

La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) – III – Approche méthodologique d'étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées

ROGER GUÉRIN^{1,*}, CÉDRIC PANISSOD¹, MÉDARD THIRY², YVES BENDERITTER³,
ALAIN TABBAGH¹ et SABINE HUET-TAILLANTER²

Mots clés. – Site pollué, Eau minéralisée, Résistivité électrique, Cartographie électromagnétique slingram, Panneau électrique

Résumé. – Le site de l'ancienne usine de production de zinc, de plomb et d'acide sulfurique de Mortagne-du-Nord (France) constitue une friche où la pollution par métaux lourds est forte. La propriété physique des matériaux sensible à la minéralisation, est la résistivité électrique qui varie en fonction de la minéralisation et de la quantité de fluide imprégnant la formation. Des techniques géophysiques mesurant cette propriété comme la cartographie électromagnétique slingram et le panneau électrique ont été employées. Des prospections à plusieurs profondeurs et sur une grande superficie permettent de caractériser les zones à eaux fortement minéralisées, d'identifier les lieux de sortie de l'eau vers les drains fluviaux voisins et d'indiquer la position des alluvions argileuses.

The industrial waste land in Mortagne-du-Nord (59) – III – Methodological approach for a non-destructive geophysical study of sites contaminated by mineralized water

Key words. – Waste site, Mineralized water, Electrical resistivity, Slingram electromagnetic mapping, Electrical imaging

Abstract. – The site of zinc and lead metallurgy, and sulphuric acid making of Mortagne-du-Nord (France) is a waste landfill where contamination is the main preoccupation. The physical property sensitive to mineralization is electrical resistivity, because of the water content and quality dependence. Geophysical techniques taking into account this property, such as slingram electromagnetic mapping and electrical 2D imaging have been carried out. Surveys at different depths and over a wide area allow to locate mineralized water areas, to identify the water leakage toward river drain, and to locate the clayey alluvial deposits.

INTRODUCTION

De nombreux sites industriels et miniers abandonnés présentent des eaux très acides qui sont à l'origine d'une mobilité importante des métaux dans l'environnement. Reconnaître les volumes de matériaux et surtout localiser par des méthodes non-destructives les zones d'écoulement de ces eaux très chargées est primordial avant d'envisager une réhabilitation de ces sites. Les reconnaissances géologiques classiques par fosses et sondages, si elles sont indispensables pour reconnaître et prélever les matériaux et les eaux, sont par contre lourdes, parfois impossibles à mettre en œuvre pour des raisons de protection du site, quand on veut cerner les contours et les digitations des zones polluées et/ou trouver des drains d'écoulement préférentiel.

Ceci conduit à envisager l'emploi des méthodes géophysiques et, parmi ces méthodes, celles qui permettent (i) de caractériser les propriétés hydrauliques des milieux (ii) de caractériser la présence d'eau et (iii) si possible d'évaluer sa minéralisation.

PRÉSENTATION DU SITE

La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (France) a été choisie comme site test de l'application des méthodes géophysiques aux problèmes des sites industriels pollués. Elle couvre une surface d'environ 25 ha (fig. 1) et a abrité les activités de métallurgie de zinc et de plomb et de fabrication d'acide sulfurique entre 1901 et 1968. Cette friche est un site pilote pour plusieurs études financées par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et pour lequel on connaît bien la distribution et la nature des polluants solides, ainsi que la chimie des eaux [Thiry *et al.*, 2001 ; Huet-Taillanter *et al.*, 2001 ; Schmitt *et al.*, 2002].

Le site est situé entre deux cours d'eau, la Scarpe au nord-est et le Décours au sud-ouest, dans le lit majeur de l'Escaut. Une nappe superficielle alimentée par les précipitations atmosphériques baigne les remblais industriels (scories et creusets de fonderie) imprégnés de métaux et qui présentent des zones très acides (pH atteignant 2,4) et très

¹ UMR 7619 Sisyphe, Département de Géophysique Appliquée, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), case 105, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, guerin@ccr.jussieu.fr

² UMR 7619 Sisyphe, Centre d'Informatique Géologique, Ecole des Mines de Paris, 35 rue St-Honoré, 77305 Fontainebleau cedex.

