

# *Méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'archéologie et à l'étude de l'environnement*

Alain TABBAGH

Département de Géophysique appliquée, Université de Paris 6 et Centre de  
Recherches Géophysiques, C.N.R.S., 58150 Garchy, France

## **RÉSUMÉ**

La résistivité électrique du proche sous-sol correspond à des déplacements d'ions soit dans le volume de l'eau interstitielle soit à la surface des particules solides. En dehors des sols salés, le contenu en argile est le paramètre déterminant de cette propriété. Les méthodes qui permettent de mesurer la résistivité sont très variées: elles peuvent être classées entre les méthodes électriques et électrostatiques où l'effet des variations temporelles est négligé et les méthodes électromagnétiques basse fréquence où l'induction intervient. On rappelle les principes de ces deux familles de méthodes. La cartographie des variations de la résistivité nécessite aussi le choix d'un pas d'échantillonnage approprié dans les deux directions et le recours à la mécanisation des mesures sur les grands espaces de terrain. Des exemples d'application montrent l'intérêt de la méthode électrostatique sur les sols construits, en archéologie comme en génie civil. Les avantages de la mécanisation du déplacement sur le terrain et de l'automatisation de l'acquisition des mesures sont illustrés par la prospection du site de Balloy. L'application des trois méthodes praticables (électrique, Slingram et MT-VLF) sur un même site d'étude hydrogéologique met en évidence leurs caractéristiques respectives.

**Mots-clés:** Méthodes électriques et électromagnétiques, Archéologie, génie civil, hydrogéologie.

## **RESUMEN**

La conductividad eléctrica del subsuelo más superficial se debe fundamentalmente al desplazamiento de los iones existentes en el fluido intersticial o en la superficie de las partículas sólidas. Excepto en el caso de las arenas saladas, el contenido en arcillas constituye el parámetro determinante de esta propiedad. Los métodos que permiten medir la resistividad son muy diversos pero pueden ser clasificados en dos grupos: los métodos eléctricos y electrostáticos, en los que no se consideran los efectos de las variaciones temporales, y los métodos electromagnéticos de baja frecuencia, donde interviene la inducción. Se recuerda el principio de estas dos familias de métodos.

Para cartografiar las variaciones de resistividad es necesario elegir un paso de muestreo apropiado en las dos direcciones horizontales y utilizar dispositivos mecánicos para la adquisición de las medidas en áreas extensas de terreno. Los ejemplos de aplicación muestran el interés del método electrostático sobre los suelos edificados, ya sea en arqueología como en ingeniería. Las ventajas del desplazamiento mecánico sobre el terreno y de la adquisición automática de las observaciones son ilustradas en la prospección realizada en Balloy (Francia). La aplicación conjunta de tres métodos (eléctrico, Stigram y MT-VLF) con fines hidrogeológicos pone en evidencia sus características respectivas.

**Palabras clave:** Métodos eléctricos y electromagnéticos, Arqueología, ingeniería civil, hidrogeología.

## INTRODUCTION

Le proche sous-sol est un milieu dont les structures et les propriétés peuvent avoir été et être encore notablement modifiées par l'action de l'homme. C'est évidemment le cas sur les «sites archéologiques» où la prospection recherche directement des structures anthropiques ; c'est aussi le cas pour les études environnementales où il s'agit d'une part de comprendre le fonctionnement du milieu naturel et notamment la circulation de l'eau, et d'autre part les modifications conscientes ou inconscientes que l'activité humaine y a provoquées. Les méthodes géophysiques ont pour objet de décrire la structure de ce milieu, de la façon la plus complète, donc si possible en trois dimensions (3D), à partir de la description des variations de l'une ou l'autre de ses propriétés physiques. Parmi celles-ci la conductivité électrique (ou son inverse la résistivité) présente plusieurs caractéristiques avantageuses: elle montre une très grande variabilité, de l'eau de mer (0,25  $\Omega\text{m}$ ) aux sols gelés (10 000  $\Omega\text{m}$ ); elle est sensible à la granularité et à l'humidité du milieu; elle se prête bien à des mesures rapides avec un matériel peu onéreux. Le présent article traite de l'ensemble des méthodes de prospection permettant de mesurer la conductivité électrique du proche sous-sol sur une gamme de profondeur correspondant approximativement à l'intervalle 0-50 m.

## 1. CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU PROCHE SOUS-SOL

Lorsqu'on applique un champ électrique à un milieu conducteur, un courant électrique parallèle et proportionnel à ce champ y apparaît selon la loi d'Ohm:  $\vec{i} = \sigma \vec{E}$ ,  $\vec{i}$  étant la densité de courant,  $\vec{E}$  le champ électrique et  $\sigma$  la conductivité (elle s'exprime en S/m). On utilise soit la conductivité, soit son inverse la résistivité  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ . Pour les milieux non conducteurs, il apparaît une polarisation électrique que l'on caractérise par une permittivité diélectrique  $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$  où  $\vec{D}$  est l'induction électrique,  $\epsilon_0$  la permittivité diélectrique du vide  $\left(\frac{1}{36 \pi 10^9} \text{ F/m}\right)$  et  $\epsilon_r$  la permittivité diélectrique relative ou constante

diélectrique (sans unité). La permittivité joue un rôle déterminant en haute fréquence c'est à dire pour l'utilisation des radar-sol mais ce domaine ne sera pas abordé ici. La conductivité correspond à un déplacement des charges électriques libres présentes dans le milieu. Contrairement aux métaux où les charges mobiles sont les électrons libres, les charges mobiles présentes dans les sols et les roches sont exclusivement des ions qui peuvent se trouver dans deux états : ils peuvent circuler librement dans le volume de l'eau intersticielle, (on parle de conduction volumique), ou glisser à la surface des grains où ils sont adsorbés, (on parle de conduction de surface). Les particules solides et les pores restés vides peuvent être assimilés à des isolants parfaits. La conductivité globale prend en compte ces deux effets mais le second n'est important que si le matériau présente une surface spécifique (surface totale des grains par unité de volume) suffisante, cas que l'on ne rencontre qu'en présence d'argile. Pour les matériaux sans argile saturés, la loi d'Archie (1942) fournit une relation empirique entre la porosité,  $n$ , et le facteur de formation ( $F$ ), rapport entre la résistivité globale du matériau et la résistivité de l'eau qu'il contient: on a  $F = a n^{-m}$ . Dans cette loi,  $a$  est un paramètre proche de 1 et  $m$  un paramètre de «tortuosité» compris entre 1,5 (grains se rapprochant d'une forme sphérique) et 2 (grains allongés) ; pour ce type de matériaux la conductivité reste directement proportionnelle à celle de l'eau. En présence d'argile la conductivité volumique reste dominante si l'eau est salée (de résistivité inférieure à 1  $\Omega\text{m}$ ) par contre pour de l'eau douce (de résistivité supérieure à 10  $\Omega\text{m}$  environ) la conduction de surface l'emporte. Pour la majorité des formations superficielles continentales qui ne sont pas salées la résistivité électrique est gouvernée par la teneur en argile et donc directement corrélée à la granularité : les milieux grossiers sont résistants, les milieux fins sont conducteurs.

## 2. BASES PHYSIQUES ET PRINCIPES DE MESURES UTILISÉS

Les différentes méthodes utilisables en prospection pour mesurer la conductivité électrique du sous-sol relèvent comme tous les phénomènes électromagnétiques des équations de Maxwell. On considère le sous-sol comme un milieu (ou un ensemble de milieux) linéaires, homogènes et isotropes où la densité de charge électrostatique est nulle, car à l'échelle macroscopique il y a dans tout le volume autant de charges positives que de charges négatives. Ces équations s'écrivent alors:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left( \sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{E} \quad (4)$$

Trois propriétés différentes  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont donc impliquées dans le comportement des champs, mais si l'on se limite au domaine des basses fréquences où  $\sigma \gg \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}$  (les courants de déplacement sont négligés devant les courants de conduction), seules  $\mu$  et  $\sigma$  interviendront. Comme les variations de la perméabilité magnétique,  $\mu$ , sont très faibles puisque la susceptibilité magnétique des sols et des roches reste inférieure à  $10^{-2}$ ,  $\mu = \mu_0 (1 + X)$ , on pourra sauf exception (cf infra appareils Slingram) adopter l'approximation  $\mu \cong \mu_0$ . Il ne reste donc qu'une seule propriété déterminant le comportement des champs:  $\sigma$ . Deux cas sont considérés, le cas statique ou de la prospection électrique, dans lequel s'applique l'approximation  $\frac{\partial}{\partial t} \cong 0$ , et le cas de la prospection électro-magnétique où tel n'est pas le cas. Dans les deux cas l'équation (4) s'écrit  $\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}$ .

Pour la prospection électrique l'équation (3) se réduit à  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ , les phénomènes sont strictement indépendants de la perméabilité magnétique et il n'y a pas de phénomène d'induction. Le champ  $\mathbf{E}$  dont le rotationnel est nul peut être considéré comme le gradient d'un potentiel,  $\vec{E} = -\text{grad}V$  qui, à l'intérieur d'un milieu homogène, vérifie, du fait de l'équation (1), l'équation de Laplace  $\Delta V = 0$ .

## 2.1. Principe de mesure en prospection électrique

### 2.1.1. *Le quadripôle*

Il existe des circulations naturelles de courant dues à des phénomènes de polarisation spontanée ou aux courants induits par les variations très lentes du champ magnétique terrestre, mais leur utilisation a été peu pratiquée pour l'exploration du proche sous-sol, par les prospecteurs qui ont préféré des mesures «actives» où un courant est injecté artificiellement dans le sol. Pour injecter un tel courant, il suffit de disposer de deux piquets métalliques, ou électrodes, que l'on plante dans le sol et entre lesquels on établit une circulation. Toutefois la mesure du rapport entre la différence de potentiel entre deux piquets et l'intensité du courant injecté ne nous renseigne pas sur la résistivité du milieu : l'intensité est déterminée par la somme des «résistances de prise de terre» des deux électrodes alors que la résistance du terrain lui-même tend vers zéro puisque la surface qui s'offre au paysage du courant est illimitée. Pour pouvoir mesurer la résistivité électrique du sous-sol on a utilisé un quadripôle selon le principe ci-après.

