

# Reconnaissance géophysique sur un site de creusement de tunnel en milieu urbain

## Utilisation de la méthode des résistivités en et entre forages

A. DENIS  
A. MARACHE  
T. OBELLIANNE

Centre de développement  
des géosciences appliquées  
(CDGA)  
Université Bordeaux I  
avenue des Facultés, Bât. 18  
33405 Talence  
adenis@cdga.u-bordeaux.fr

### Résumé

Une reconnaissance géophysique de l'aléa géologique durant le creusement d'un tunnel en milieu urbain doit être adaptée aux contraintes urbaines, rapide et sans contrainte sur le déroulement du chantier. Le choix, parmi les nombreuses méthodes géophysiques, s'est orienté vers la méthode des résistivités en et entre forages. Un équipement spécifique d'électrodes permanentes en forage a été réalisé afin de permettre la réalisation de mesures quelles que soient les conditions géologiques et hydrogéologiques. D'un point de vue pratique et afin d'être rapidement mobilisable durant la construction du tunnel, le dispositif d'électrodes peut être installé dans les forages préalablement réalisés lors de la reconnaissance géotechnique du tracé, laissé en attente et être activé à n'importe quel moment durant la construction du tunnel. Un premier site expérimental nous a permis de tester ce dispositif et de valider la méthode d'inversion proposée. Les mesures réalisées sur un site de construction de tunnel en milieu urbain montrent que le dispositif et le protocole de mesures sont adaptés aux contraintes techniques de ces chantiers. Des informations sur l'environnement géologique le long du tracé sont obtenues de même que se dessinent les limites d'utilisation des méthodes électriques dans une reconnaissance géophysique de l'aléa géologique en milieu urbain.

*Mots-clés* : milieu urbain, tunnel, résistivité, forage, tomographie, reconnaissance.

## Electrical resistivity borehole measurements on an urban tunnel site

### Abstract

This paper shows how it is possible to use wells drilled during geotechnical pre-investigation of a tunneling site to obtain a 2-D image of the resistivity close to a tunnel boring machine. An experimental apparatus is presented which makes it possible to perform single and borehole-to-borehole electrical measurements independent of the geological and hydrogeological context, which can be activated at any moment during the building of the tunnel. This apparatus is first demonstrated through its use on a test site. Numerical simulations and data inversion are used to analyse the experimental results. Finally, electrical resistivity tomography and single-borehole measurements on a tunneling site are presented. Experimental results show the viability of the apparatus and the efficiency of the inversion algorithm, and also highlight the limitations of the electrical resistivity tomography as a tool for geotechnical investigation in urban areas.

*Key words* : resistivity tomography, 2-D inversion, tunnel boring, geotechnical investigation.

## Introduction

La prospection géophysique utilise des méthodes fondées sur des mesures de grandeurs physiques réalisées selon trois modes : à partir de la surface du sol, en forage (diagraphies différées, panneau électrique) ou entre forages (tomographies). Ces mesures exploitent soit la diffusion des champs (naturels ou provoqués) soit la propagation des ondes. Idéalement, l'opérateur doit déduire de ses mesures, la forme, les dimensions, les propriétés physiques, de toutes les structures et hétérogénéités naturelles et artificielles situées sous la surface. Le milieu urbain entraîne pour certaines de ces méthodes des limitations dans leur utilisation.

Les méthodes électromagnétiques sont toutes parasitées par les conducteurs et éventuellement par les émissions électromagnétiques produites dans le milieu urbain. La méthode Slingram reste utilisable s'il n'existe pas trop de conducteurs enfouis ou aériens et à la condition (non spécifique du milieu urbain) que la résistivité ne soit pas trop élevée. La microgravimétrie (Casas *et al.*, 1998) est utilisée pour la recherche des cavités (carrières, cavités karstiques, de dissolution...), de zones décompressées et pour la mise en évidence de variations de densités dans les remblais. Aux nombreuses corrections normalement nécessaires, s'ajoutent, en milieu urbain d'autres corrections, sources d'incertitudes supplémentaires, dues aux bâtiments et ouvrages enterrés voisins (caves, lignes de métro, parkings souterrains). Les méthodes sismiques telles que la sismique réflexion à haute résolution utilisée pour obtenir une image continue des interfaces des terrains et des structures (Piwakowski *et al.*, 1997) ou la sismique réfraction pour, par exemple, localiser le toit d'un substratum peuvent être utilisées en milieu urbain si l'on peut s'affranchir des vibrations parasites. Le radar terrestre (ou GPR pour *Ground Penetrating Radar*) qui exploite la propagation et l'atténuation des ondes électromagnétiques dans le sol a le grand avantage de ne pas être affecté par les parasites urbains si les antennes sont suffisamment blindées. Devenu de mise en œuvre aisée et très peu encombrant, le radar impulsif est le plus courant. Le principal inconvénient du radar est la limitation de la profondeur de pénétration en milieu conducteur à cause de la forte atténuation des ondes (milieux argileux et terrains humides et à plus forte raison sous la nappe phréatique). Le radar est employé couramment pour la localisation de structures anthropiques telles que des vides (caves, galeries de carrières), divers types de réseaux et câbles enterrés, les fûts et objets métalliques enfouis.

La résistivité est un excellent paramètre discriminant car elle peut prendre des valeurs qui couvrent plusieurs ordres de grandeur selon la nature des matériaux. Il faut quatre électrodes pour mesurer la résistivité : deux électrodes injectent le courant  $I$  dans le sol et deux autres électrodes permettent la mesure d'une différence de potentiel  $V$  due à la circulation de ce courant. La résistivité apparente est calculée selon l'expression  $\rho_a = G.V/I$  où  $G$  est un facteur géométrique qui caractérise la configuration des quatre électrodes.

Avec la méthode électrique, un courant continu ou de très basse fréquence ( $F < 200\text{Hz}$ ) est injecté à l'aide d'électrodes enfoncées dans le sol (contact galvanique). Avec la méthode électrostatique un courant de fréquence 10 à 100 kHz est injecté dans le sol par contact

capacitif. Pour les deux méthodes, la profondeur d'investigation dépend de la forme géométrique et des dimensions du quadripôle et des résistivités du sous-sol. Les moyens d'interprétation qualitative ou quantitative (modèles analogiques, analytiques ou numériques) sont les mêmes pour les deux dispositifs (Tabbagh *et al.*, 1993; Tabbagh et Panissod, 2000). La méthode électrique ou méthode des résistivités est bien connue pour son emploi possible dans les milieux électromagnétiquement perturbés ou en présence de conducteurs métalliques (sauf dans le très proche voisinage de conducteurs nombreux ou importants). Ceci est un énorme avantage pour son emploi en milieu urbain mais la nécessité de quatre contacts électriques galvaniques avec le sol, pour des mesures en surface, est une gêne considérable ; il est parfois possible de traverser la couche résistante de surface grâce à des avant-trous ou bien d'employer un gel conducteur. De ce point de vue, la méthode électrostatique, encore peu répandue, a l'avantage de ne nécessiter que la présence de « tapis » qui peuvent être glissés sur le sol ou, sous une autre configuration, de roues-pôles d'un chariot. Bien que sensible aux irrégularités de surface, elle est plus facile à employer que la méthode électrique sur les surfaces dures ou sèches telles que la majorité des surfaces urbaines (Tabbagh *et al.*, 1993).