³ UMR 7619 Sisyphe, Centre de Recherches Géophysiques, CNRS, 58150 Garchy.

Manuscrit déposé le 22 mars 2001 ; accepté après révision le 29 août 2001. Publié avec l'accord des auteurs en Septembre 2002.

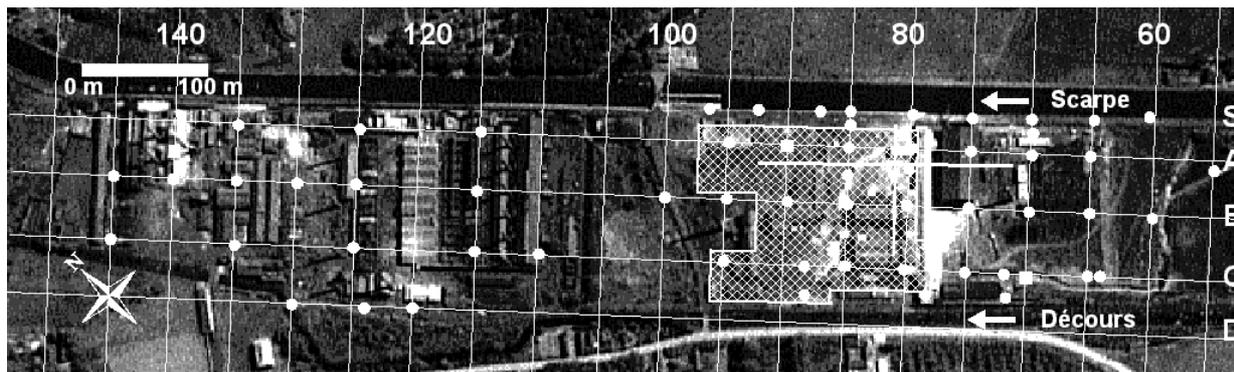


FIG. 1. – Vue aérienne verticale du site au courant de l'été 1957 et position de la zone d'étude géophysique. Le maillage de 50 m × 50 m correspond aux piézomètres (points blancs). La zone en grisée et les deux axes blancs correspondent aux lieux de prospection géophysique.

FIG. 1. – Aerial view of the site during summer 1957 and geophysical study area location. The 50 m × 50 m mesh corresponds to the piezometers (white points). The grey area and both white axes correspond to the geophysical survey site.

chargées en métaux (concentration en Zn^{++} pouvant atteindre 1 520 mg/L) [Thiry *et al.*, 2002]. Cette nappe est supportée par les alluvions argileuses de la Scarpe, correspondant aux dépôts de l'ancien marais et qui constituent une barrière hydrologique *a priori* efficace (fig. 2a et 2b) vis-à-vis de la nappe régionale profonde contenue dans les Sables d'Ostricourt d'âge thanétien qui forment le substratum géologique. La position et la qualité de la nappe superficielle et ses fluctuations sont étudiées sur la zone au moyen d'une trentaine de piézomètres. Le profil de l'un d'entre eux installé dans une des fosses de reconnaissance, est reporté sur la figure 2c. Une fluctuation maximum de 0,80 m a été enregistrée sur les quatre années de suivi de la friche. L'enregistrement a débuté lors d'une année à très fort déficit hydrique (450 mm en 1997) et s'est poursuivi avec deux années consécutives à excédent hydrique marqué (920 mm en 2000).