Pour calculer le potentiel en tout point de la surface pour l'injection d'un courant  $I$  par une électrode A et sa récupération par une autre électrode B, on applique le principe de superposition qui stipule que le potentiel existant en présence des deux électrodes est la somme du potentiel créé par l'électrode A seule et du potentiel créé par l'électrode B seule. Si l'électrode A est placée à la surface d'un sol homogène, le courant  $I$  se répartit régulièrement sur une demi-sphère où la densité de courant radial est  $i_r = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2}$ ; le champ électrique radial a donc pour expression  $E_r = \frac{\rho I}{2 \pi r^2}$  et le potentiel

$$V = \frac{\rho I}{2 \pi r} \quad (5)$$

si l'on choisit d'avoir un potentiel nul à l'infini. En tenant compte des deux électrodes A et B et en utilisant deux points N et M, pour le potentiel puisque seules les différences de potentiel peuvent être mesurées, on obtient finalement

$$V_M - V_N = \rho \frac{I}{2 \pi} \left( \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right);$$

on a donc une mesure,  $\frac{\Delta V}{I}$ , qui est proportionnelle à la résistivité du milieu et qui fait intervenir un coefficient géométrique, k, dépendant de la position relative des électrodes.

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{\rho}{k} \text{ avec } k = \frac{2 \pi}{\left( \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right)};$$

Pour un sous-sol non homogène on exprimera les résultats mesurés par une grandeur homogène à une résistivité que l'on appelle «résistivité apparente»:  $\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot k$ , c'est la résistivité d'un sol homogène qui donnerait la même mesure pour la même disposition d'électrodes.

### 2.1.2. Utilisation du quadripôle et dispositifs multipôles

Le choix de la position relative des électrodes est *a priori* très ouvert et ce sont des considérations pratiques, ayant engendré par la suite des habitudes, qui ont déterminé les différentes configurations géométriques de quadripôles utilisées. La taille de ceux-ci est choisie en fonction de la profondeur d'investigation recherchée, en application de la loi de similitude qui stipule que si l'on multiplie toutes les caractéristiques géométriques du terrain et du quadripôle par un même facteur la résistivité apparente et ses variations respecteront le même rapport de similitude. Cette idée est à la base du sondage électrique: en fixant le centre du quadripôle et en augmentant régulièrement sa taille, on prend en compte dans la mesure une épaisseur de terrain de plus en plus grande. Ceci permet, si le terrain est tabulaire de restituer la variation de la résistivité avec la profondeur. Cette méthode d'investigation est utilisée de façon complémentaire avec le traîné ou profilage dans lequel un quadripôle de taille fixe est déplacé à pas régulier sur le terrain de façon à décrire les variations latérales de la résistivité. Les dispositifs multipôles ont pour but de réaliser simultanément ces deux fonctions puisqu'à partir d'un réseau d'électrodes ils permettent de faire varier la taille du quadripôle et de déplacer son centre.

Les quadripôles les plus couramment utilisés en prospection de subsurface sont (fig. 1) :

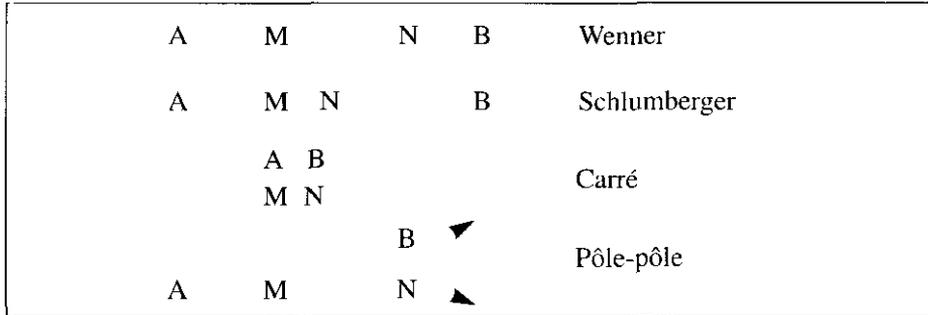


Fig. 1. Différents types de quadripôles utilisés pour la prospection du proche sous-sol.

- le quadripôle Wenner où les quatre électrodes sont alignées et équidistantes d'un écart  $a$  ; on a  $k = 2 \pi a$
- le quadripôle Schlumberger où les quatre électrodes sont alignées, où  $A$  et  $B$  d'une part et  $M$  et  $N$  d'autre part, sont symétriques par rapport au centre et où  $MN \ll AB$  ; on a  $k = \pi \frac{AB^2}{4MN}$
- le quadripôle carré où  $A$  et  $B$  d'une part et  $M$  et  $N$  d'autre part sont les sommets d'un même côté ; on a  $k = 10,72 a$ ,  $a$  étant le côté du carré
- le pôle-pôle où  $B$  et  $N$  sont renvoyés au loin et très éloignés entre eux ; on a  $k = 2 \pi a$ .

### 2.1.3. Quadripôles électrostatiques

Si au lieu de considérer un milieu conducteur comme le sous-sol on considère un milieu isolant ou un milieu à la fois diélectrique et conducteur caractérisé par une permittivité complexe, tout pôle électrostatique de charge  $Q$  placé dans ce milieu créera un potentiel  $V$  dépendant de la distance  $R$  au pôle et

ayant pour expression  $V = \frac{Q}{4 \pi \epsilon_0 \epsilon_r} \cdot \frac{1}{R}$ . Il est en principe possible ainsi de

déterminer  $\epsilon_r$ .

Si l'on s'intéresse au sous-sol et que l'on place le pôle dans l'air au dessus du sol,

la méthode des images nous permettra d'écrire  $V = \frac{Q}{4 \pi \epsilon_0} \left[ \frac{1}{R} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_s}{\epsilon_0 + \epsilon_s} \frac{1}{R'} \right]$  où

$\epsilon_s$  est la permittivité complexe du sol et  $R'$  la distance du point de mesure à l'image c'est à dire au symétrique de  $Q$  par rapport au plan qui constitue l'in-

terface air-sol. Si le pôle ou le point de mesure sont approchés du sol de telle sorte que la hauteur devienne négligeable on aura  $R' = R$ . Si la charge  $Q$  est alternative,  $Q = Qe^{i\omega t}$ , tout en ayant une fréquence suffisamment basse pour que l'approximation statique reste justifiée, on pourra adopter pour  $\epsilon_s$  l'expression tirée

de l'équation (4) :  $\epsilon_s = \epsilon_0 \left( \epsilon_r + \frac{\sigma}{i \omega \epsilon_0} \right)$ . Le potentiel aura alors pour expression

$$V = \frac{Q}{4 \pi \epsilon_0} \left[ \frac{2}{1 + \epsilon_r + \frac{\sigma}{i \omega \epsilon_0}} \right] \frac{1}{R}$$

soit puisque 1 et  $\epsilon_r$  sont très petits devant  $\frac{\sigma}{i \omega \epsilon_0}$

$$V \cong \frac{Q}{4 \pi \epsilon_0} \frac{2 i \omega \epsilon_0}{-\sigma} \frac{1}{R} \text{ d'où } V = \frac{I}{2 \pi \sigma} \frac{1}{R} \text{ si l'on considère le}$$

courant  $I$  alimentant le pôle de charge  $Q$ . On retrouve donc la même expression que celle obtenue par une électrode d'injection (5). Des calculs électromagnétiques complets et des expérimentations (Grard & Tabbagh 1991, Tabbagh *et al.*, 1993) ont permis de vérifier que cette expression s'appliquait parfaitement aux quadripôles de faibles dimensions (inférieures à 20 ou 30 m) et que des quadripôles électrostatiques comportant deux pôles d'injection et deux pôles de mesure pouvaient être utilisés (profilage et sondage, configuration des pôles) exactement comme les quadripôles électriques. Lorsqu'on augmente la taille de tels quadripôles et que le nombre d'induction (cf. définition *infra*) approche de 1, on doit considérer pour l'interprétation le problème électromagnétique complet (Benderitter *et al.*, 1994) mais l'utilisation du quadripôle reste possible.

#### 2.1.4. Méthodes de modélisation utilisées dans l'interprétation des mesures

Le calcul du potentiel à la surface d'un terrain tabulaire est ancien (Stephanescu *et al.*, 1931). En coordonnées cylindriques centrées sur le point d'injection, il aboutit à :

$$V = \frac{\rho_1 I}{2 \pi} \left( \frac{1}{r} + \int_0^\infty 2 T(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \right)$$

avec

$$T(\lambda) = \frac{\rho_1 - R_2}{(R_2 - \rho_1) - (\rho_2 + R_2) e^{2\lambda c}}$$

la quantité  $R_2$  étant calculée par récurrence (Flathe, 1955) à partir de

$$R_n = \rho_n \text{ et } R_i = \rho_i \frac{R_{i+1} + \rho_i \operatorname{th} \lambda e_i}{\rho_i + R_{i+1} \operatorname{th} \lambda e_i}$$

seurs des couches successives.  $J_0$  est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 0. Le calcul de la transformée de Hankel apparaissant dans l'expression de  $V$  est effectué par convolution (Ghosh, 1971). La solution du problème direct 1D étant connue, l'inversion des sondages électriques est réalisée par approximations successives à partir d'un premier modèle, en utilisant par exemple la méthode des moindres carrés.

Pour résoudre les problèmes 3D (ou 2D dans les quelques cas où cette approximation est acceptable) nécessaires à l'interprétation des trainés, on dispose soit des méthodes purement numériques comme les différences finies ou les éléments finis, soit de méthodes «d'équation intégrale» où les inhomogénéités sont remplacées par des répartitions de sources, soit à leur surface, soit à l'intérieur de leur volume. Pour les problèmes 3D, la seconde solution a jusqu'à présent été préférée à la première car elle permet un maillage plus réduit puisque limité aux seules inhomogénéités. Le premier calcul utilisant les intégrales de surface a été proposé par Alfano (1959). L'application d'un maillage sur le volume par la méthode des moments (cf. *infra*) est plus récente (Dabas *et al.*, 1994) mais elle permet d'utiliser le même maillage pour les calculs électromagnétiques que pour les calculs en électrique.