La reconnaissance géologique et géotechnique sur le tracé d'un tunnel urbain se limite à la réalisation de sondages dont l'espacement est de l'ordre de 50 à 100 m. Un profil géologique, complété par des valeurs de propriétés physiques et mécaniques des sols, est ensuite fourni à l'entreprise titulaire du marché. En début de creusement, les entreprises ne se préoccupent que rarement des obstacles, des variations lithologiques ou de propriétés des sols qui pourraient entraver et donc retarder le bon déroulement du creusement. En fait, elles prennent le risque de rencontrer de tels aléas le long du cheminement du creusement parce qu'elles estiment que la probabilité de les rencontrer est trop faible pour justifier des reconnaissances complémentaires. Toutefois, lorsque des modifications de la nature des terrains, de la position des toits et murs d'une formation, de la présence de blocs, karts..., sont détectées durant la foration, il devient intéressant de pouvoir identifier si de tels événements sont ponctuels ou plus étendus. Dans ce cas, une reconnaissance géophysique devient un outil pour déterminer l'importance de l'aléa géologique. Une reconnaissance complémentaire, en cours de chantier, doit être la moins contraignante possible sur l'avancement du creusement. Il n'est pas envisageable d'arrêter le creusement d'un tunnel pendant plusieurs jours si cette reconnaissance complémentaire met en évidence la présence d'une zone, certes anormale, mais qu'un tunnelier ou toutes autres techniques de creusement auraient franchi en perdant seulement quelques heures.

La reconnaissance complémentaire doit donc être rapide, adaptée au milieu urbain et sans contrainte sur le déroulement du creusement. Le choix s'oriente naturellement vers une méthode de prospection électrique avec des mesures, en raison de la position des tunnels urbains en profondeurs et de l'espace en surface limité, en un seul forage et entre deux forages. La rapidité d'intervention pourra être obtenue en équipant d'un dispositif d'électrodes les forages réalisés lors de la campagne de reconnaissance géotechnique le long du tracé. Les dispositifs n'étant activés qu'à la demande de l'entreprise et dans les zones où un aléa géologique est susceptible de ralentir sérieusement le creusement du tunnel ; la décision d'intervention appartient à l'entreprise.

Un équipement spécifique d'électrodes permanentes en forage est d'abord détaillé et testé sur un site expérimental. La procédure de traitement des mesures expérimentales par inversion est présentée. Finalement, les résultats des mesures réalisées sur un site de tunnel situé dans le Sud-Est de Paris sont présentés. Ils permettent, en particulier, d'étudier les limites d'utilisation de la méthode des résistivités en et entre forages dans une estimation de l'aléa géologique sur un site de creusement de tunnel en milieu urbain.

2

## Description du dispositif expérimental

Dans la mesure où l'on désire retarder le moins possible le creusement du tunnel pour la réalisation d'une campagne de reconnaissance géophysique, il faut éviter d'avoir à réaliser des forages propres à cette reconnaissance. Les forages réalisés pour la reconnaissance géotechnique ne sont plus utilisés par la suite, à l'exception de quelques-uns équipés en piézomètre. Ces forages, répartis le long du tracé du tunnel, peuvent être réutilisés pour réaliser une reconnaissance géophysique complémentaire.

Deux contraintes doivent être prises en compte. Lorsque le sondage est équipé, d'une part, il doit toujours permettre la mesure du niveau piézométrique, d'autre part, les mesures électriques doivent pouvoir être réalisées quel que soit le contexte hydrogéologique, c'est-à-dire en milieu saturé ou non saturé. L'équipement consiste en un tube PVC sur lequel des colliers métalliques sont fixés à différents niveaux (Fig. 1). Au niveau de la zone non saturée, le forage est cimenté avec un coulis de ciment afin d'assurer un bon couplage entre le sol et les électrodes. Sous le niveau piézométrique, le tube plastique est crépiné et le contact s'effectue par l'intermédiaire d'un remplissage de sable et de graviers. Ce dispositif électrique d'électrodes permanentes, conçu pour être robuste et d'un faible coût, doit être mis en place juste après la réalisation des forages et laissé en attente. Le dispositif n'est activé qu'à la demande du chantier s'il est jugé utile, pour le bon déroulement du creusement, d'obtenir plus d'informations sur le contexte géologique à proximité d'un forage ou entre deux forages équipés. Les délais d'intervention pour une reconnaissance géophysique se réduisent alors à la mesure, au traitement et à l'interprétation des données.

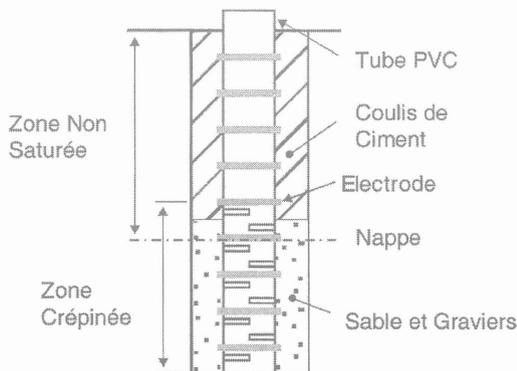


FIG. 1 Dispositif expérimental d'électrodes permanentes en forage.  
Experimental apparatus with permanent electrodes into a borehole.

Le dispositif expérimental dans la zone non saturée n'étant pas en contact direct avec un sol, nous devons nous assurer que la présence du coulis de ciment, dont les caractéristiques électriques peuvent varier dans le temps, ne perturbe pas le champ de potentiels. L'influence du scellement autour des électrodes peut s'étudier à partir de simulations numériques basées sur les travaux de Wait (1982). La source de courant I est située dans un forage et constitue l'origine. La région intérieure ( $r < a$ ) est homogène et présente une résistivité  $\rho_{\text{GROUT}}$ ; la région extérieure ( $r > a$ ) est homogène avec une résistivité  $\rho_{\text{SOIL}}$ . Il est également supposé que le forage est d'une longueur infinie.

Dans le cas de mesures électriques en forage, on peut écrire pour le potentiel intérieur au point M situé à une profondeur z de l'origine :

$$V_M = \frac{I \cdot \rho_{\text{GROUT}}}{2 \cdot \pi^2} \int_0^{\infty} [K_0(\lambda r) + A(\lambda) I_0(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda \quad (1)$$

avec :

$$A(\lambda) = \frac{-\lambda a (K-1) K_0(\lambda a) K_1(\lambda a)}{1 + \lambda a (K-1) I_0(\lambda a) K_1(\lambda a)} \quad (2)$$

et :

$$K = \frac{\rho_{\text{GROUT}}}{\rho_{\text{SOIL}}}$$

Pour  $r = 0$  (mesures en forage), nous obtenons l'expression adéquate pour le potentiel intérieur sous la forme :

$$V_M = \frac{I \cdot \rho_{\text{GROUT}}}{4 \pi \cdot z} + \frac{I \cdot \rho_{\text{GROUT}}}{2 \cdot \pi^2} \int_0^{\infty} A(\lambda) I_0(0) \cos(\lambda z) d\lambda \quad (3)$$

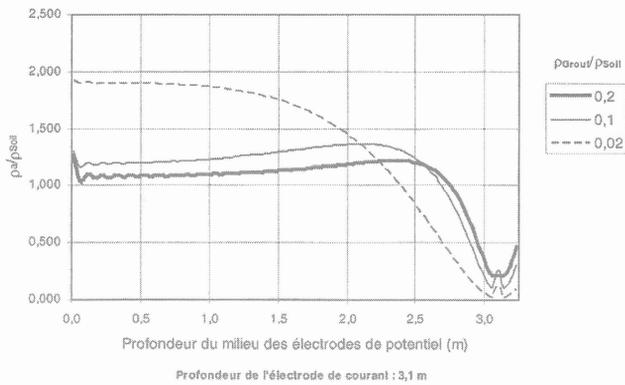
Dans le cas des tomographies de résistivité, le potentiel extérieur est calculé à une distance r et à une profondeur z de l'origine par la relation suivante :

$$V_M = \frac{I \cdot \rho_{\text{GROUT}}}{2 \cdot \pi^2} \int_0^{\infty} B(\lambda) K_0(\lambda d) \cos(\lambda z) d\lambda \quad (4)$$