La nappe polluée se déverse directement dans la Scarpe et le Décours. Des zones d'écoulement sont visibles quand la nappe est haute en hiver et au printemps, en revanche d'autres zones de « fuites » fonctionnent vraisemblablement sans qu'il y ait d'écoulement visible notamment quand la nappe est plus basse (anciennes évacuations d'eaux usées, donc des zones très localisées). L'installation de piézomètres n'a pas permis d'identifier avec précision ces zones de fuites d'eaux lessivant les remblais. En effet, malgré sa forte densité, l'instrumentation du site reste insuffisante compte tenu de l'hétérogénéité des remblais et des dimensions des zones d'écoulement. Si les eaux minéralisées à conductivité élevée peuvent être repérées et localisées, il sera alors possible de déterminer ces zones de « fuites ».

MÉTHODOLOGIE

Les méthodes géophysiques appliquées à l'étude des sites pollués fournissent des renseignements sur la constitution du sous-sol peu-profond (dans une gamme allant de 0 à 20 m de profondeur) qui intègrent la nature des matériaux, leur porosité, leur hydrologie (zone vadose ou nappe) [Bernstone and Dahlin, 1997 ; Chambers *et al.*, 1999 ; Buselli and Lu, 2000 ; Panissod *et al.*, 2000]. La difficulté de l'interprétation des mesures obtenues par ces méthodes réside dans la discrimination de ces différents facteurs. La mise en

Bull. Soc. géol. Fr., 2002, n° 5

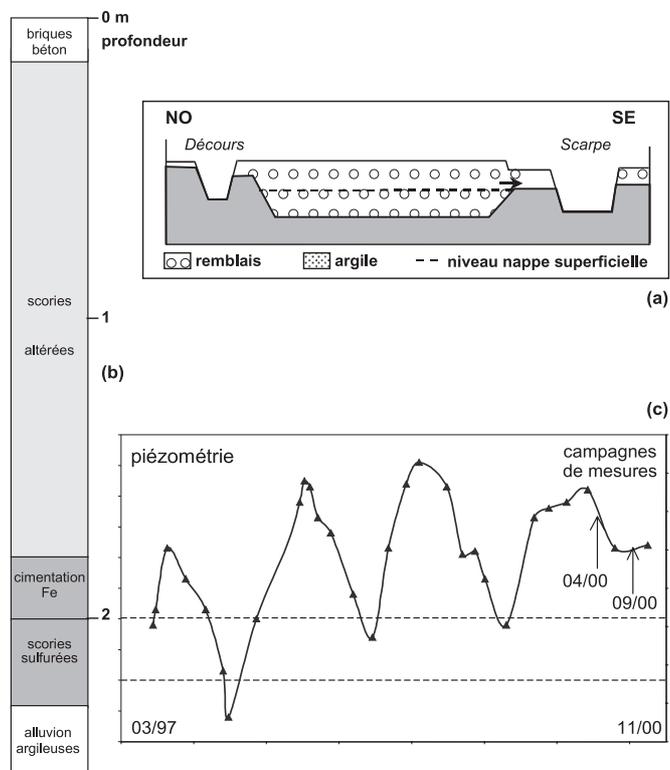


FIG. 2. – (a) Schéma de principe de l'hydrologie de la friche industrielle. (b) Profil d'altération des remblais. (c) Piézométrie de la nappe superficielle contenue dans les remblais de 1997 à 2000.

FIG. 2. – (a) Hydrology sketch of the waste site. (b) Alteration profile of the embankment. (c) Piezometric level of the shallow aquifer located in the embankment from 1997 to 2000.

œuvre combinée de différentes techniques sur un site industriel permet néanmoins d'espérer parvenir à :

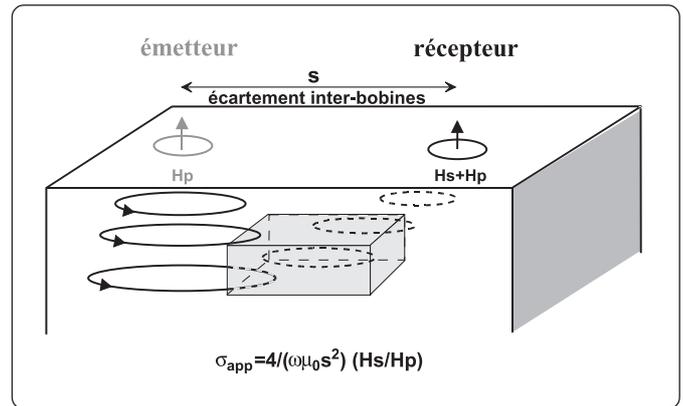
- i) cartographier à maille fine l'extension des différents types de matériaux,
- ii) localiser le niveau de la nappe et ses variations saisonnières,
- iii) évaluer la minéralisation de l'eau et ses variations spatiales en identifiant les points d'origine des fortes minéralisations,

