'est pas évidente. Par contre, le problème direct visant à calculer la réponse d'un modèle peut être facilement résolu en utilisant une méthode numérique adaptée (par exemple les différences finies ou les éléments finis). Cette réponse porte le nom de résistivité apparente calculée. L'opération d'inversion va donc consister en une minimisation de la somme des écarts (au carré dans le cas d'une minimisation par moindres carrés) entre les résistivités apparentes mesurées et calculées sur un modèle. En général, le profil est discrétisé sous la forme d'une série de cellules de résistivités homogènes qui constituent donc les paramètres inconnus du modèle (voir plus loin fig. 7). Ces cellules deviennent des blocs en

volume lors d'un traitement 3D. La complexité du problème inverse électrique vient principalement de sa non-linéarité (i.e. les relations qui relient paramètres du modèle et données calculées ne sont pas linéaires). Une approche possible (LOKE et BARKER 1996, FARQUHARSON et OLDENBURG 1998) consiste à rendre linéaire ce problème en effectuant un développement limité du premier ordre autour d'une solution approchée puis en résolvant le problème inverse de manière itérative selon une minimisation par moindres carrés (norme L2). Une description plus détaillée de ce type de résolution peut être trouvée dans MARESCOT (2003) par exemple.

La méthode d'inversion est décrite schématiquement à l'aide d'un jeu de données synthétisées sur un modèle (fig. 6). Cette démonstration utilisant des résistivités apparentes calculées sur un modèle comme jeu de données va nous permettre d'illustrer au mieux la méthode d'inversion étant donné que nous connaissons la «vraie» géométrie du sous-sol. A partir d'un modèle de terrain créé, on synthétise donc un jeu de données à l'aide d'un dispositif Wenner et 35 électrodes. Ce modèle peut par exemple représenter deux murs (500 Ωm) enfouis dans le sol (100 Ωm) en présence d'une discontinuité géologique conductrice (terrain à 10 Ωm). On remarque que le panneau électrique en résistivités apparentes ne reflète que grossièrement les structures du sous-sol (fig. 6). En particulier, les deux petits corps résistants n'apparaissent pas clairement. Il est donc nécessaire d'inverser ces données afin de retrouver un modèle fiable.

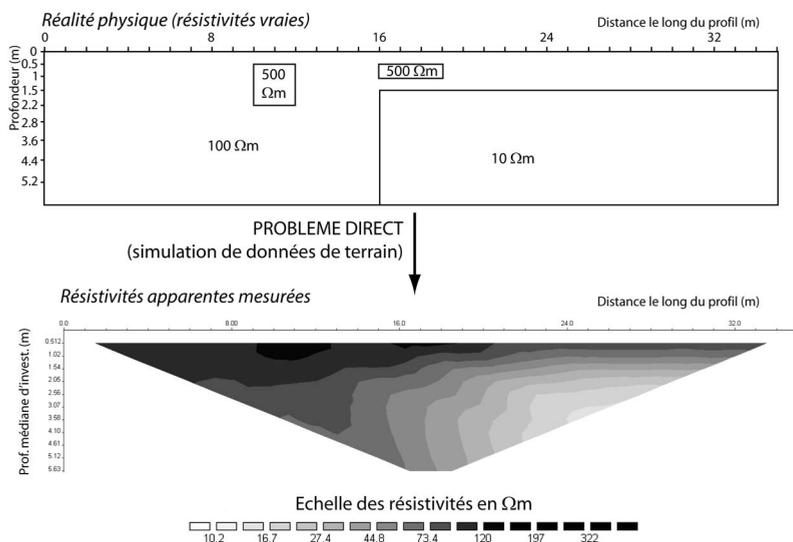


Figure 6.—Description du modèle utilisé pour synthétiser les données et panneau électrique des résistivités apparentes synthétisées.
Description of the model used to simulate synthetic data and apparent resistivity pseudosection.