## 2.2. Principe de mesure en prospection électromagnétique basse fréquence

### 2.2.1. Concepts généraux

En basse fréquence l'équation (3) est conservée dans sa forme complète  $\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$  et l'équation (4) réduite à  $\nabla \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}$ . En combinant ces deux équations, on peut donc écrire pour chacun des champs l'équation (6)

$\Delta \mathbf{E} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$  en dehors des sources, ce qui en régime sinusoïdal conduit à une équation d'Helmholtz

$$\Delta \mathbf{E} - i\sigma \mu \omega \mathbf{E} = 0 \quad (7)$$

#### 2.2.1.1. Effet de peau et sondage fréquentiel

Si l'on se place dans le cas le plus simple où on a un champ horizontal  $E_{x_0}$

à la surface d'un sol homogène et que l'on cherche sa répartition à l'intérieur du sol, on obtient en appliquant l'équation (7)

$E_x = E_{x0} e^{-\sqrt{\frac{\sigma\mu\omega}{2}}z} e^{-i\sqrt{\frac{\sigma\mu\omega}{2}}z}$ . Le champ est donc amorti et déphasé avec la profondeur. L'atténuation exponentielle est caractérisée par une profondeur de pénétration (ou profondeur de peau)  $p = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}}$  et on a une concentration du

du champ et du courant en surface. Comme  $p$  est inversement proportionnel à  $\sqrt{\omega}$  on va pouvoir faire varier l'épaisseur de terrain prise en compte dans les mesures en faisant varier la fréquence et on dispose d'une méthode de «sondage fréquentiel», *a priori* d'une exécution plus rapide que les sondages géométriques pratiqués avec la méthode électrique.

L'effet de peau est par ailleurs une contrainte qui limite la profondeur d'investigation, surtout pour les terrains conducteurs, mais cette contrainte n'est pas trop sévère pour les applications peu profondes. Pour un sol de  $100 \Omega\text{m}$  en effet,  $p$  vaudra 100 m pour la fréquence de 2500 Hz, fréquence où les mesures ne posent pas de difficultés particulières. Par contre si l'on désire employer une méthode de sondage fréquentiel sur les deux ou trois premiers mètres, on se heurte à une difficulté insurmontable. Un tel sondage demanderait de faire varier  $p$  entre 0,5 et 5 m, ce qui si l'on se base sur la formule précédente pour un sol de  $100 \Omega\text{m}$ , reviendrait à utiliser des fréquences comprises entre 50 MHz et 0,5 MHz ; or, à ces fréquences, l'approximation  $\sigma \gg \epsilon\omega$  n'est plus valable et, lorsqu'on tient compte de  $\epsilon$ , la profondeur de pénétration n'a plus la même

expression et tend vers  $p = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$  indépendante de la fréquence. Pour les

cinq premiers mètres environ (selon la conductivité) seuls les sondages géométriques sont utilisables en électromagnétisme basse fréquence.

Pour les profondeurs plus importantes, le sondage fréquentiel est possible mais plutôt que d'émettre une série de fréquences discrètes, il est possible de revenir dans le domaine temps en émettant en impulsion et en analysant la réponse du sol à une impulsion.

### 2.2.1.2. Lois de similitude et nombre d'induction

Soit  $L$  la dimension géométrique caractérisant un dispositif de mesure et une dimension des structures du sous-sol : l'équation (7) fait apparaître que le paramètre sans dimension  $L^2\sigma\pi\omega$  caractérisera le comportement des champs. Ce paramètre est appelé nombre d'induction. La perméabilité magnétique étant toujours très proche de l'unité, ce paramètre exprime le lien qui existe entre les variations spatiales et le produit de la résistivité par les variations temporelles, lien qui n'existe pas dans le cadre de l'approximation statique.

Le comportement des champs sera identique pour tous les cas qui présentent le même nombre d'induction, ce qui peut s'exprimer en disant que, pour être semblables, deux cas doivent vérifier la relation  $K_L^2 = K\rho K_T$  où  $K_L$  est le rapport de leurs dimensions géométriques,  $K\rho$  le rapport de leurs résistivités et  $K_T$  le rapport de leurs périodes (ou de leurs constantes de temps).

### 2.2.1.3. *Types de sources utilisables*

Tout système de mesure comporte un dispositif d'émission, ou source, qui crée un champ magnétique variable dans le temps et un dispositif de réception qui mesure une ou plusieurs composantes du champ électromagnétique. Au niveau du récepteur, on doit choisir la ou les composantes mesurées soit en fonction de considérations pratiques, (on cherche ainsi à mesurer des rapports entre les composantes, ce qui permet d'éliminer les effets de variations d'intensité de la source), ou, plus fondamentalement, en fonction de la sensibilité des grandeurs mesurées aux variations de la conductivité du terrain. Le choix de la source a beaucoup d'importance : le champ primaire (champ créé par la source en l'absence du sol) est déterminant pour la profondeur d'investigation et pour la complexité des interprétations. Les conditions pratiques d'utilisation de la méthode en dépendent en premier lieu, aussi a-t-on pris l'habitude de classer les méthodes de prospection électromagnétique basse fréquence à partir du type de sources utilisé. Ces types sont au nombre de trois : les sources lointaines qui délivrent sur la zone prospectée un champ primaire uniforme, les sources étendues (câbles rectilignes ou grande boucle de taille équivalente ou supérieure à la dimension de la surface prospectée), les sources dipolaires. Pour la prospection peu profonde des considérations pratiques tenant à la légèreté des appareillages utilisés et à la rapidité d'exécution des prospections ont conduit à n'employer que des sources lointaines correspondant à des émetteurs artificiels de la gamme V.L.F. (3-30 kHz) ou des dipôles magnétiques, des bobines ou des boucles peu étendues.

### 2.2.1.4. *Modélisations utilisées pour l'interprétation des mesures*

Comme en prospection électrique on dispose de solutions analytiques pour le problème 1D ; elles sont fondées sur la même méthode itérative et pour les sources dipolaires sur l'utilisation de la transformée de Hankel. La méthode des moments, généralement utilisée pour les problèmes 3D, est basée sur le principe suivant. Soit une hétérogénéité de conductivité  $\sigma_s$  située dans un terrain tabulaire, à l'intérieur le champ total vérifie l'équation (8)  $\nabla \times \mathbf{H} = \sigma_s \mathbf{E}$ ; et le champ  $(H_p, E_p)$  qui existerait en l'absence de cette hétérogénéité vérifierait  $\nabla \times \mathbf{H}_p = \sigma \mathbf{E}_p$ . En soustrayant cette équation de la précédente, on fait apparaître que le champ perturbateur  $(\mathbf{H} - \mathbf{H}_p, \mathbf{E} - \mathbf{E}_p)$  associé à la présence de l'hétérogénéité vérifie l'équation  $\nabla(\mathbf{H} - \mathbf{H}_p) = \sigma(\mathbf{E} - \mathbf{E}_p) + (\sigma_s - \sigma)\mathbf{E}$ ; il est donc équivalent au champ que créerait dans le milieu non perturbé de conductivité  $\sigma$ , une

source d'intensité  $J_s = (\sigma_s - \sigma) E$ . On peut remplacer l'hétérogénéité par une répartition volumique de sources dont les intensités dépendent les unes des autres puisque c'est le champ total  $E$  qui intervient dans  $J_s$ . On doit donc d'abord résoudre, en chaque point de l'hétérogénéité, l'équation intégrale

$$E_{(r)} = E_{p(r)} + (\sigma_s - \sigma) \int G(r - r') E(r') dr' + \frac{\sigma_s - \sigma}{\sigma} E, \text{ où } G \text{ est la fonction de}$$

Green correspondant au champ créé en chaque point par un dipôle d'amplitude 1 en un autre point. Une fois déterminé le champ, on peut calculer en tout point extérieur le champ perturbateur correspondant à l'hétérogénéité.

### 2.2.2. Utilisation du champ E.M. créé par les émetteurs artificiels

Les signaux naturels, largement utilisés en prospection à plus grande profondeur, ne sont pas suffisamment forts, dans les gammes de fréquences correspondant aux profondeurs considérées, pour pouvoir donner lieu à une utilisation, mais la présence d'émetteurs artificiels offre au prospecteur une source gratuite et suffisamment puissante pour que les mesures soient faciles. Les émetteurs utilisés sont en général ceux de la gamme V.L.F. (*very low frequency*) entre 15 et 25 kHz (ils servent à la radio-navigation et aux communications), mais on peut aussi utiliser les émetteurs des gammes L.F. (30-300 kHz) et M.F. (300 kHz-3MHz) ; la profondeur d'investigation est alors plus limitée et les zones géographiques d'emploi, plus restreintes. On utilise donc surtout les émetteurs V.L.F. et ce sigle a été adopté dans la dénomination des différentes techniques de prospection.

Ces émetteurs rayonnent un champ primaire comprenant un champ électrique vertical  $E_z$  et un champ magnétique horizontal  $H_y$ . En présence du sol, l'induction créée par les variations de  $H_y$  produit un champ électrique horizontal  $E_x$  dans la direction de propagation. Si le sol n'est pas tabulaire, les six composantes peuvent exister. Les prospecteurs se sont intéressés à deux composantes : le champ  $E_x$  et le champ  $H_z$ .

L'existence du champ  $H_z$  est associée aux variations latérales de la résistivité du terrain ; on le mesure par son rapport  $\frac{H_z}{H_y}$  de façon à éliminer les variations

de puissance du signal primaire. Cette mesure a connu un grand succès en prospection minière où les cibles sont bonnes conductrices, elle est plus difficile à appliquer dans les problèmes environnementaux ou pédologiques car les structures recherchées ne se limitent pas à de bons conducteurs. On lui préfère donc la mesure de  $E_x$ . Cette composante existe que le sol soit, ou non, tabulaire ; elle peut permettre de définir une résistivité apparente et apporter par là une information globale sur la nature du sous-sol ; elle est croissante avec la résistivité et bien adaptée à la détection des structures résistantes et conductrices. Plutôt

que de mesurer  $E_x$  seule, on peut mesurer soit  $Z = \frac{E_x}{H_y}$  soit  $W = \frac{E_x}{E_z}$  mais la

première, qui est la mesure «magnéto-tellurique», est préférable car d'une part les mesures de  $H_y$  sont plus faciles que celles de  $E_z$  et d'autre part la mesure du rapport sera moins sensible aux erreurs d'orientations des capteurs tant que leur orientation relative restera correcte. La mesure de  $E_x$  peut être faite avec un capteur à contact conducteur : on mesure alors le champ dans le sol et cette mesure ne peut être perturbée par  $E_z$  qui est très faible. Par contre si l'on choisit de mesurer  $E_x$  dans l'air avec un capteur de type électrostatique ou capacitif, il faut trouver une solution pour éviter d'être perturbé par  $E_z$  qui est 30 à 100 fois plus fort (Tabbagh *et al.*, 1991). La dénomination la plus courante de la méthode est «résistivité MT-V.L.F.» (*MT-V.L.F. resistivity*). Cette méthode est utilisée en cartographie car on ne dispose pas d'émetteurs répartis régulièrement sur une bande de fréquences suffisamment large, et les différences de résistivité apparente observées entre émetteurs tiennent plus aux différences d'orientation des champs qu'aux différences de fréquence. Ce problème «d'anisotropie apparente» c'est à dire de dépendance des anomalies avec la direction du champ excitateur, a aussi beaucoup d'importance en cartographie où il doit impérativement être corrigé (cf *infra*).