iv) identifier des drains d'écoulement d'eaux fortement minéralisées.

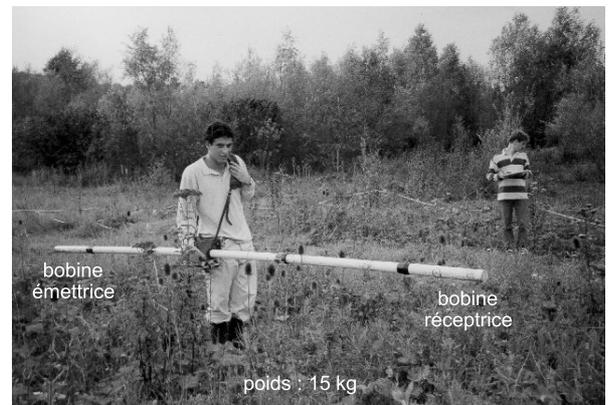
Les méthodes géophysiques qui mesurent la résistivité apparente (ρ_{app}), intégration volumique de la résistivité électrique, sont à privilégier dans ce type d'étude. En effet, la résistivité électrique du sous-sol (ρ exprimé en $\Omega.m$, propriété physique du sol correspondant à la capacité à ne pas laisser passer le courant électrique) dépend de la granulométrie, de la teneur en eau, de la minéralisation de l'eau et de la teneur en argile [McNeill, 1980a]. La cartographie électromagnétique slingram et les panneaux électriques, dont le paramètre cible est la résistivité (ou son inverse la conductivité σ exprimée en S/m), ont donc été employés.

La méthode électromagnétique slingram [McNeill, 1980b] est une méthode électromagnétique fréquentielle à faible nombre d'induction. Une bobine émettrice parcourue par un courant alternatif, génère un champ magnétique primaire. Celui-ci engendre dans le sol des courants de Foucault dont la distribution en volume dépend des hétérogénéités du sous-sol, qui créent à leur tour un champ magnétique secondaire, de fréquence identique au champ primaire. La somme des champs primaire et secondaire est mesurée par une bobine réceptrice dont la distance à l'émettrice est petite. Le rapport du champ secondaire en quadrature au champ primaire est proportionnel à la conductivité électrique apparente (σ_{app}), en mS/m (fig. 3a). La profondeur d'investigation (définie comme étant la capacité à être sensible à une couche conductrice ou à un volume conducteur) ne dépend que de la distance entre l'émetteur et le récepteur, et est indépendante de la fréquence du signal émis (au contraire d'autres méthodes électromagnétiques caractérisées par l'effet de peau, c'est-à-dire l'atténuation du signal électromagnétique avec la profondeur, et la croissance de la profondeur d'investigation avec la période de l'onde). La configuration utilisée est celle où les deux bobines sont horizontales coplanaires (HCP), et où l'axe des dipôles magnétiques est vertical (mode DMV). L'appareil utilisé (un EM31, Geonics Ltd.) a une distance inter-bobines fixe de 3,66 m (fig. 3b). Les données acquises sont représentatives d'un volume de sol allant de la surface à une profondeur d'investigation qui, pour le mode DMV mis en œuvre au cours de cette étude, est de l'ordre de 1,5 fois l'écartement inter-bobines, soit environ 6 m. L'intégration volumique fournit une réponse majeure pour les terrains situés à environ 1/2 fois l'écartement, c'est-à-dire environ 1,8 m de profondeur. La mise en œuvre permet d'obtenir une cartographie rapide de la conductivité apparente des terrains superficiels, 2 ha/jour suivant une maille carrée de 5 m \times 5 m sur un terrain dégagé, en acquisition point par point.