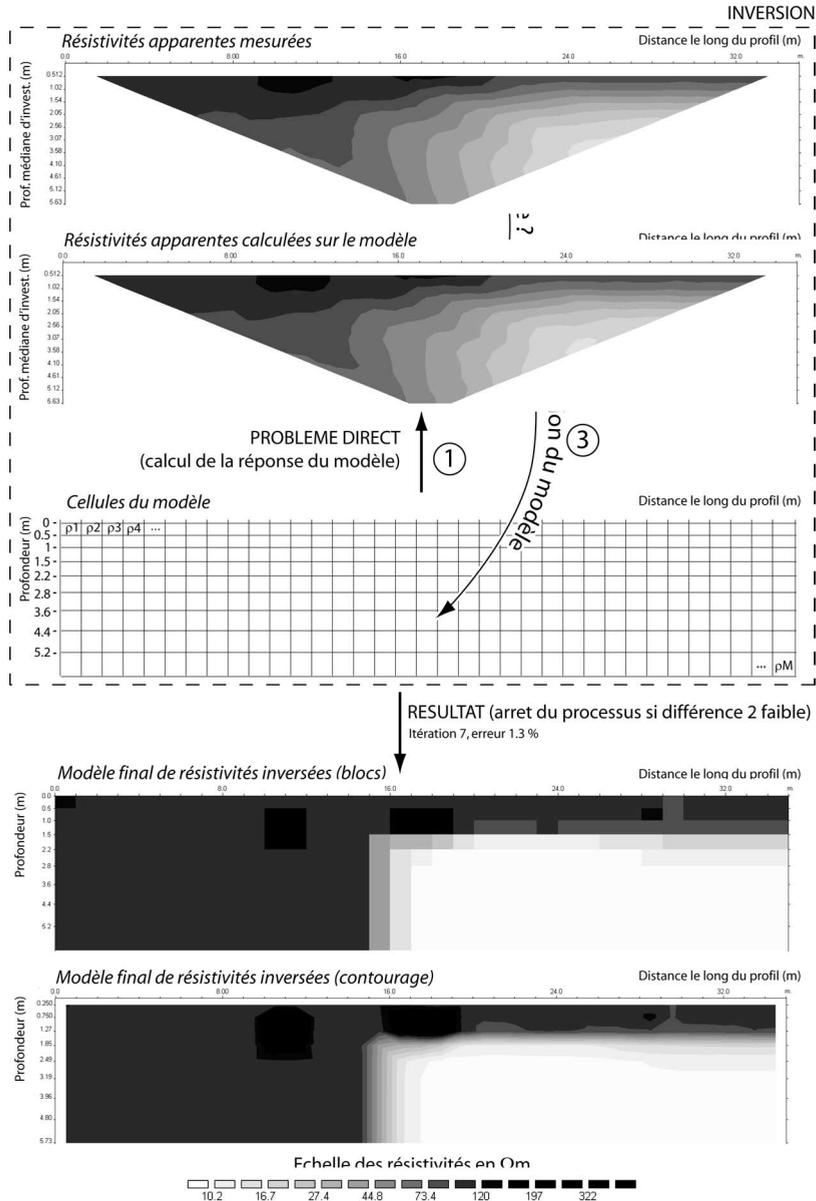


Figure 7.–Présentation schématique de l'inversion des données. Les étapes (1), (2) et (3) sont répétées jusqu'à la convergence du processus itératif.
Schematic representation of the inverse process. Steps (1), (2) and (3) are repeated until the iterative process converges.

Le processus d'inversion est présenté dans la figure 7. Le modèle est représenté sous la forme de cellules de résistivités constantes. Il s'agit donc de déterminer les résistivités inconnues de ces cellules. Un premier modèle de base est tout d'abord élaboré. Ce modèle de base peut être un modèle homogène ou encore un premier modèle approximatif établi par l'utilisateur en fonction des informations *a priori* disponibles. L'algorithme calcule ensuite la réponse de ce modèle en résolvant le problème direct (c'est à dire le calcul des résistivités apparentes calculées à partir de résistivités des cellules du modèle). On notera que le problème direct peut être résolu de manière numérique, par éléments finis ou différences finies. On obtient alors le profil des résistivités apparentes calculées (étape 1). L'algorithme détermine alors le degré de différence entre les profils de résistivités apparentes mesurées et calculées (étape 2). Les cellules du modèle de base sont ensuite modifiées en utilisant une équation adéquate (formulation de Gauss-Newton par exemple). On minimise ainsi la différence entre les données de résistivités apparentes mesurées sur le terrain et calculées sur le modèle courant. L'opération est alors répétée de manière itérative jusqu'à ce que le processus converge (la différence entre les profils de résistivités apparentes mesurées et calculées ne diminue plus de manière significative).

On admet alors que le modèle obtenu est une représentation plausible de la réalité physique car il permet de générer des résistivités apparentes calculées très proches de celles mesurées. Il est toutefois important de réaliser que ce modèle n'est pas unique et que d'autres informations sont souvent nécessaires pour une interprétation correcte du résultat (par exemple des données de forage ou le simple bon sens géologique). Afin d'aider à l'interprétation du résultat, le modèle final est souvent présenté sous la forme d'un contourage d'isovaleurs plutôt que sous forme de cellules.