### 2.2.3. Méthode Slingram

Ce terme (d'origine suédoise) est utilisé pour l'ensemble des appareils où l'on utilise comme source un dipôle magnétique et où l'on mesure l'une ou l'autre des composantes du champ magnétique. Ce type d'appareil est donc libre de tout contact avec le sol et très mobile. Les paramètres déterminant les caractéristiques de l'appareil seront : la fréquence, l'écartement entre les deux bobines,  $L$ , et l'orientation des deux bobines. Leur emploi est ancien en prospection minière mais ce n'est que récemment, avec la réalisation d'appareil à faible nombre d'induction (où  $B = L^2 \sigma \mu \omega \ll 1$ ), que leur emploi s'est développé dans les autres applications peu profondes. Sous cette condition le champ magnétique secondaire comprend une composante en quadrature avec le champ primaire qui est directement proportionnelle à la conductivité, et une composante en phase «statique» directement proportionnelle à la susceptibilité magnétique du sous-sol (Tabbagh, 1986a). Ce type d'appareil est donc particulièrement intéressant en prospection archéologique où la susceptibilité magnétique est un paramètre très significatif et où il permet de réaliser une «double prospection». Le choix de l'orientation des bobines est important pour l'interprétation et pose des problèmes complexes en présence de structures 3D (Tabbagh, 1986b). Toutefois la solution de bobines coplanaires, qui nécessite une compensation électronique du champ primaire au niveau de la réceptrice, présente (Mc Neill, 1980) l'avantage de permettre à la fois une mesure en disposition horizontal co-

planaire (HCP) où les plans des bobines sont horizontaux et vertical coplanaire (VCP) où les plans des bobines sont verticaux.

#### 2.2.4. Méthode T.D.E.M. (Time domain electromagnetic)

Les méthodes présentées jusqu'ici étaient toutes «fréquentielles» c'est à dire fondées sur l'utilisation de champs alternatifs sinusoïdaux de fréquence spécifiée, mais il est aussi possible d'induire des courants dans le sol en émettant des impulsions, en travaillant dans le domaine dit «temporel». Normalement les deux solutions sont équivalentes puisque l'on passe de l'une à l'autre par la transformée de Fourier; en pratique cependant cette solution présente trois avantages:

- on mesure le champ secondaire après l'impulsion primaire on n'a donc pas à compenser le champ primaire ni à considérer de contrainte importante de positionnement relatif des bobines
- on peut utiliser de fortes puissances
- les impulsions ont un spectre large et l'analyse de la réponse transitoire en fonction du temps est un sondage.

La sensibilité au bruit électromagnétique ambiant peut être corrigée par une accumulation (*stacking*) des données.

L'appareillage n'étant pas facile à déplacer au sol puisqu'il nécessite des boucles d'émission relativement grandes, la meilleure utilisation de cette méthode est le sondage pour la gamme de profondeurs égales ou supérieures à 10 m.

### 3. MISE EN OEUVRE PRATIQUE DES MÉTHODES

Si l'on adopte, pour une première approche, la partition traditionnelle entre le traîné (ou profilage) et le sondage - l'un ayant pour but de déterminer les variations latérales de résistivité, l'autre les variations verticales - on peut essayer de voir en quoi les différentes méthodes sont complémentaires et/ou concurrentes et quels sont les problèmes communs pour les deux applications.

#### 3.1. Sondage

Le choix d'une méthode électrique ou E.M. de sondage se fait en considérant les limites propres aux méthodes puis les difficultés pratiques inhérentes à chacune. Les limites peuvent se résumer ainsi:

- Pour les trois ou quatre premiers mètres, le sondage E.M. (fréquentiel ou

temporel) est inapplicable puisque la loi  $p = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}}$  n'est plus respectée

lorsqu'on monte au-dessus de 100 à 300 kHz (selon les résistivités des terrains). Les sondages ne peuvent alors être que géométriques par écartement des capteurs ou des électrodes.

- Les méthodes électromagnétiques sont peu sensibles aux couches résistantes et très sensibles aux couches conductrices. La même dissymétrie existe en prospection électrique mais elle est beaucoup moins importante. Sauf dans le cas où l'on cherche spécifiquement des couches conductrices, on aura intérêt à utiliser le sondage électrique.
- En sondage électrique par contre, l'extension latérale du quadripôle est quatre à dix fois celle de l'épaisseur étudiée, et le risque d'effets latéraux est plus important.
- Sur le plan pratique il est beaucoup plus simple et rapide d'effectuer des sondages fréquentiels ou temporels que des sondages géométriques.
- Les mesures électromagnétiques sont perturbées par la présence d'objets métalliques : voitures, lignes électriques...

En tenant compte de toutes ces contraintes, une pratique raisonnable consiste à adopter le sondage électrique ou électrostatique pour les investigations sur les dix premiers mètres et à passer au-delà au sondage T.D.E.M. quand le lieu de mesure n'est pas perturbé et surtout quand les couches que l'on veut étudier sont conductrices.

### 3.2. Traîné

Comme en sondage, le choix de la méthode et des paramètres de l'appareillage nécessite la prise en compte des contraintes énoncées ci-dessus. Toutefois alors que le pas de progression en sondage est choisi sans difficultés (de l'ordre de cinq à six points par décade) le choix de la maille de mesure est très complexe en traîné ; il fait en effet intervenir des conditions théoriques (respect du théorème de Shannon), des problèmes de temps de mesure et d'étendue de la surface couverte, donc des problèmes de coût, et des problèmes de légèreté du matériel et de conditions d'accès au terrain.

#### 3.2.1. Choix de la maille de mesure

En application du théorème de Shannon on doit, pour ne perdre aucune information, adopter dans les deux directions de l'espace un pas inférieur à la moitié de la longueur d'onde spatiale la plus petite existant dans les données. Ceci peut conduire à adopter un pas très fin : pour un appareil Slingram de con-

figuration HCP par exemple, les structures 3D de dimensions inférieures à l'écartement des bobines donnent des oscillations qui imposeraient un pas de

mesure  $\leq \frac{L}{2}$ . Le prospecteur respecte rarement cette règle, d'abord parce

qu'elle ne suffit pas à garantir en pratique l'absence d'*aliasing* (différents bruits introduisent des causes d'*aliasing* qui doivent être filtrées) d'autre part parce que les prospecteurs cherchent à minimiser la durée de toute opération, ce qui conduit à rechercher un compromis empirique entre la qualité des mesures et la taille de la maille. Dans le cas de la configuration Slingram citée plus haut, il est courant d'adopter des mailles de l'ordre de  $L$  voire  $2L$ . Le contrôle de la qualité des données acquises se fait alors *a posteriori* en analysant le variogramme. Cette approche mérite cependant un réexamen complet à partir d'un fait technologique nouveau: le temps de mesure avec la quasi totalité des appareils est devenu négligeable devant le temps de déplacement sur le terrain ; le temps total se réduit donc au temps d'implantation des repères topographiques et au parcours du terrain. Les mesures peuvent être effectuées automatiquement au cours du déplacement qui est réalisé par profil dans le cas le plus simple (le parcours le plus court est en spirale mais sa réalisation pratique serait beaucoup plus complexe). La maille intervient toujours et gouverne le temps d'exploration par le nombre de profils et leur longueur, mais le long du profil les mesures peuvent être très largement suréchantillonnées et permettre toute une série de prétraitements (Tabbagh, 1988) qui ne pouvaient être envisagés en mesure point par point.

### 3.2.2. Déplacement mécanisé

La possibilité d'effectuer des mesures en continu pose un autre problème, celui de la mécanisation. Sur le terrain la mécanisation permet un déplacement un peu plus rapide que le déplacement à pied ; elle est moins fatigante pour l'opérateur ; elle permet de déplacer des dispositifs relativement lourds et/ou complexes. Par contre les conditions d'accès au terrain peuvent être beaucoup plus restrictives que l'accès à pied ; l'investissement est plus important et le déplacement du matériel jusqu'au terrain plus compliqué. La perturbation introduite par la présence d'un tracteur peut exclure leur utilisation avec la méthode Slingram. Il est possible aussi d'adopter, comme solution intermédiaire, un chariot pour porter l'appareil tout en gardant un déplacement non motorisé.

### 3.2.3. Multipôles

Une autre évolution technologique est la possibilité de commuter rapidement toute une série d'électrodes et/ou de capteurs. Ceci permet d'envisager à l'aide d'un multipôle en électrique une investigation qui combine directement traîné et son-

dage et réalise une exploration 3D directe. Pour les quadripôles mobiles, cette solution est encore un sujet de recherche, mais pour les séries d'électrodes fixes, elle est très pratiquée sous la forme du «panneau d'électrodes» avec pour objectif principal une investigation plus détaillée que l'association antérieure traîné-sondage car la densité de mesure est beaucoup plus importante. Les appareils Slingram à récepteurs ou émetteurs multiples commencent seulement à apparaître.

## 4. EXEMPLES D'UTILISATION

### 4.1. Eglise Saint Etienne, Nevers

Les églises médiévales sont en règle générale construites sur des bâtiments plus anciens et ont subi au cours de leur histoire d'importants réaménagements dont les traces persistent dans le sous-sol. La reconnaissance des substructures des églises et des autres bâtiments médiévaux, constitue un élément déterminant de l'archéologie urbaine en général et des monuments religieux en particulier. Ce type de prospection pose au géophysicien des problèmes particuliers: il est impossible ou interdit d'utiliser des électrodes et les perturbations par les objets en fer rendent inopérante la prospection magnétique proprement dite. Trois méthodes seulement se sont avérées utilisables: l'électrostatique, le Slingram et le radar. On présente dans cet exposé les résultats obtenus avec les deux premières dans l'église romane Saint Etienne à Nevers (France).

Une première prospection avait été réalisée dans cette église en 1979 avec un appareil Slingram, le SH3. Cet appareil (Parchas, 1979) a un écartement de 1,50 m, une fréquence de 8,04 kHz et une configuration de bobines «PARA» c'est à dire que les deux bobines sont d'axe parallèle incliné à 35° de la verticale.