La méthode électrique est caractérisée par l'injection de courant continu et la mesure de la différence de potentiel, réalisées à partir d'électrodes plantées dans le sol. Cette mesure est représentative d'un certain volume de terrain qui dépend de la position et de la géométrie du dispositif utilisé. Le dispositif de mesure est constitué de deux paires de pôles, la première ayant pour rôle d'injecter le courant (les électrodes A et B) et la seconde de recueillir le signal (les électrodes M et N), soit la différence de potentiel produite par l'injection du courant dans le milieu environnant. La technique du panneau multi-électrodes permet d'acquérir, une fois tout le dispositif installé au sol, un grand nombre de mesures correspondant aux différentes



(a)

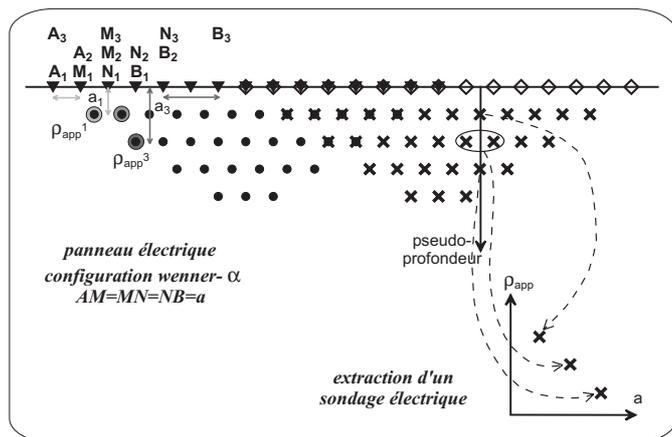


(b)

FIG. 3. – (a) Principe de la méthode électromagnétique slingram (avec l'expression de la conductivité électrique apparente fonction de l'écartement inter-bobines et des champs magnétiques primaire et secondaire) et (b) Appareil EM31 (Geonics Ltd.).

FIG. 3. – (a) Slingram electromagnetic methodology (with the formula of the apparent electrical conductivity depending on the distance inter-coils and on the secondary and primary magnetic fields) and (b) EM31 sensors (Geonics Ltd.).

combinaisons possibles de quatre électrodes. Les données acquises sont représentées par une pseudo-section de résistivité apparente où l'axe vertical correspond à une pseudo-profondeur (fig. 4a), les mesures sont placées par convention de représentation à une profondeur fonction de l'écartement des électrodes et du type de dispositif [Hallof, 1957]. La résolution du problème inverse (inversion) permet d'obtenir des coupes verticales de résistivité vraie et une échelle des profondeurs vraies [Loke and Barker, 1996]. L'équipement de prospection électrique multi-électrodes utilisé est composé d'un résistivimètre Syscal R1+ (Iris Instruments) et d'un dispositif de connexion de trente deux électrodes (fig. 4b). Plusieurs types de dispositif peuvent être employés lors de la prospection, dont notamment le wenner- α (les quatre électrodes sont alignées avec $AM=MN=NB=a$) et le dipôle-dipôle (les quatre électrodes sont alignées avec $AB=a$, $BM=na$ et $MN=a$). Chacun de ces dispositifs est caractérisé par des sensibilités différentes aux hétérogénéités du sous-sol : le wenner- α donne une réponse lisse, le dipôle-dipôle est sensible aux interfaces verticales et a une profondeur d'investigation moindre. La mise en œuvre permet d'obtenir 12 pseudo-sections (6 coupes verticales géoélectriques \times 2 dispositifs) par jour, pour un écartement inter-électrodes de 4 m.