EXEMPLES D'APPLICATION

Applications hydrogéologique et géologique

Les coupes de la figure 8 sont tirées d'une étude effectuée dans la région de Fribourg. Le but de cette étude est de déterminer la géométrie complexe des anciens tracés des différents cours d'eau (Sarine et Glâne) ayant entaillés la Molasse (MARESCOT *et al.* 2003b). Les données géologiques et géophysiques y sont quasiment inexistantes. Cette région est relativement bruitée du point de vue électrique avec la présence d'une voie ferrée, d'une autoroute et d'industries. Il va sans dire qu'une telle étude doit être menée en parallèle avec d'autres méthodes géophysiques (afin de réduire les ambiguïtés) et qu'un traîné électrique préliminaire est indispensable (positionnement des dispositifs

perpendiculairement aux tracés supposés). L'acquisition est effectuée avec un dispositif de 42 électrodes distantes de 10 m. Les modèles inversés sont représentés sous la forme de profils iso-valeurs. Après inversion, on distingue bien le substratum molassique (env. 100 Ωm) constitué de grès OMM (*Obere Meeresmolasse*, Burdigalien) et la présence de corps résistants (plus de 400 Ωm) pouvant être assimilés à d'anciens cours interglaciaires remplis de graviers. Le géologue peut donc en tirer des informations stratigraphiques et paléogéographiques. Ces cours d'eau constituant également des aquifères potentiels, l'hydrogéologue pourra aussi déterminer si une couche de moraine imperméable protège ou non ces aquifères d'une pollution venant de la surface. La prise en compte de la topographie est également à relever dans cet exemple.

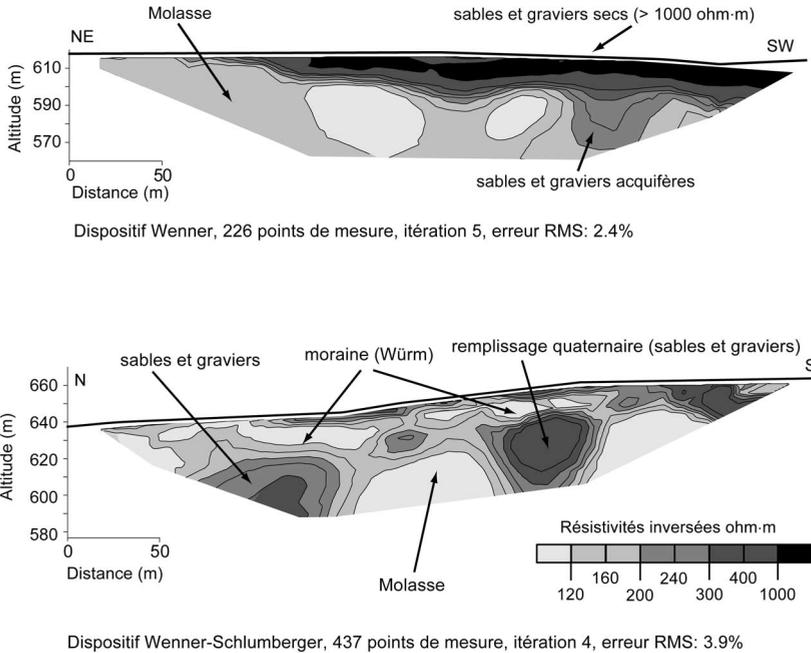


Figure 8.—Deux exemples d'imagerie électrique appliquée à la recherche de paléo-vallées dans la région de Fribourg. Le résultat est présenté sous la forme d'une coupe d'iso-valeurs de résistivité inversées.

Two examples of electrical imaging applied to the study of paleo-valleys in the region of Fribourg (Switzerland). The result is plotted as a vertical section of inverted resistivities.

Application archéologique

La figure 9 montre un exemple d'imagerie 2D appliquée à la prospection archéologique. Il s'agit ici d'effectuer une reconnaissance de la villa gallo-