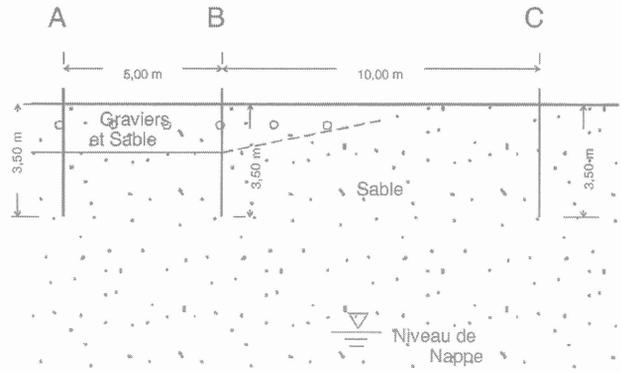
avec :

$$B(\lambda) = \frac{1}{1 + \lambda a (K-1) I_0(\lambda a) K_1(\lambda a)} \quad (5)$$

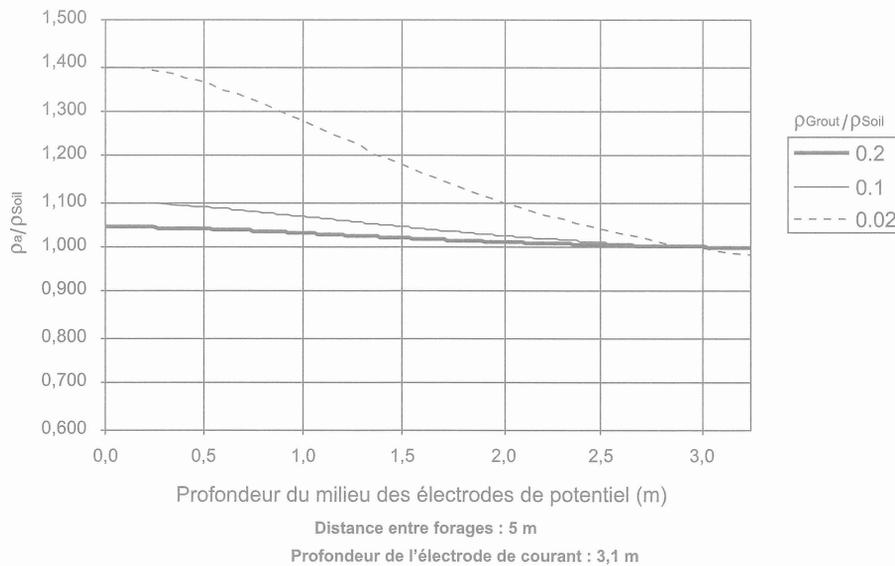
Par l'utilisation de ces différentes relations, nous pouvons juger de l'influence du contraste de résistivité entre le coulis de ciment et le sol environnant sur les mesures électriques en et entre forages. Les figures 2 et 3 présentent les résultats obtenus dans le cas d'un scellement de diamètre  $a = 0,15$  m, sans aucune infiltration du coulis dans le sol et pour une source de courant située à 3,1 m sous la surface du sol. Le dispositif électrique simulé est un tripôle. On constate que l'influence du scellement est plus importante sur les mesures en un seul forage (panneau électrique) qu'entre deux forages (tomographie). Pour les mesures entre forages, l'influence du coulis de scellement devient très vite négligeable lorsque la distance entre les forages augmente. Le scellement perturbe naturellement beaucoup plus les mesures en un seul forage. Il semble que, dans ce cas, le rapport entre la résistivité du coulis de scellement et le sol doit être supérieur à 0,08.



**FIG. 2** Influence de la résistivité du scellement sur les mesures en forage.  
Example of the effect of the cement grout on single borehole measurements.



**FIG. 4** Coupe lithologique et emplacement des forages sur le site test.  
Shallow geological section and borehole arrangement for the test site.



**FIG. 3** Influence de la résistivité du scellement sur les mesures entre forages.  
Effect of the cement grout on borehole-to-borehole measurements.

### 3

## Utilisation sur un site test

Avant d'utiliser ce dispositif d'électrodes permanentes sur un site de creusement de tunnel, nous devons d'une part le valider sur un site test et d'autre part définir les traitements les mieux adaptés aux mesures expérimentales.

Sur le site test, trois forages (A, B et C) ont été réalisés ; le forage C trois mois après les forages A et B. Les distances entre les forages sont de 5, 10 et 15 mètres (Fig. 4). Un modèle géologique du site a pu être établi à partir de l'examen des cuttings remontés durant la réalisation des forages (Fig. 4). Au niveau des forages A et B, deux couches successives sont présentes, une seule au niveau du forage C. Pour les forages A et B nous avons une grave sableuse sèche jusqu'à une profondeur d'environ 1,50 à 1,60 m, puis une couche de sable plus humide. Pour le forage C, nous observons sur tout le forage une même couche de sable dont l'humidité est croissante avec la profondeur. Le niveau piézométrique est à environ 6 mètres de profondeur.

Dans chaque forage, un dispositif de dix électrodes est installé. Les électrodes sont réparties avec un

espacement de 25 cm jusqu'à une profondeur de 3,25 m. Le coulis de ciment est réalisé avec un rapport pondéral eau sur ciment de 2. Afin de déterminer les propriétés électriques du coulis, des mesures de laboratoire ont été réalisées à différentes périodes et sur quatre échantillons. Il apparaît que la résistivité du coulis de ciment, après une vingtaine de jours, est d'environ de 40 à 50 Ohm/m. Au-delà de 20 jours, la résistivité du coulis se stabilise, en ambiance humide, à environ 100 Ohm/m.

### 3.1

## Procédure de traitement

L'interprétation des mesures de résistivité apparentes obtenues sur des structures complexes fait couramment appel à des modélisations directes et à des méthodes d'inversion. Un exemple de simulation directe, dans le cas des mesures en forage, est d'abord présenté, puis une méthode pratique pour la reconstruction en 2-D de la répartition des résistivités à partir des mesures entre forages est proposée.

Les simulations numériques présentées dans cet article ont toutes été réalisées en utilisant le progiciel

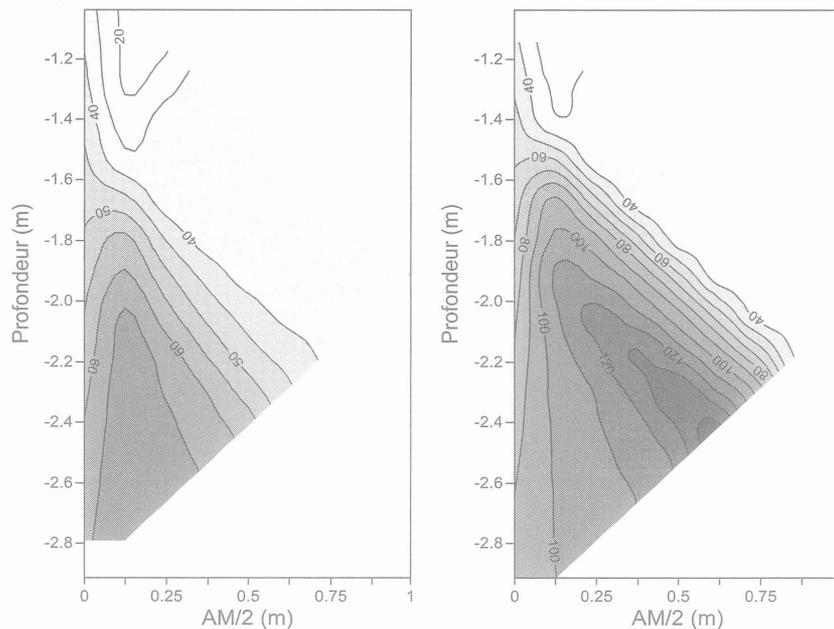


FIG. 5 Exemple de simulation numérique de mesures en forage avec un dispositif pôle-dipôle : a) source de courant au-dessus des électrodes de potentiel ; b) Source de courant en dessous des électrodes de potentiel.