Le nombre d'induction est faible, ce qui permet la mesure de la susceptibilité magnétique apparente par la composante du signal reçu en phase avec le champ primaire et la mesure de la conductivité électrique apparente par la composante en quadrature. Cette double mesure portant sur deux propriétés indépendantes fait de ce type d'appareil un outil majeur pour la prospection archéologique. Son application à l'exploration du sous-sol de bâtiments est d'autant plus aisée à envisager qu'il ne nécessite aucun contact électrique avec le sol; malheureusement les mesures peuvent être très perturbées par la présence d'objets métalliques inévitablement présents. Cette difficulté à été déterminante: les mesures en phase sont complètement perturbées à la croisée du transept et dans une partie du chœur où des réfections récentes du sol consécutives à une fouille menée en 1974 par les Monuments Historiques comportent un ferrailage; le long des piliers de la nef, l'installation électrique sous tube d'acier produit le même effet. Les mesures de susceptibilités magnétiques restent pour partie uti-

lisables, figure 2; elles montrent un sous-sol relativement magnétique ( $> 150 \cdot 10^{-5}$  u SI le plus souvent) mais sans structuration marquée. Les mesures de résistivité sont beaucoup plus perturbées car l'anomalie créée par les objets ferreux est plus marquée en quadrature et se manifeste sur des distances plus importantes. Les quelques mesures (30% environ du total), figure 3, que l'on peut estimer non perturbées montrent un sous-sol relativement résistant sans qu'il soit possible d'en dire plus. La prospection électrostatique réalisée en 1992 avec un quadripôle carré de 1,2 m de côté, figure 4, n'a pas été perturbée par les objets métalliques mais sur la plus grande partie du choeur, le déplacement

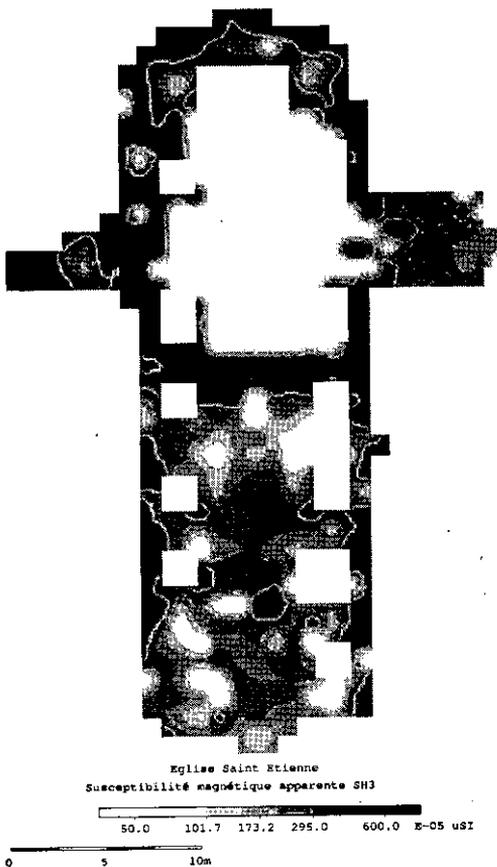


Fig. 2. Cartographie de la susceptibilité magnétique apparente (SH3), St Etienne (Nevers, France).



Fig. 3. Cartographie de la résistivité apparente (SH3), St Etienne (Nevers, France).

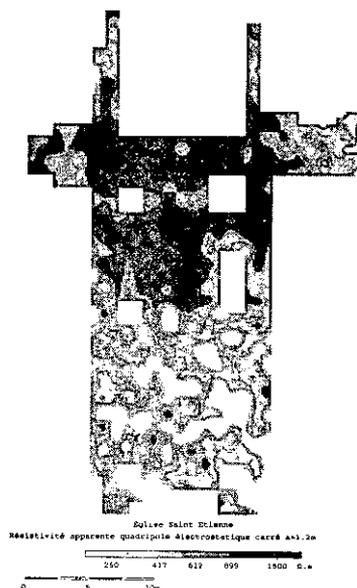


Fig. 4. Cartographie de la résistivité apparente, quadripôle électrostatique  $a = 1,2$  m, St Etienne (Nevers, France).

du quadripôle était très malaisé et la prospection n'a pas eu lieu. La cartographie montre que la résistivité est globalement plus forte sur une zone comprenant l'ouest du chœur, la croisée du transept et les deux premières travées de la nef, ce qui peut s'interpréter comme la trace d'une construction ancienne. Le sous-sol pour la partie ouest de la nef est relativement homogène et moins résistant,  $\rho_a \leq 500 \Omega\text{m}$ . La structure résistante EW sous les deux premières travées pourrait correspondre à un mur puisqu'elle se situe dans le prolongement d'un reste d'abside observé sous le chœur lors des fouilles de 1974.

#### 4.2. Site néolithique de Balloy (Seine et Marne)

La prospection électrique réalisée sur le site de Balloy (Seine et Marne, France), répond à une préoccupation très courante : l'exploration d'un site menacé par l'extension de gravières. Les structures archéologiques étant des fossés (enceintes néolithiques) creusés dans le gravier alluvial et les couches archéologiques étant d'épaisseur limitée, l'exploration est « horizontale » : il s'agit de dresser un « plan » des structures en place. La prospection électrique méca-

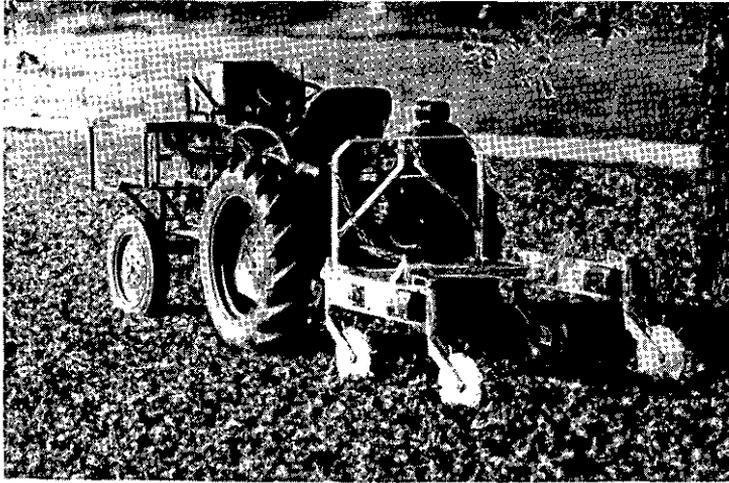


Fig. 5. Dispositif Rateau de prospection électrique mécanisée.

nisée, figure 5, système «Rateau», y a été employée avec un quadripôle carré de 1 m de côté. Elle s'adaptait bien à la nature des vestiges comme aux conditions de prospection: champ cultivé sans obstacle particulier. La carte de la résistivité apparente est présentée sur la figure 6: elle montre une grande encein-



0 10 20m

Fig. 6. Résistivité apparente sur le site néolithique de Balloy (Seine et Marne, France), quadripôle carré,  $a = 1,2 \text{ m}$  ( $> 450 \Omega\text{m} = \text{blanc}$ ,  $< 150 \Omega\text{m} = \text{noir}$ ).

te, bien visible puisqu'elle contraste bien avec le gravier directement affleurant sous la couche superficielle, et une seconde au nord-est, moins bien marquée puisque sa partie ouest a été creusée dans du limon de conductivité électrique proche de celle du remplissage. La prospection qui couvre environ 1 ha a été réalisée dans le temps d'une journée de travail.

#### 4.3. Application au génie civil: étude d'un tracé linéaire

En génie civil les préoccupations des aménageurs sont très variées. Parmi celles-ci les reconnaissances de tracé linéaire pour la mise en place d'égoûts, de canalisations, etc... constituent des problèmes courants. Il s'agit d'être capable de prédire les matériaux que rencontrera l'engin de terrassement (tranchée, microtunnelier...) pour choisir la méthode de creusement et les caractéristiques de la machine. La géophysique à elle seule ne peut prétendre tout révéler et des forages d'investigation géotechniques sont indispensables. Seule cependant la géophysique permet de définir rationnellement l'emplacement de ces sondages et d'estimer les volumes des milieux sur lesquels ils apportent des informations.

La prospection réalisée sur le «Chemin des Marmousets» (Val de Marne, France) est dans ce cas: il s'agissait, sur une distance de 1250 m, d'étudier le parcours d'un égoût creusé par microtunnelier. Des profils électrostatiques ont été réalisés sur la route sous laquelle l'ouvrage devait être réalisé avec trois quadripôles de tailles différentes par la société Géoméga (Mounir, 1994). Le premier quadripôle est un carré de 1,2 m de côté où les pôles sont situés à l'intérieur de roues, ce qui permet un déplacement rapide (50 km/h) et une profondeur d'investigation de l'ordre du mètre (figure 7); les deux autres sont des

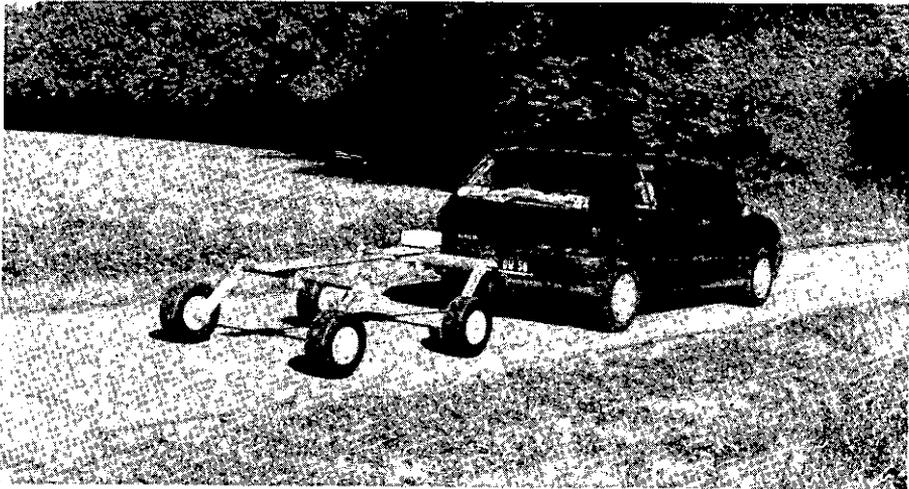


Fig. 7. Quadripôle électrostatique carré de 1,2 m de côté où les pôles sont à l'intérieur des roues.

quadripôles en ligne, Wenner DD, avec un écart entre les pôles de 3 m et 12 m; les profondeurs d'investigation étaient alors de 2,5 et 8 m environ. Les profils de résistivité apparente sont présentés sur la figure 8 ainsi que la série de son-