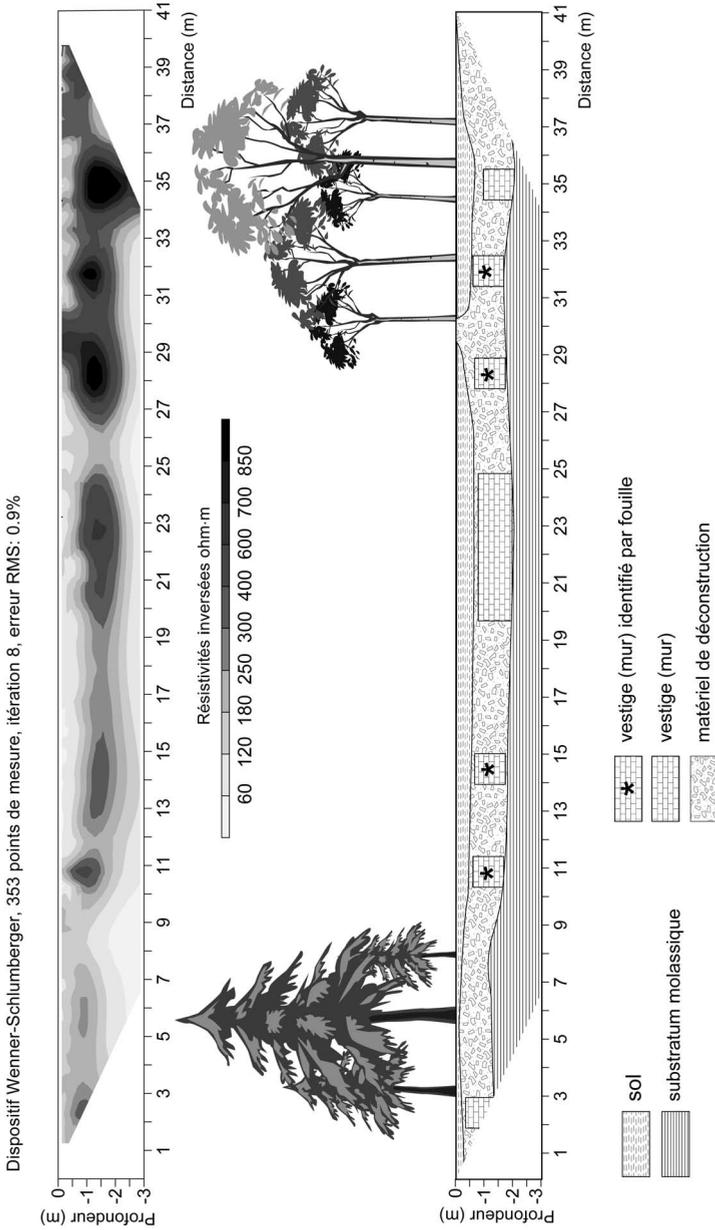


Figure 9.—Exemple d’imagerie électrique appliquée à la prospection archéologique. Le profil du haut représente la coupe d’iso-valeurs de résistivité inversées. Le profil du bas représente l’interprétation du sous-sol. Example of electrical imaging applied to archaeological prospecting. The upper profile shows a vertical section of inverted resistivities. The lower profile shows the interpreted subsurface structures.

romaine d'Yvonand (Vaud). L'acquisition est effectuée avec un dispositif de 42 électrodes distantes de 1 m. Le profil intercepte une série de structures (murs) constitués de matériaux compacts et résistants. Le profil du haut représente la coupe en résistivité inversée. Une série d'anomalies résistantes se détache clairement sur le profil (plus de 250 Ωm) et le substratum molassique plus conducteur (inférieur à 60 Ωm) peut être observé en profondeur. Une interprétation plausible du sous-sol est donnée dans le profil du bas où certains vestiges déjà rencontrés lors de fouilles dans la même zone semblent se prolonger à l'aplomb du profil (structures marquées par une étoile). Par contre, de nouvelles structures inconnues sont révélées par la géophysique (entre 21 m et 24 m, ou encore à 35 m). Dans ce cas l'imagerie de la proche surface (ici les trois premiers mètres) permet de mieux cibler d'éventuelles fouilles, ce qui se traduit par une économie dans le budget de la prospection. La méthode permet également une investigation rapide et expéditive d'un site, lorsque aucune fouille n'est prévue (lorsqu'on désire simplement comprendre la structure d'un bâtiment, ou cartographier le tracé d'une ancienne route par exemple).

CONCLUSION

Ce travail a donné une brève introduction à la méthode de l'imagerie électrique aux personnes intéressées par cette technique. Les principes d'acquisition et de traitement ont été détaillés. Les exemples montrent bien que la méthode peut être utilisée dans le cadre de reconnaissances hydrogéologiques, mais aussi géologiques (pour identifier des formations cachées par des sédiments en surface par exemple), tectonique (pour imager des failles ou chevauchements) et plus généralement en génie civil, pour toute reconnaissance du sous-sol avant la construction d'un bâtiment ou d'un pont. A plus petite échelle, l'imagerie électrique peut être utilisée pour ausculter les premières couches du sol en archéologie ou pédologie (on utilise dans ce cas une distance de quelques centimètres entre les électrodes).