Example of single borehole numerical simulation (pole-dipole array) : a) current source above potential electrodes ; b) current source under potential electrodes.

d'éléments finis CESAR-LCPC. Un exemple de simulation numérique de mesures électriques en forage est présenté sur les figures 5a et 5b. Le modèle est un bicouche où la couche supérieure, d'une épaisseur de 1,5 m, a une résistivité de 20 Ohm/m, la couche inférieure une résistivité de 100 Ohm/m. La figure 4a illustre la pseudo-section en résistivité apparente obtenue par simulation directe lorsque la source de courant est au-dessus des électrodes de potentiel, la figure 5b, le cas où la source de courant est en dessous des électrodes de potentiel. En raison de la configuration du modèle, il existe une différence entre les deux pseudo-sections. Quand la source de courant est située dans la couche à 100 Ohm/m, la résistivité apparente tend vers cette valeur. Il en est de même lorsque la source de courant est dans la couche à 20 Ohm/m. L'interprétation des mesures en forages, pour une détermination de la position de l'interface en profondeur, est donc, pour un modèle bicouche, directe et ne nécessite pas l'utilisation de méthodes d'inversion.

Dans le cas des mesures entre forages, le recours à une méthode d'inversion est indispensable si l'on désire obtenir une image de la répartition de la résistivité dans le sol. De nombreux schémas d'inversion sont maintenant disponibles (Shima, 1992 ; Dabas *et al.*, 1994 ; Loke et Barker, 1996a, 1996b ; Mauriello et Patella, 1999). La plupart d'entre eux sont itératifs et requièrent un modèle initial qui doit être relativement proche de la distribution de la résistivité recherchée. De plus, des méthodes de régularisation doivent être utilisées (Dabas *et al.*, 1994). En fait, il est souvent résolu un problème voisin qui n'est plus le problème original. Dans les méthodes d'inversion itératives, le modèle inverse est le modèle qui donne la réponse théorique la plus proche possible des mesures réalisées. Cependant, il apparaît, selon une étude sur la fiabilité des méthodes d'inversion, que pour des forts contrastes de résistivité, l'erreur sur le modèle peut augmenter avec le nombre d'itérations tandis que l'erreur sur les mesures diminue (Olayinka et Yaramenci, 1999, 2000).

Pour traiter les mesures entre forage, nous avons recherché une méthode simple et robuste ce qui nous a conduit à nous orienter vers une méthode d'inversion basée sur la méthode de la double contrainte (Wexler *et al.*, 1985). Dans cette méthode, les auteurs contraignent tout d'abord une simulation directe par éléments finis avec la valeur de l'intensité de la source de courant et calculent la densité de courant dans chaque élément. Ensuite, ils contraignent le même modèle avec les mesures de potentiels et l'intensité du courant ce qui leur permet de calculer le champ électrique dans chaque élément. A partir de ces différentes simulations ils déterminent la résistivité de chaque élément. A la place d'une simulation par éléments finis, nous proposons de calculer la densité de courant dans chaque élément par une relation analytique utilisant la résistivité apparente et l'intensité du courant mesuré. Nous supposons, dans ce cas, que l'ensemble des lignes de courant n'est pas grandement affecté par la répartition des résistivités dans la zone d'étude.

La zone de mesure, située entre les deux forages, est subdivisée en une grille. Pour chaque excitation (j), l'intensité du courant à travers les électrodes et le potentiel ( $\phi$ ) à chaque électrode sont mesurés. En supposant un milieu homogène (de résistivité apparente  $\rho_a$ ), on peut calculer la densité de courant  $J$  et le champ électrique  $E$  le long de chaque ligne de courant et pour chaque élément concerné. Cette procédure est répétée pour toutes les excitations. En considérant  $\bar{J}_i$  et  $\bar{E}_i$  pour chaque élément, la loi d'Ohm n'est pas satisfaite. La minimisation du carré du résidu pour chaque élément et pour chaque excitation est recherchée par l'ajustement de la résistivité ( $\rho_i$ ) à l'intérieur de chaque élément, nous obtenons :

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^{X(i)} \nabla \phi_{ij} \cdot \nabla \phi_{ij}}{\sum_{j=1}^{X(i)} \bar{J}_{ij} \cdot \nabla \phi_{ij}}$$

Cette expression donne l'estimation de la résistivité à l'intérieur de l'élément  $i$ . Dans cette relation  $X(i)$  représente le nombre d'excitations sur lequel est effectuée la somme pour l'élément  $i$ .

Comme exemple de simulation, nous considérons de nouveau le modèle bicouche décrit précédemment mais avec des valeurs de résistivité différentes. La résistivité de la couche supérieure est de 100 Ohm/m, tandis que la résistivité de la seconde est de 20 Ohm/m. L'épaisseur de la première couche est toujours de 1,5 m. La distance entre forage est de 5 m. La première électrode est installée à une profondeur de 1 m. Les valeurs simulées de la résistivité apparente ont été obtenues à partir d'une modélisation réalisée en symétrie de révolution dans un plan méridien. Le modèle après inversion est donné sur la figure 6. La position de l'interface est bien localisée mais, on peut observer une sous-estimation de la résistivité vraie pour la couche supérieure tandis que l'estimation pour la seconde couche est correcte. L'erreur modèle (rms misfit) est d'environ 29 %.

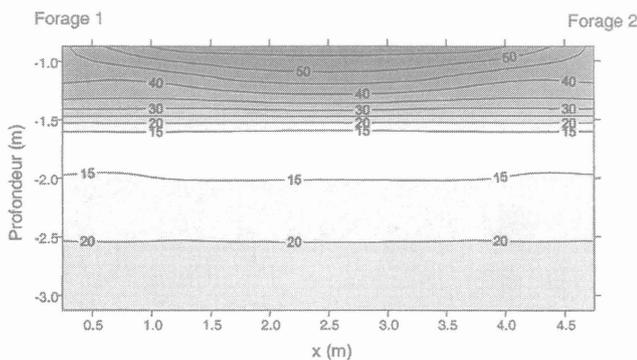


FIG. 6 Répartition des résistivités entre deux forages obtenue après inversion des résultats d'une simulation directe. Resistivity models obtained by inverting synthetic data.