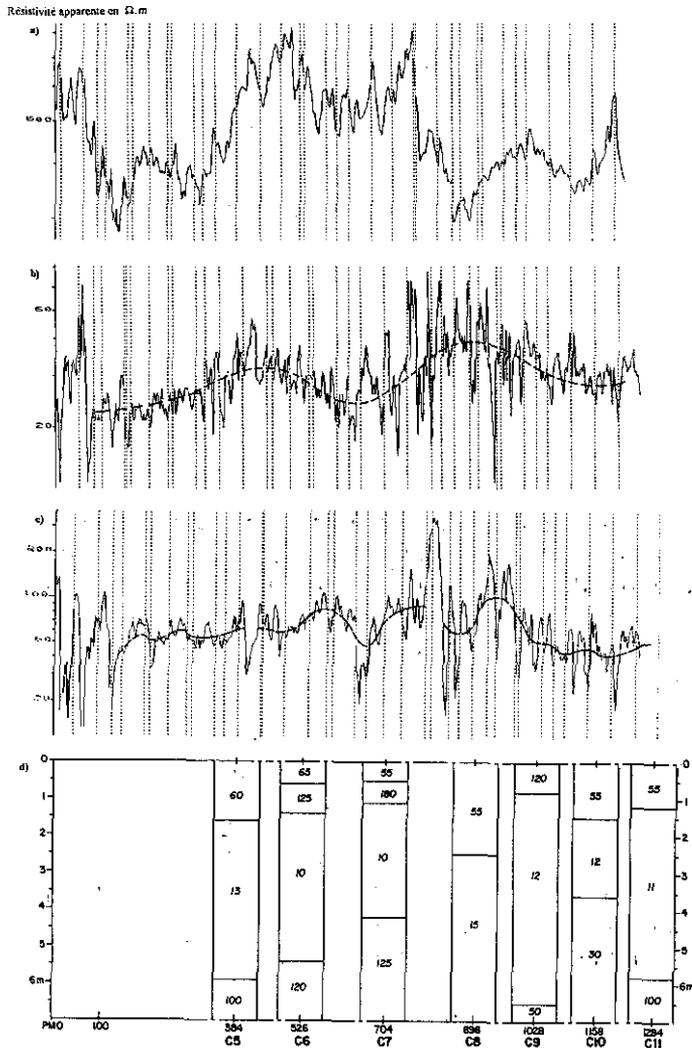


Fig. 8. Profils de résistivités apparentes réalisés sur le «Chemin des Marmouset», (Val de Marne, France)

- (a) quadripôle carré  $a = 1,20$  m  
 (b) quadripôle Wenner DD,  $a = 3$  m  
 (c) quadripôle Wenner DD,  $a = 12$  m  
 (d) interprétation des sondages électriques

dages électriques réalisée sur le bord de la route. La coupe géologique telle qu'elle a pu être observée sur les sondages géotechniques est présentée sur la figure 9. Les différents profils montrent des résistivités apparentes très diffé-

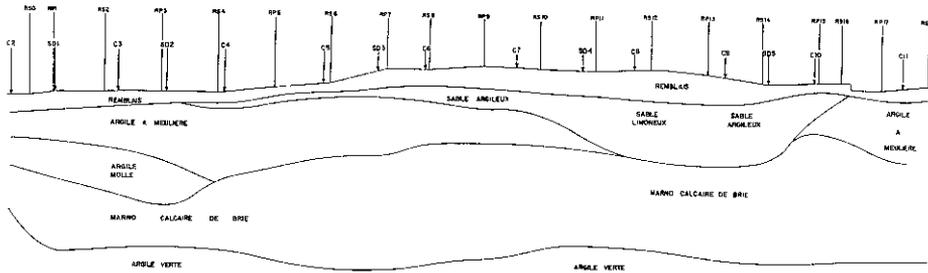


Fig. 9. Coupe géologique du profil, Chemin des Marmousets (Val de Marne, France).

rentes. Le premier profil reflète les variations d'épaisseur du remblais (cailloux, gravier, sable) sous la route, le deuxième la présence de l'argile à meulière, dans la zone autour des sondages C8 et C9 il montre une augmentation sensible de la résistivité corrélée avec la présence de sable. La remontée de la résistivité avec le plus grand quadripôle traduit la sensibilité de la mesure à la présence du marno-calcaire de Brie.

#### 4.4. Applications hydrogéologiques: site du Gué-Goujard (St. Martin-sur-Nohain et Suilly-la-Tour, Nièvre)

La géophysique intervient en hydrogéologie, principalement sous forme d'une approche indirecte par laquelle le prospecteur localise les structures poreuses ou fracturées qui peuvent faciliter les transferts et les stockages d'eau (Petitfils 1981, Benderitter et Robin 1987). On présente ci-après les résultats obtenus dans le cadre de l'étude d'un bassin versant dont l'émissaire est le Nohain (Nièvre, France) sur deux parcelles où le substrat rocheux est constitué de calcaires du Jurassique moyen. Le but de la prospection est de localiser dans le calcaire dur peu poreux, présent sous les formations superficielles (terres arables sur colluvions ou tourbe selon les lieux et la topographie), les failles, les fractures et les poches d'altération qui peuvent jouer un rôle dans le stockage et la circulation de l'eau. La première parcelle (n° 8 sur le cadastre, «Le Gué-

Goujard», St Martin-sur-Nohain) est en pente douce du NW vers la rivière au SE. Le sous-sol sous la couche superficielle cultivée, est constituée soit de calcaire, soit de zones altérées en général associées à des fractures dont la résistivité est considérablement plus faible que celle du calcaire (dans un rapport qui peut atteindre 10). Sur la deuxième parcelle (n° 5 sur le cadastre de Suilly-la-Tour), légèrement en amont de la première, la surface du sol est horizontale et une couche de tourbe électriquement conductrice, d'environ 1 m d'épaisseur, s'est développée au-dessus du calcaire. Les conditions de surface sont donc sensiblement différentes entre les deux cas. Plusieurs méthodes électriques et électromagnétiques ont été utilisées ce qui permet de mettre en relief les spécificités de chacune en matière de traitement cartographique et d'interprétation.

### Parcelle 8

Sur cette parcelle on a utilisé trois méthodes de cartographie:

- Un appareil Slingram, l'EM31 (Geonics limited), en configuration HCP où la fréquence est de 9,8 kHz et l'écartement entre les bobines de 3,66 m (12 pieds); ces valeurs correspondent à un faible nombre d'induction ce qui permet d'avoir une mesure directement proportionnelle à la conductivité électrique apparente du terrain. Deux cartes ont été établies (figures 10a et b) «en ligne» lorsque la ligne joignant les deux bobines est parallèle aux

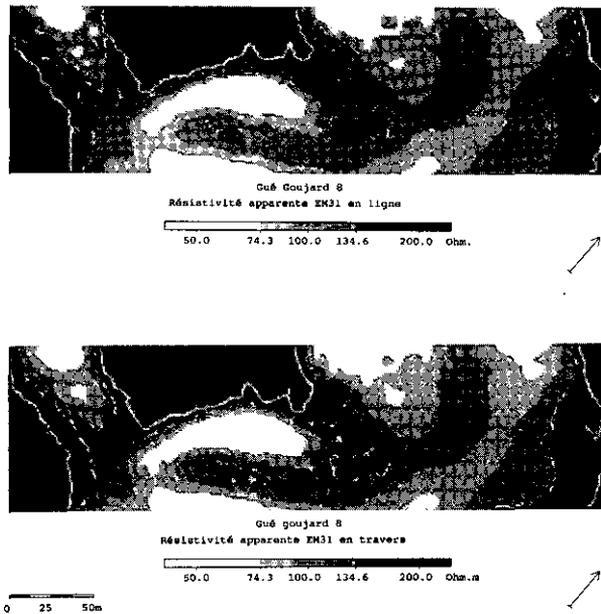


Fig. 10. Le Gué-Goujard, parcelle 8, résistivité apparente EM31 en configuration HCP,  
(a) orientation de l'appareil NW-SE.  
(b) orientation de l'appareil NE-SW.

- profils c'est à dire NW-SE, «en travers» lorsque la ligne joignant les deux bobines est perpendiculaire au profil. La maille de mesure était de 5 x 5 m.
- La méthode électrique en mode «léger» où l'on utilise quatre électrodes mobiles que l'on dispose le long de chaque profil en configuration Wenner (électrodes équidistantes d'un écart  $a$ ) ; ceci permet d'acquérir deux mesures indépendantes, la mesure correspondant au dispositif normal et celle correspondant au dispositif DD. Deux prospections ont été réalisées, l'une avec un écartement de 5 m entre les électrodes sur une maille de 5 x 5 m, l'autre avec un écartement de 10 m entre les électrodes sur une maille de 10 x 10 m.
  - La méthode MT-VLF en utilisant l'appareillage léger développé au Centre de Recherches Géophysiques (Tabbagh *et al.*, 1991) où un capteur électrique court d'un mètre est monté sur un cadre constituant le capteur magnétique. Pour pouvoir corriger l'anisotropie apparente, deux émetteurs ont été utilisés : HWU (18,3 kHz) de direction apparente SW-NE perpendiculaire aux profils et FTA2 (16,8 kHz) de direction apparente NW-SE pratiquement parallèle au profil. La maille de mesure était de 5 x 5 m. Pour corriger les effets statiques liés aux hétérogénéités superficielles qui ne peuvent être éliminés par intégration quand on utilise un capteur court, on a systématiquement filtré toutes les données MT-VLF à l'aide d'un filtre non linéaire en remplaçant la valeur en chaque point par la médiane des valeurs rencontrées dans la fenêtre 3 x 3 points entourant le point.

L'ensemble des résultats est très cohérent, mais la comparaison apporte de précieuses informations. Les cartes EM31 (figures 10a et 10b) sont les moins bruitées ; elles montrent des affleurements de calcaires aux deux extrémités SW et NE de la surface prospectée ainsi qu'en haut des figures dans la partie NW. Il n'y a pas d'orientation structurale dominante et les contrastes de résistivité sont très bien marqués. On n'a aucune évidence de failles mais les zones altérées montrent à la fois des orientations parallèles et perpendiculaires à l'axe général du bassin (SW-NE). Compte tenu de la profondeur d'investigation

attribuée à la disposition HCP,  $\frac{3}{2} L$  soit environ 5 m, on peut en déduire que

les structures observées sont superficielles. Les deux cartes «en ligne» et «en travers» donnent des résultats identiques, ce qui permet d'affirmer que les variations latérales de résistivité ne sont pas brutales et s'étalent toujours sur au moins plusieurs mètres. Si des structures de faibles dimensions avaient existé, elles n'auraient pu être décrites clairement du fait de la taille de la maille (qui est nettement supérieure à  $L$ ) mais elles auraient au moins introduit des discordances locales entre les mesures dans les deux orientations.