De même, lorsque des forages sous eau existent, des profils d'imagerie électriques peuvent être effectués en immergeant des électrodes sous le sol. On effectue alors des mesures entre forages ou entre un forage et la surface. Dans ce cas, l'imagerie électrique permet d'appréhender des structures géologiques situées à une plus grande distance des forages, ces derniers ne fournissant qu'une information ponctuelle.

Lorsque du matériel de mesure automatique n'est pas disponible, les données peuvent être collectées en utilisant un simple quadripôle électrique dont on fait varier la dimension et la localisation dans l'espace. Bien que plus laborieuse, cette approche a le mérite d'être à la portée de tous. L'inversion des données électrique est un processus actuellement bien maîtrisée. Un grand

nombre de codes commerciaux existent à ce sujet et là encore, lorsque le budget fait défaut, un certain nombre de programmes gratuits peuvent être trouvés sur Internet. Une série de liens utiles est donnée en Annexe. Il est souhaitable que cette méthode puisse être utilisée par le plus grand nombre de personnes intéressées et sorte ainsi du domaine presque exclusif de la géophysique pour profiter pleinement à l'ingénieur géologue, au spécialiste de l'environnement, au pédologue, à l'archéologue ou au spécialiste des matériaux entre autres.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier A. Green et H.R. Maurer (Institut de Géophysique, ETHZ) pour leurs remarques utiles qui ont permis d'améliorer ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- ABDUL-NASSIR S.S., LOKE M.H., LEE C.Y. and Nawawi M.N.M., 2000. Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys. *Geophysical-Prospecting* 48: 647-661.
- CHAMBERS J., OGILVY R. and MELDRUM P., 1999. 3D resistivity imaging of buried oil- and tar- contaminated waste deposits. *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 4: 3-14.
- EDWARDS L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics* 42: 1020-1036.
- Faes T.J.C., VAN DER MEIJ H.A., DE MUNCK J.C. and HEETHAAR R.M., 1999. The electric resistivity of human tissues (100 Hz - 10 MHz): a meta-analysis of review studies. *Physiological Measurement* 20: R1-R10.
- FARQUHARSON C.G. and OLDENBURG D.W., 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure. *Geophysical Journal International* 134: 213-227.
- KELLER G.V. and FRISCHKNECHT F.C., 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, New York. 523 p.
- KUNETZ G., 1966. *Principles of direct current resistivity prospecting*. Gebrüder-Bornträger, Berlin-Nikolassee. 103 p.
- LIONHEART W.R.B., 2004. EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges, and recent developments. *Physiological Measurement* 25: 125-142.
- LOKE M.H. and BARKER R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44: 131-152.
- MARESCOT L., 2003. Un algorithme d'inversion par moindres carrés pondérés: application aux données géophysiques par méthodes électromagnétiques en domaine fréquence. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 88.3: 277-300.
- MARESCOT L., 2004. Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes et de l'Université de Lausanne. 208 p.
- MARESCOT L., LOKE M.H., CHAPPELLIER D., DELALOYE R., LAMBIEL C. and REYNARD E., 2003a. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method. *Near Surface Geophysics* 1: 55-67.
- MARESCOT L., LIACI S. et CHAPPELLIER D., 2003b. Etude géoélectrique des cours d'eau interglaciaires à l'Ouest de la ville de Fribourg (Suisse). *Eclogae Geol. Helv.* 96: 261-273.

- MICHOT D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle interparcellaire. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. 395 p.
- PANISSOD C., 1997. Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipôles permettant la description directe des structures en 3-D. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. 238 p.
- RAMIREZ A. and DAILY W., 2001. Electrical imaging at the large block test; Yucca Mountain, Nevada. *J. Appl. Geophys.* 46: 85-100.
- YARAMANCI U., 2000. Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *J. Appl. Geophys.* 44: 181-196.
- ZHDANOV M.S. and KELLER G.V., 1994. The geoelectrical methods in geophysical exploration. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 31, Elsevier, Amsterdam. 873 p.

Manuscrit reçu le 21 novembre 2005

ANNEXE

Liens Internet utiles sur l'imagerie électrique, contenant des programmes de modélisation directe et d'inversion gratuits (en anglais):

<http://www.geoelectrical.com/>

<http://www.geol.msu.ru/deps/geophys/>

<http://www.es.lancs.ac.uk/es/people/teach/amb/>

Lien Internet utile de l'Université de Lausanne sur les méthodes électriques en général (en français, anglais et espagnol):

<http://www-ig.unil.ch/cours/>

Lien Internet donnant un aperçu des domaines d'applicabilité et des limites pour toutes les méthodes géophysiques (en anglais):

<http://www.gr.sgpk.ethz.ch>