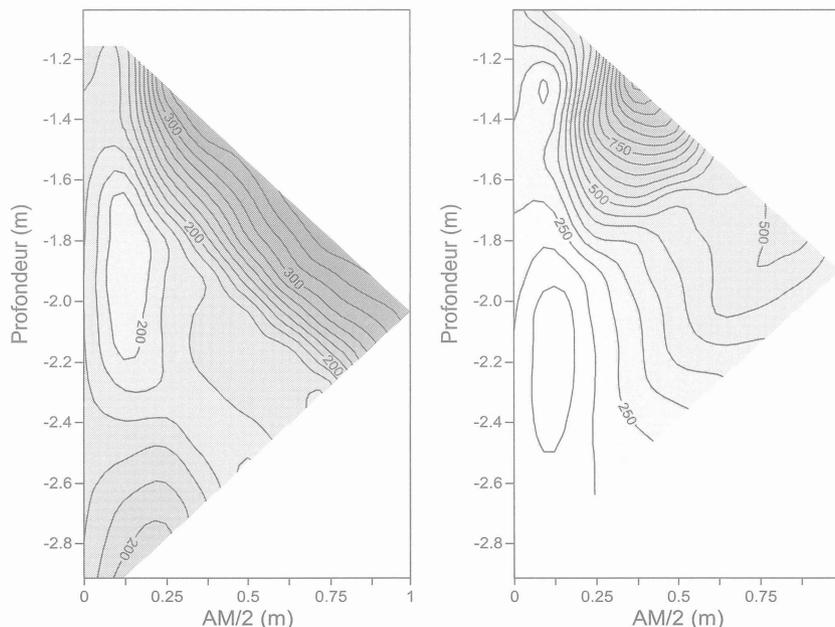


FIG. 7 Répartition des résistivités apparentes autour du forage A (configuration pôle-dipôle) : a) source de courant au-dessus des électrodes de potentiel ; b) source de courant en dessous des électrodes de potentiel.

Single borehole (A) measurements using pole-dipole array : a) current source above potential electrodes ; b) current source under potential electrodes.

Cette valeur est en accord avec les résultats donnés par Olayinka et Yaramenci (2000). De plus, ces auteurs ont également démontré que la distribution de l'erreur modèle est plutôt concentrée dans certaines régions et tout particulièrement au niveau des contacts.

Quoique la méthode inverse proposée n'utilise pas les lignes de courant exactes, les résultats obtenus à partir de simulations numériques semblent crédibles.

### 3.2

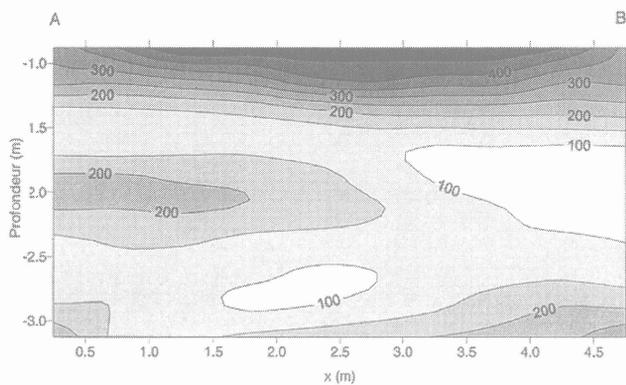
## Résultats expérimentaux et interprétation

Différentes campagnes de mesures ont été réalisées un, deux et trois mois après la cimentation des forages. Une très bonne reproductibilité des mesures a été observée. Les résultats des mesures en forages peuvent être interprétés comme la réponse à une succession de deux couches de forte résistivité. Au niveau des forages A et B (Fig. 7), la couche supérieure présente une résistivité entre 500 et 800 Ohm/m tandis que la couche inférieure montre une résistivité d'environ 200 Ohm/m. La résistivité de cette même couche décroît de 500 à 200 Ohm/m avec la profondeur au niveau du forage C. Étant donné que le coulis de ciment a une résistivité proche de 100 Ohm/m, le rapport entre la résistivité du coulis et la résistivité du terrain est supérieur à 0,08. Les mesures expérimentales peuvent être utilisées sans aucune correction particulière.

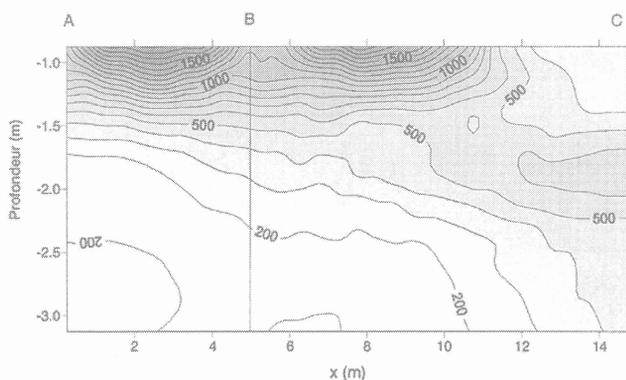
Dans le but d'obtenir une image de la répartition de la résistivité entre deux forages, toutes les combinaisons entre les électrodes de courant et de potentiel sont considérées : 200 mesures sont ainsi réalisées. Cinquante éléments ont été utilisés dans le processus d'inversion pour discrétiser la région entre le forage A et le forage B. La figure 8 montre l'image finale de la reconstruction de la répartition de la résistivité entre A et B. Cette figure met en évidence que la zone entre 0 et 1,3 m, d'une résistivité comprise entre 500 et

200 Ohm/m, peut être interprétée comme la couche de graves. La zone inférieure, avec une résistivité en dessous de 200 Ohm/m, correspond à la couche de sable.

Trois mois plus tard, sans aucune pluie importante, une autre campagne de mesures a été réalisée en utilisant le forage C situé à une distance de 15 m de A et de 10 m de B (Fig. 4). La figure 9 est une représentation de la répartition de la résistivité, obtenue après inversion des données, entre les forages A-B et B-C. On peut observer que l'image de la répartition de la résistivité entre A et B est similaire à celle présentée à la figure 8. Les valeurs de résistivité de la couche supérieure sont comprises entre 500 et 1 500 Ohm/m et entre 150 et 500 Ohm/m pour la couche inférieure. Cette forte augmentation des valeurs de résistivité s'explique par la diminution de l'humidité du sol durant les 3 mois séparant la première et la dernière campagne de mesures. La partie droite de l'image (tomographie entre B et C) suggère une disparition progressive de la couche supérieure entre le forage B et le forage C. La zone proche du forage C avec une résistivité comprise entre 400 et 600 Ohm/m peut être interprétée comme une seule et unique couche de sable. De plus, on peut observer une variation latérale de la résistivité de la couche inférieure entre B et C. La couche supérieure agirait comme une protection de la couche inférieure, entre A et B, contre les variations d'humidité. A partir de ces différentes interprétations on obtient un modèle géophysique de terrain qui correspond parfaitement à la coupe géologique du site test.



**FIG. 8** Tomographie de résistivité entre les forages A et B.  
Reconstructed two-dimensional resistivity image between boreholes A and B.



**FIG. 9** Tomographie de résistivité obtenue entre les forages A-B et B-C après trois mois secs.  
Reconstructed two-dimensional resistivity image between A-B and B-C after three dry months.

Le dispositif expérimental d'électrodes permanentes en forage et la méthode d'inversion proposée pour le traitement des mesures électriques entre forages semblent efficaces et fiables.

4

## Site de creusement de tunnel en milieu urbain

4.1

### Le site

La reconnaissance géophysique en site urbain a été réalisée dans le cadre du creusement de l'émissaire Cachan-Charenton dans sa phase d'entrée dans la vallée de la Seine. Plus précisément, le site retenu pour la réalisation des forages est situé à proximité de la confluence entre la Marne et la Seine, rue Salinave à Ivry-sur-Seine.