Les résultats de la prospection électrique pour  $a = 5$  m sont un peu bruités (figures 11a et b) : ceci est dû aux contacts sol-électrode lorsque le sol est sec. Les maxima et les minima sont plus marqués en DD qu'en Wenner normal ce

qui est habituel (Hesse et Spahos, 1978). Par comparaison avec l'EM31, la profondeur d'investigation est équivalente mais les valeurs de résistivité apparente sont en moyenne plus élevées, ce qui est normal puisqu'on est dans une configuration où la couche superficielle est plus conductrice que le substrat.

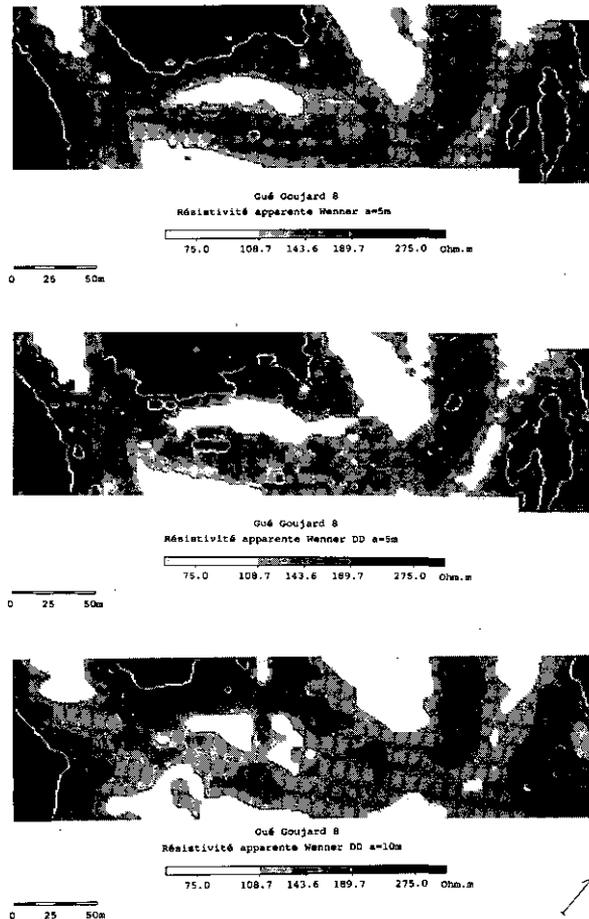


Fig. 11. Le Gué-Goujard, parcelle 8, résistivité apparente,  
 (a) quadripôle Wenner normal  $a = 5$  m.  
 (b) quadripôle Wenner Dipôle-Dipôle  $a = 5$  m  
 (c) quadripôle Wenner Dipôle-Dipôle  $a = 10$  m

La comparaison entre les cartes Wenner DD pour  $a = 5$  m et pour  $a = 10$  m (figure 11c) montre que l'on perd en contraste et en netteté des anomalies dans le second cas : on a un très net affaiblissement de la zone conductrice d'orientation SW-NE au centre de la carte. On peut expliquer ceci par le caractère su-

perficiel des structures observées, mais il faut considérer aussi le fait que le volume pris en compte dans les mesures étant plus important, le poids relatif des structures tend à se réduire et la résistivité électrique apparente à être moyennée. Avec un grand dispositif, on perd beaucoup en possibilité d'analyse des variations latérales et le prospecteur doit rechercher un optimum entre la profondeur d'investigation dont il a besoin et le lissage des informations inévitable lorsqu'on agrandit le quadripôle.

Les cartes MT-VLF (figures 12a et 12b) montrent chacune des anomalies

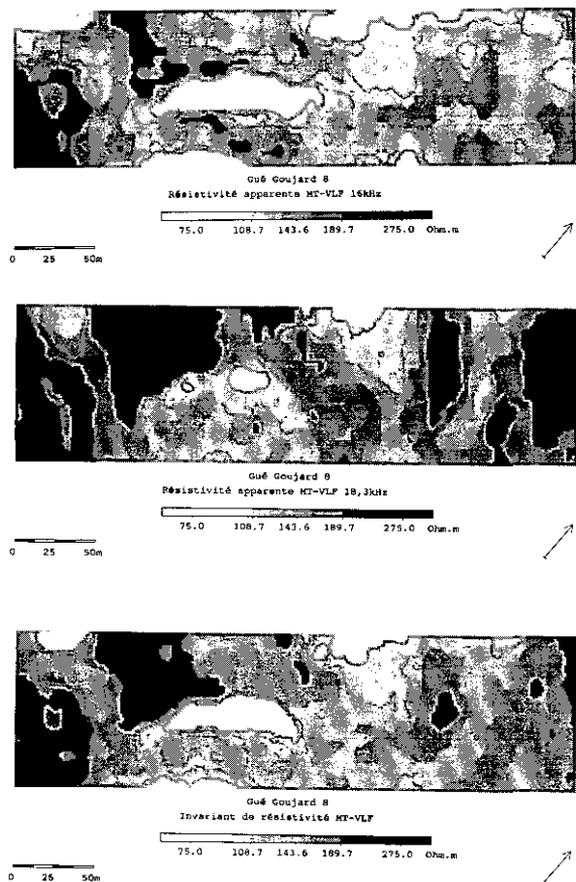


Fig. 12. Le Gué-Goujard, parcelle 8,  
 (a) résistivité apparente, MT-VLF, 16,8 kHz  
 (b) résistivité apparente, MT-VLF, 18,3 kHz  
 (c) invariant de résistivité, MT-VLF

qui tendent à être perpendiculaires à la direction apparente de l'émetteur qui est aussi celle du champ électrique horizontal. En tenant compte de cet important et inévitable effet d'anisotropie apparente, les variations obtenues semblent être bien corrélées avec celles des autres méthodes. Pour corriger cet effet, on peut utiliser le calcul d'un invariant approché (Guérin *et al.*, 1995), la cartographie de l'invariant:  $\rho'_a = \left( \frac{\sqrt{\rho_{\text{axy}}} + \sqrt{\rho_{\text{aux}}}}{2} \right)^2$  est présenté sur la figure 12c. Celle-ci montre

des variations très cohérentes avec les résultats des autres méthodes, la valeur légèrement plus élevée de la résistivité tient à la plus grande profondeur d'investigation. Si l'on adopte en effet pour valeur de celle-ci la moitié de la profondeur de pénétration, on obtient 20 m en moyenne sur ce terrain, soit deux à quatre fois plus que dans les autres méthodes. Ceci suggère qu'il y a peu de variations latérales de résistivité en profondeur et que les structures sont dans les cinq premiers mètres.

#### Parcelle 5

Sur cette parcelle on s'est limité à deux méthodes, puisqu'il fallait disposer d'une profondeur d'investigation plus élevée du fait de la présence de la tourbe.

- La méthode MT-VLF avec les mêmes émetteurs que pour la parcelle 8.
- La prospection électrique avec un écartement entre électrode  $a = 10$  m.

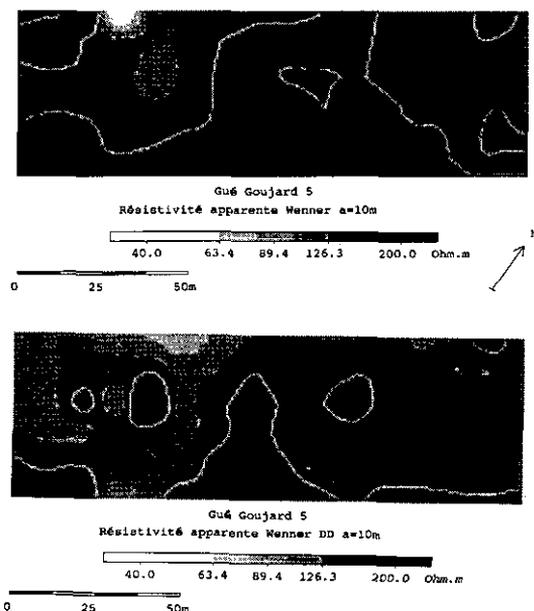


Fig. 13. Le Gué-Goujard, parcelle 5, résistivité apparente

(a) Wenner normal  $a = 10$  m

(b) Wenner dipôle-dipôle  $a = 10$  m.

Le point majeur qui ressort de l'analyse des cartes est la différence qui existe entre les résultats MT-VLF d'une part et électriques d'autre part. En électrique (figure 13a et 13b) on observe des zones plus résistantes au SE, qui s'interprètent bien par une réduction de l'épaisseur de la tourbe lorsqu'on s'éloigne de l'axe de la vallée. La partie centrale paraît plus résistante en Wenner normal qu'en Wenner DD mais cette différence est en fait mineure ; elle tient à la position du niveau de coupe 126,3 m.

Les cartes MT-VLF montrent l'effet d'anisotropie mais, sur les deux, on observe une séparation en deux compartiments, l'un résistant au SW, l'autre plus conducteur au NE (figures 14a et 14b). La cartographie de l'invariant de résistivité (figure 14c) confirme ce fait. Pour expliciter la divergence entre les deux

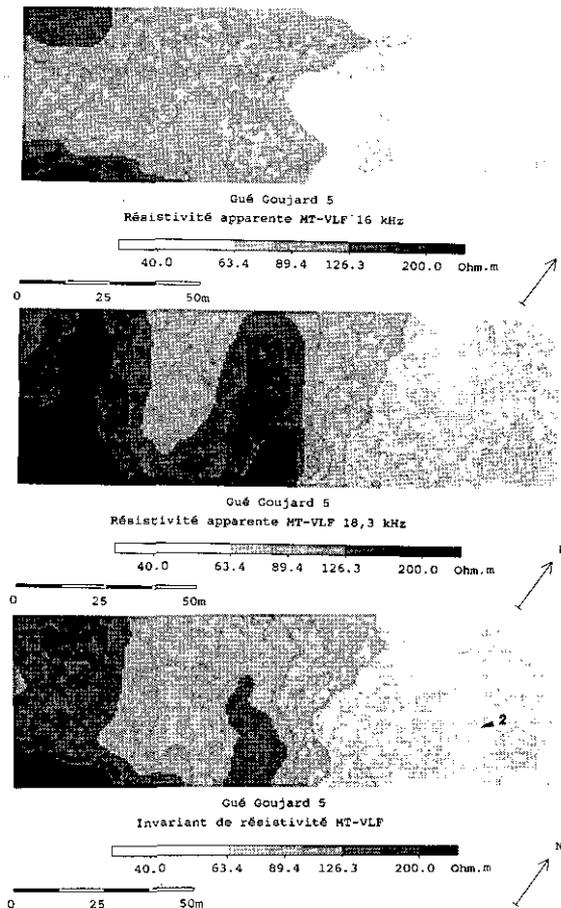


Fig. 14. Le Gué-Goujard, parcelle 5  
(a) résistivité MT-VLF 16,8 kHz  
(b) résistivité MT-VLF 18,3 kHz  
(c) invariant de résistivité

méthodes ont a réalisé des sondages électriques Schlumberger aux points 1 et 2 marqués sur la figure 14c. De la comparaison des deux sondages, (figure 15), il ressort que les couches superficielles sont identiques mais qu'au point 2 le calcaire résistant est beaucoup moins épais (12 m) qu'au point 1 (70 m). C'est un contraste localisé au delà de 13 m de profondeur qui crée la variation latérale de résistivité apparente apparaissant sur les cartes MT-VLF. Il est normal qu'à cette profondeur un quadripôle Wenner a = 10 m ne montre rien. Au vu des cour-

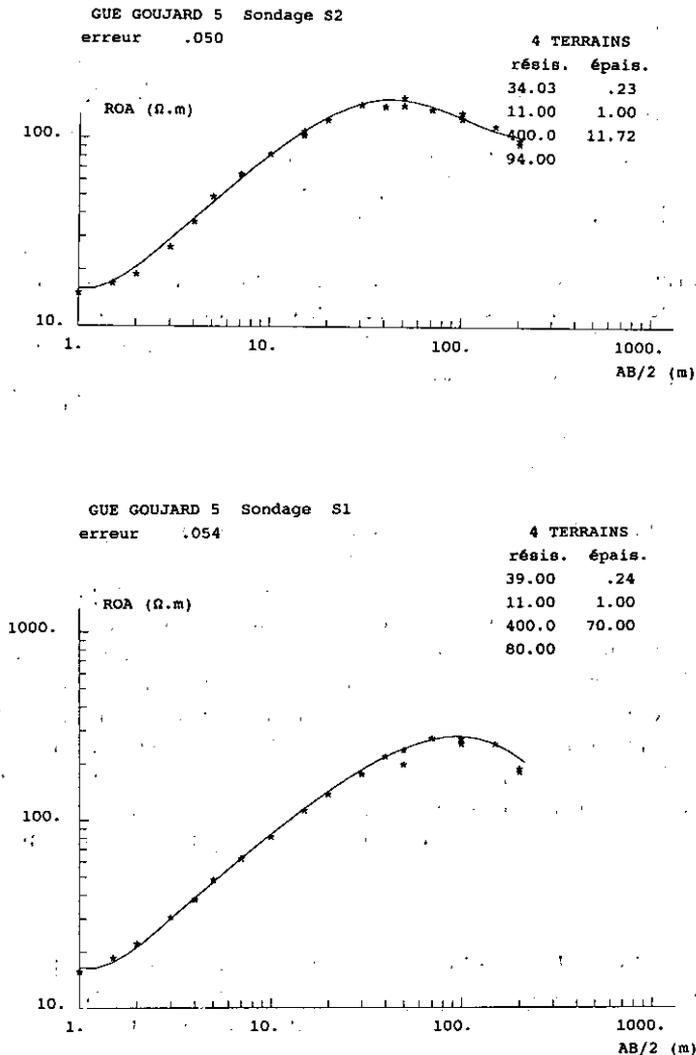


Fig. 15. Sondages électriques Schlumberger exécutés aux points 1 et 2.

bes de sondage, il aurait fallu atteindre des valeurs de  $\rho$  supérieures à 60 m pour mettre en évidence la faille; ceci était pratiquement irréalisable sur un terrain relativement exigu (les profils étaient limités à 100 m) et aurait donné un résultat très lissé avec un positionnement de la faille beaucoup plus flou qu'en MT-VLF.

Cet exemple illustre tout l'intérêt de la méthode MT-VLF qui permet une bonne profondeur d'investigation tout en gardant une bonne localisation des transitions.

## 5. CONCLUSIONS

Si l'on cherche à dégager les caractéristiques générales des méthodes de mesures de la résistivité électrique pour les applications aux proche sous-sol et à définir leurs perspectives de développement, deux éléments majeurs ressortent: (1) Ces méthodes sont rapides et peu onéreuses si on les compare à la gravimétrie ou à la sismique réfraction ou réflexion haute résolution; (2) L'interprétation des mesures est relativement simple car, d'une part, la gamme de variation de la résistivité électrique est très étendue (beaucoup plus que celle des autres propriétés exploitées en prospection, et, d'autre part, dans les milieux continentaux non salés et non gelés, c'est à dire dans la grande majorité des cas, elle est principalement déterminée par le contenu en argile. Ces deux éléments permettent d'envisager un développement important de ces méthodes.

Quelles sont les voies de recherches les plus prometteuses?

D'une part l'exploration «3D» avec des réseaux de pôles ou de bobines : cette piste s'est ouverte avec le développement de systèmes de commutation rapides programmables; elle va se développer avec la mise au point de logiciels d'interprétation de mieux en mieux adaptés à la nature des données.

D'autre part l'exploration associant plusieurs méthodes et particulièrement associant à une méthode de ce type une ou d'autres méthodes portant sur des propriétés différentes: l'association avec le radar-sol paraît la plus intéressante. Celui-ci est basé sur un phénomène de réflexion d'une onde et peut de ce fait apporter des détails beaucoup plus fins sur la forme des structures alors que l'identification des propriétés des différents milieux est beaucoup plus délicate. On aurait une bonne complémentarité entre une méthode bien adaptée à la reconnaissance de la forme des structures et celles qui sont appropriées à la détermination de la résistivité électrique du matériau qui les composent.

### *Remerciements*

Les travaux présentés ici ont été réalisés dans le cadre du Département de Géophysique Appliquée de l'Université Paris 6 et de l'USR701 au C.N.R.S. à Garchy. Albert Hesse a bien voulu traduire en espagnol le résumé.

## RÉFÉRENCES

- ALFANO, L. (1959): «Introduction to the interpretation of resistivity measurement for complicated structural conditions»; *Geophysical prospecting*, 7, 310-366.
- ARCHIE, G. E. (1942): *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics Transactions of A.I.M.E.*, 146, 54-62.
- BENDERITTER, Y.; JOLIVET, A.; MOUNIR, A., & TABBAGH, A. (1994): Application of the electrostatic quadripole to sounding in the hectometric depth range»; *Journal of Applied Geophysics*, 31, 1-6.
- BENDERITTER, Y., & ROBIN, G. (1987): «Approche singulière des discontinuités de perméabilité en milieu carbonaté», *Hydrogéologie*, 3, 161-168.
- DABAS, M.; TABBAGH, A., & TABBAGH, J. (1994): «3D inversion in sub-surface electrical surveying»; *Geophysical Journal International*, 119, 975-990.
- FLATHE, H. (1955): «A practical method of calculating geoelectrical model graphs for horizontally stratified media», *Geophysical Prospecting*, 3, 268-294.
- GHOSH, D. P. (1971): «The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements»; *Geophysical Prospecting*, 19, 192-217.
- GRARD, R., & TABBAGH, A. (1991): «A mobile four electrodes array and its application to the electrical survey of planetary ground at shallow depths»; *Journal of Geophysical Research*, 96, 4117-4123.
- GUÉRIN, R.; TABBAGH, A.; BENDERITTER, Y., & ANDRIEUX, P. (1995): «Invariants for correcting field polarisation effect in MT-VLF resistivity mapping»; *Journal of Applied Geophysics*, in press.
- HESSE, A., & SPAHOS, Y. (1978): «The evaluation of Wenner and Dipole-Dipole resistivity measurements and the use of a new switch for archaeological field work». *Archaeophysika*, 10, 647-655.
- MCNEILL, J. D. (1980): «Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number», *Technical note TN.6*, Geonics Ltd, Toronto, 15 p.
- MOUNIR, A. (1994): «Application du quadripôle électrostatique à la prospection sur la gamme de profondeur 0-100 m», Thèse d'Université, Paris 6, 184 p.
- PARCHAS, C. (1979): «Mesures simultanées de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique du sol : application à la prospection électromagnétique en Archéologie», Thèse de 3ème cycle, Université Paris 6, 70 p.
- PETITFILS, B. (1981): «Étude d'un système aquifère complexe dans les calcaires du Jurassique de la Nièvre - Aspect hydrodynamique, hydrochimique et géophysique», Thèse de 3ème cycle, Université d'Orléans, 236 p.
- STEPHANESCU, S.; SCHLUMBERGER, C., & SCHLUMBERGER, M. (1931): «Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales homogènes et isotropes»; *Journal de Physique et le Radium*, 7, 132-140.
- TABBAGH, A. (1986) (a): «Application and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting»; *Geophysics*, 51, 576-584.
- TABBAGH, A. (1986) (b): «What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting method?»; *Archaeometry*, 28-2, 185-196.
- TABBAGH, A.; BENDERITTER, Y.; ANDRIEUX, P.; DÉCRIAUD, J. P., & GUÉRIN, R. (1991): «V.L.F. resistivity mapping and verticalization of the electric field»; *Geophysical Prospecting*, 39, 1083-1097.
- TABBAGH, A.; HESSE, A., & GRARD, R. (1993): «Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadripole: field trials on archaeological sites»; *Geophysical prospecting*, 41, 579-597.
- TABBAGH, J. (1988): «Traitement des données et élimination des valeurs erronées en prospection électrique en continu», *Revue d'Archéométrie*, 12, 1-9.

**Ouvrages généraux sur les méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'exploration du proche sous-sol.**

- KELLER, G. W., & FRISCHKNECHT, F. C. (1966): *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon Press, 517 p.
- NABIGHIAN, M. N. (EDITOR), (1991): *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Volume I, *Theory*, 513 p., Volume II, *Applications*, 972 p.
- SCOLLAR, I. (EDITOR), (1990): *Archaeological prospecting and remote sensing*; Cambridge University Press, 674 p.
- WARD, S. H. (EDITOR), (1990): *Geotechnical and environmental geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa,
- |            |                                        |
|------------|----------------------------------------|
| Volume I   | Review and Tutorial, 389 p.            |
| Volume II  | Environmental and Ground Water, 343 p. |
| Volume III | Geotechnical, 316 p.                   |