Le tunnel est constitué d'une galerie circulaire de 2,60 m de diamètre intérieur et de 1 810 m de longueur. Le tunnelier utilisé, d'un diamètre nominal de 3,20 m, est de type pression de terre. Dans la zone d'étude, l'axe du tunnel est à une profondeur de 22,70 m. Cinq forages d'une profondeur d'environ 31 m ont été réalisés. Ils sont placés en quinconce de part et d'autre de la rue, de façon à constituer un maillage irrégulier, permettant de tester l'influence de la distance entre les électrodes sur la qualité de la reconnaissance géophysique. La distance entre les forages varie de 11 à 90 m (Fig. 10a). Les coupes lithologiques révèlent une constance dans la nature des formations et des variations d'ordre métriques de la position des toits de la formation argilo-marneuse et de la craie. Les paramètres de forage ont été enregistrés pendant la foration et permettent de préciser la position des interfaces. La figure 10b donne, à titre d'exemple, le log lithologique relevé sur le forage C. Les forages sont instrumentés sur les 15 derniers mètres avec 15 électrodes espacées de 1 m fixées autour d'un tube PVC. Le couplage est assuré entre les électrodes et le sol par un coulis de ciment injecté sur toute la longueur des forages.

4.2

### Résultats et interprétation

Les mesures réalisées sur ce site expérimental sont effectuées avec un dispositif pôle-dipôle pour les mesures en forages (permettant d'améliorer le contraste de résistivité), et avec un dispositif pôle-pôle pour les mesures entre forages (permettant d'obtenir des mesures moins bruitées pour des grandes distances entre forages).

A partir des mesures réalisées en forages, les résistivités apparentes sont directement représentées sous forme de pseudo-section. Pour chaque forage, deux pseudo-sections sont représentées, la première lorsque la source de courant est au-dessus des électrodes, la seconde pour la configuration inverse. L'interprétation des mesures réalisées entre forages est basée sur une image de la répartition de la résistivité entre chaque couple de forages obtenue à partir de l'algorithme d'inversion proposé précédemment.

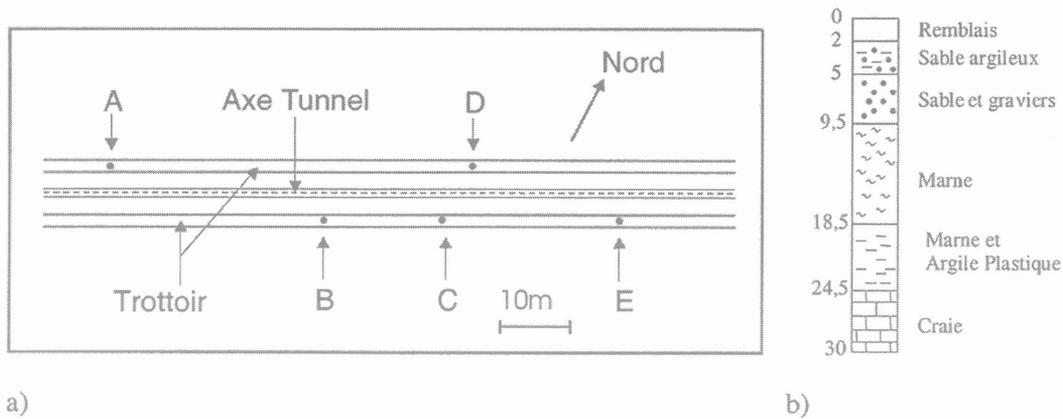


FIG. 10 Situation des forages (a) et log lithologique sur le site de construction du tunnel (b).  
Borehole arrangement and geology for the tunnel site investigation : a) boreholes arrangement ; b) shallow stratigraphic log.

Pour la direction du chantier, les objectifs étaient de déterminer la position du toit de la couche de craie et l'homogénéité de la couche d'argile marneuse au-dessus de la formation crayeuse. Étant donné que les électrodes sont situées entre 15 et 30 m, on peut s'attendre à détecter les limites entre les marnes et l'argile marneuse et plus particulièrement la limite entre cette dernière formation et la craie en raison d'un contraste de résistivité plus important. Des hétérogénéités ponctuelles peuvent également être détectées.

La figure 11 montre un exemple d'une pseudo-section de résistivité apparente obtenue avec des mesures en forage. Globalement, on observe des valeurs de résistivité apparentes qui correspondent à des sols de faible résistivité. On note un environnement relativement homogène jusqu'à une profondeur de 25 à 26 m, puis

une augmentation de la résistivité au-delà. Cette zone correspond à l'interface entre les marnes argileuses et la craie. Le contraste est plus important (Fig. 11a) quand la source est sous les électrodes de potentiel. La différence entre les deux pseudo-sections confirme la présence d'une interface (cf. § 3.1). On peut également observer sur les deux pseudo-sections une zone plus résistante vers 20 m de profondeur. Cette zone pourrait être interprétée comme la présence de lits sableux ou de niveaux indurés à l'intérieur de la formation argilo-marneuse.

Un exemple de calcul de la distribution de la résistivité entre le forage D et E à partir de l'algorithme d'inversion est présenté à la figure 12. Un total de 450 mesures est pris en compte pour chaque couple de forages. Pour l'inversion des mesures, le milieu entre forage est discrétisé en 100 cellules. A partir de cette

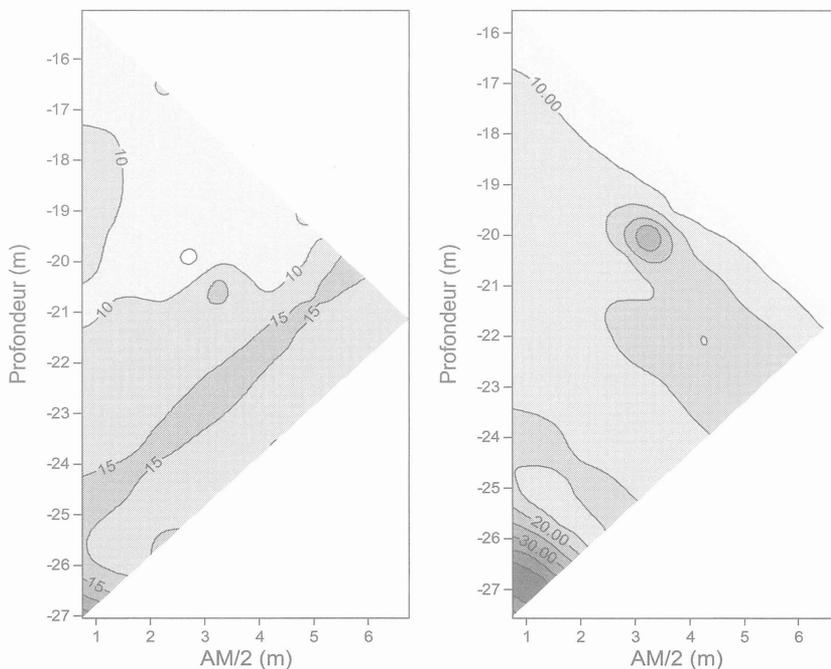


FIG. 11 Exemple de résultats obtenus pour les mesures en forage (forage A – configuration pôle-dipôle) : a) source de courant au-dessus des électrodes de potentiel ; b) source de courant en dessous des électrodes de potentiel.

Single borehole (A) measurements using pole-dipole array : a) current source above potential electrodes ; b) current source under potential electrodes.

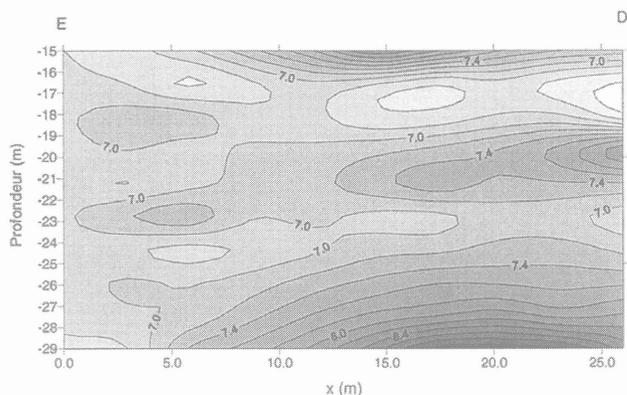


FIG. 12 Tomographie de résistivité entre les forages D et E (configuration pôle-pôle). Reconstructed two-dimensional resistivity image between B-C using a pole-pole array.

figure, nous pouvons remarquer que les valeurs de résistivité sont, en moyenne, plus faibles que celles obtenues avec les mesures en forage. Cette différence vient essentiellement du volume investi par la mesure qui est plus influencée par la présence d'un milieu conducteur au-dessus de la couche d'argile que par la présence de la couche de craie plus résistante. Nous observons de nouveau une augmentation significative de la résistivité avec la profondeur après 25 m (limite argile-craie). En outre, on peut noter une diminution de la résistivité de D vers E jusqu'à une distance de 10 m de D ce que l'on peut interpréter comme une variation latérale de faciès.

Dans l'ensemble, le site présente une formation argilo-marneuse homogène et un léger pendage du toit de la formation crayeuse de D vers E. Les autres tomographies réalisées confirment cette interprétation.

Deux autres sources d'informations peuvent permettre d'étayer ces conclusions. La première source est l'observation des débris de marinage au cours du creusement : le tunnelier est toujours resté au-dessus du toit de la craie et aucun bloc ou lentille sableuse n'a été détecté dans la formation argilo-marneuse. Des débris plus indurés que d'autres sont présents dans le marinage, mais ceci est tout à fait normal dans ce type de formation. La deuxième source d'information vient du suivi des paramètres de pilotage tels que la vitesse d'avance, la poussée sur la tête et le couple. Ces différents paramètres n'ont fait l'objet, en raison de contraintes pratiques (couple maintenu constant et paramètres moyennés sur la longueur d'un anneau), de traitements particuliers (Denis et Cremoux, 2002). Toutefois, les valeurs brutes de ces paramètres montrent un milieu où le creusement s'est effectué de manière homogène.

Ce site ne présentait donc pas d'hétérogénéités localisées susceptibles de gêner la progression du tunnelier et ne s'est donc pas révélé le plus propice à la validation de la démarche en présence d'hétérogénéités de types blocs par exemple.

#### 4.3

### Limites d'utilisation en milieu urbain

Quelques remarques peuvent être faites quant à la qualité des mesures réalisées en et entre forages sur un site de creusement de tunnel en milieu urbain.

Les pseudo-sections de résistivité apparentes qui sont construites à partir des mesures en forage peuvent mettre en évidence des anomalies. Toutefois, il est impossible de les localiser en azimut ce qui, dans notre cas, en limite l'intérêt puisque nous nous intéressons uniquement à l'aléa géologique le long du tracé du tunnel. Néanmoins, ces mesures permettent de vérifier la position de certaines interfaces.

Pour les tomographies électriques, toutes les combinaisons entre les électrodes de courant et les électrodes de potentiel sont réalisées. Pour chaque combinaison, la mesure est une moyenne de trois mesures de potentiel ou de différences de potentiel obtenues avec trois injections de courant successives. L'appareil de mesure calcule un paramètre  $q$  (%) (équivalent à un coefficient de variation) qui quantifie la variabilité de la mesure sur les trois injections. Une valeur de  $q$  égale à 0 indique une mesure dont la répétabilité est excellente. L'analyse de la variabilité de la mesure sur les différentes tomographies va nous permettre d'apprécier les limites d'utilisation de cette méthode en milieu urbain. La figure 13 représente la distribution du paramètre  $q$  pour deux distances entre forages différentes. La tomographie B-C apparaît être de bonne qualité avec des mesures qui dans l'ensemble présentent une faible variabilité. À l'inverse, pour une distance entre forages beaucoup plus importante, environ 55 m entre les forages A et C, la qualité sur la répétition des mesures se dégrade très vite. La représentation de la médiane du paramètre  $q$  en fonction de la distance entre les forages, figure 14, permet de mettre en évidence la perte de qualité sur les mesures pour des distances supérieures à 40 m. Il convient également de noter que les tomographies pour les couples de forages A-D et A-E n'ont pu être réalisées en raison d'un rapport signal sur bruit trop faible. Habituellement, des tomographies avec des distances entre forages de 90 m peuvent être réalisées. L'origine d'une mauvaise répétabilité des mesures doit d'abord être recherchée dans le dispositif expérimental au niveau du couplage électrode-scellement-sol. Chaque électrode participe à 30 mesures, 15 en injection et 15 en mesures de potentiel. Le calcul de la moyenne du paramètre  $q$  sur ces 30 mesures pour chaque électrode nous permet de vérifier si une ou plusieurs électrodes contribuent plus que les autres à la mauvaise répétabilité de la mesure. La figure 15 donne, pour le couple de forage C-E, la répartition de la moyenne de  $q$  pour chaque électrode. Nous obtenons, pour l'ensemble des couples de forages, une distribution uniforme de la moyenne par électrodes du paramètre  $q$ . Aucune électrode n'induit donc une erreur systématique sur les mesures. La mauvaise répétabilité des mesures, à partir d'une certaine distance entre forage, est plus à rechercher dans le contexte urbain où des courants de fuite (prise de terre) et la présence de lignes électriques enterrées peuvent contaminer les mesures. Dans un article récent, Bing et Greenhalg (2000) montrent que, dans une configuration pôle-pôle, les faibles tensions mesurées peuvent être facilement perturbées par le bruit ambiant. Les électrodes A et N, repoussées à l'infini dans une configuration pôle-pôle, seraient à l'origine de la mauvaise répétabilité de la mesure. Nos résultats expérimentaux semblent confirmer leurs simulations numériques. En contexte urbain, des configurations spécifiques du type : AM-N, AM-B ou AM-BN, devraient être utilisées pour limiter la contamination des mesures et leur assurer

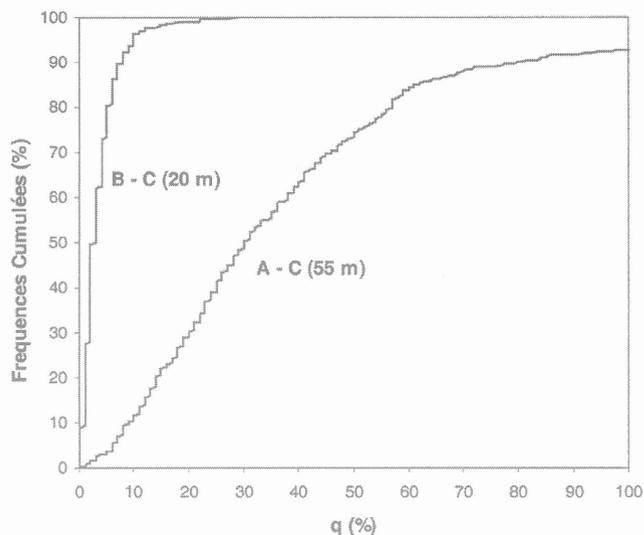


FIG. 13 Exemple de la distribution de la variable  $q$  pour deux distances entre forages.  
Example of the cumulative distribution of  $q$  for two distances between boreholes.

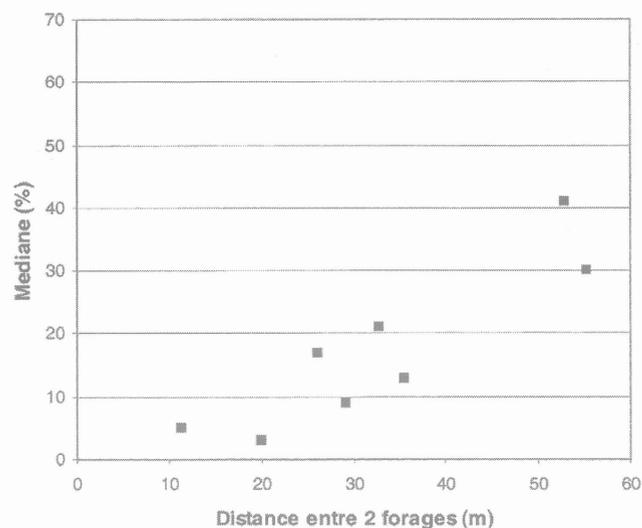


FIG. 14 Évolution de la médiane de  $q$  en fonction de la distance entre les forages.  
Value of the median of  $q$  as a function of the distance between boreholes.

une meilleure répétabilité au-delà d'une distance de 50 m entre forages.

5

## Conclusion

Les contraintes du milieu urbain (surface réduite et parasites divers) et la profondeur des tunnels (entre 10 et 30 m) orientent naturellement le choix, pour une reconnaissance géophysique de l'aléa géologique, vers des dispositifs soit en forage, soit à partir du front de taille. La faible probabilité de rencontrer un obstacle ou des variations lithologiques, suffisamment importants pour entraîner des baisses de rendement dans le creu-

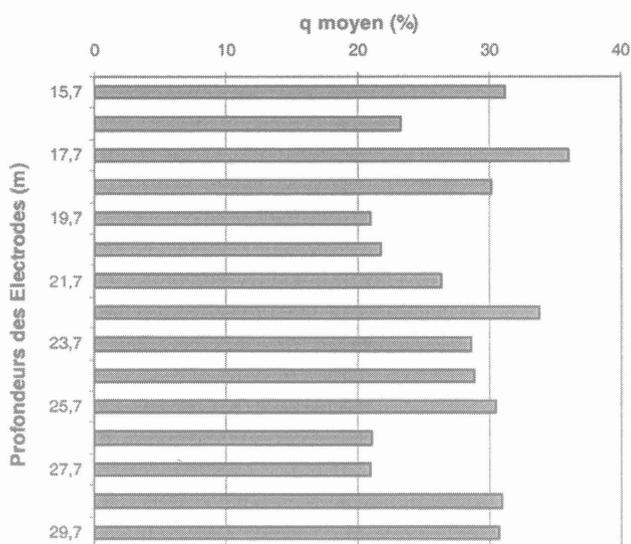


FIG. 15 Exemple de la répartition de la moyenne de  $q$  sur 30 mesures en fonction de la profondeur des électrodes (tomographie D-E).  
Example of the distribution of the mean of 30 values of  $q$  versus electrode depth (tomography D-E).

sement d'un tunnelier, incite à rechercher des dispositifs géophysiques qui ne perturbent pas le déroulement du chantier et qui soient très rapidement mobilisables. Le dispositif retenu est un système d'électrodes permanentes en forage, pour des mesures en et entre forages, installé dans les forages réalisés lors de la reconnaissance géotechnique le long du tracé du tunnel. Ce dispositif a été préalablement testé sur un site test. Les mesures obtenues, dans un forage et entre deux forages, ont montré la viabilité de l'équipement mis au point et l'efficacité de la méthode d'inversion. Dans le cas d'un chantier de creusement de tunnel en milieu urbain ce dispositif nous a permis de détecter et positionner le toit de la couche de craie et de repérer, par des mesures entre forages, des variations latérales de faciès. Les mesures en forage sont à réserver à la détection des interfaces à proximité du forage, les anomalies détectées ne pouvant être repérées en azimut. Les mesures entre forages fournissent jusqu'à des distances de 50 m des données encore exploitables. Toutefois, le contexte urbain du site de creusement du tunnel et le choix d'une configuration pôle-pôle limitent l'utilisation de la tomographie électrique pour des distances supérieures. Des configurations particulières d'électrodes qui permettraient de s'affranchir de l'influence des électrodes à l'infini sur la qualité des mesures sont encore à tester en milieu urbain.

Les mesures électriques permettent de compléter l'information géologique entre les forages le long du tracé d'un tunnel. D'un point de vue pratique, les dispositifs d'électrodes permanentes seraient laissés en attente dans des forages, équidistants d'une quarantaine de mètres, réalisés lors de la reconnaissance géotechnique. L'utilisation du dispositif de reconnaissance géophysique est ensuite laissée à l'appréciation de la direction du chantier de creusement.

### REMERCIEMENTS

Cette étude a été conduite en collaboration avec les sociétés Bouygues et Me2i avec le soutien financier de la DRAST.

## Bibliographie

- Bing Z., Greenhalgh S.A. – « Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations ». *Geophys. Prosp.*, n° 48, 2000, p. 887-912.
- Casas A., Lazaro R., Pinto V., Rivero L., Roca J.L. – « Geological mapping of the basement in Barcelona city from gravity data ». *Proceedings of the Third Meeting of the Environmental & Engineering Geophysical Society*, Nantes, 1996, p.364-367.
- Dabas M., Tabbagh A., Tabbagh J. – « 3D inversion subsurface electrical surveying – I Theory. Geophysical ». *Journal International*, n° 119, 1994, p. 975-990.
- Denis A., Cremoux F. – « Traitement et analyse des paramètres de pilotages d'un tunnelier ». *Can. Geotechnical Journal* 39, 2002, p. 451-462.
- Loke M.H., Barker R.D. – « Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method ». *Geophys. Prosp.*, n° 44, 1996a, p. 131-152.
- Loke M.H., Barker R.D. – « Practical techniques for 3-D inversion surveys and data inversion ». *Geophys. Prosp.*, n° 44, 1996b, p. 499-523.
- Mauriello P., Patella D. – « Resistivity anomaly imaging by probability tomography ». *Geophys. Prosp.*, n° 47, 1999, p. 411-429.
- Olayinka A.I., Yaramenci U. – « Choice of the best model in 2-D geoelectrical imaging : case study from a waste dump site ». *Eur. J. Env. Eng. Geophys.*, n° 3, 1999, p. 221-244.
- Olayinka A.I., Yaramenci U. – « Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity ». *Geophys. Prosp.*, n° 48, 2000, p. 293-316.
- Piwakowski B., Watelet J.M., Moreaux D. – « High-Resolution seismic prospecting of old gypsum mines. Evaluation of detection possibilities ». *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2., n° 2, 1997, p. 109-120.
- Shima. H. – « 2D and 3D resistivity image reconstructing using crosshole data ». *Geophysics*, n° 57, 1992, p. 1270-1281.
- Tabbagh A., Hesse A., Girard R. – « Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole : field trials on archaeological sites ». *Geophysical Prospecting*, n° 41, 1993, p. 579-597.
- Tabbagh A., Panissod C. – « 1D complete calculation for electrostatic soundings interpretation ». *Geophysical Prospecting*, n° 48, 2000, p. 511-520.
- Wait J.R. – *Geo-Electromagnetism*, Chapter 1. Academic Press, 1982, 67 p.
- Wexler A., Fry B., Neuman R.M. – « Impedance-computed tomography algorithm and system ». *Appl. Opt.*, n° 24, 1985, p. 3985-3992.