(a)



(b)

FIG. 4. – (a) Convention de représentation des résistivités électriques apparentes en panneau (en configuration wenner- α , la résistivité électrique apparente ρ_{app} est affectée à une pseudo-profondeur égale à l'écartement entre deux électrodes consécutives, i.e. a) et mode d'extraction d'un sondage électrique (obtenu selon une verticale d'un panneau électrique, chaque valeur de ρ_{app} correspond à une acquisition pour une abscisse égale à la pseudo-profondeur) et (b) appareil Syscal R1+ (Iris Instruments).

FIG. 4. – (a) Conventional view of apparent electrical resistivity for electrical 2D imaging (with wenner- α configuration, the apparent electrical resistivity ρ_{app} is posted at a pseudo-depth equal to the distance between two consecutive electrodes, i.e. a) and extraction mode of an electrical sounding (obtained according to a vertical line of an electrical 2D imaging, each value of ρ_{app} corresponds to a data following an abscissa equal to the pseudo-depth) and (b) Syscal R1+ sensors (Iris Instruments).

MESURES

Deux campagnes de mesures géophysiques ont été réalisées afin de tester la sensibilité de la méthode aux variations de la nappe : l'une en période humide de hautes eaux, l'autre en période sèche de basses eaux. En fait, ce suivi temporel effectué en avril et en septembre 2000, montre des différences de résistivité et de conductivité apparente peu importantes (fig. 5), dont l'origine n'est pas facilement identifiable ; à cela trois raisons possibles :

i) l'été 2000 ayant été pluvieux, les conditions de terrain sec n'ont pas été vérifiées (fig. 2c),

ii) le suivi temporel n'a pas été assez fin pour mettre en évidence des variations,

iii) aux variations de résistivité (augmentation car le terrain devient moins humide, donc moins conducteur) se sont jointes des variations de température (augmentation

donc réduction de la résistivité) qui ont pour effet de se neutraliser.

Il est envisagé d'implanter un dispositif de mesure à demeure à différentes profondeurs dans le remblais. Cependant cette implantation ne devrait être réalisée qu'en fin d'expérimentation. En effet, elle nécessitera la réalisation de fosses et/ou de forages susceptibles de modifier les conditions de circulation des fluides dans le milieu. Ce dispositif permettra de quantifier plus précisément les variations temporelles de la résistivité du site et de les corrélérer au battement de la nappe provoquant le dénoyage ou l'ennoyage de certaines scories.

RÉSULTATS

La carte de conductivité apparente slingram (fig. 6) couvre une zone de 200 m \times 150 m. Cette carte résulte de la concaténation des deux campagnes de mesure (d'avril et de septembre 2000) effectuée sur des surfaces adjacentes avec un recouvrement sur une largeur de 20 m (montrant peu de variations, cf. fig. 5). Elle permet d'identifier la profondeur de la nappe d'eau minéralisée et/ou du toit des alluvions argileuses (indifféremment associées à des anomalies conductrices), et les lieux de sortie de l'eau vers les drains fluviaux voisins. Ce que nous observons est en fait la réponse globale du sous-sol sur les six premiers mètres de profondeur (cf. ci-dessus) : les anomalies superficielles (hétérogénéités dans les remblais) sont masquées par les réponses plus importantes des terrains sous-jacents (alluvions argileuses). Deux grandes zones apparaissent sur cette carte. La zone relativement conductrice (conductivité > 100 mS/m, c'est-à-dire résistivité < 10 Ω m, en noir sur la figure) montre vraisemblablement la présence d'une zone à eau fortement minéralisée (dont la conductivité mesurée est de l'ordre de 3000 μ S/cm, soit 3,3 Ω m) et/ou des alluvions argileuses proches de la surface. La zone relativement résistante (conductivité < 50 mS/m, c'est-à-dire résistivité > 20 Ω m, en blanc/gris clair sur la figure) correspond à des terrains « moins minéralisés » et/ou à des alluvions plus profondes. Ces différentes anomalies sont cohérentes avec les données d'analyse chimique obtenues dans les piézomètres [Thiry *et al.*, 2001]. Il faut remarquer que la répartition spatiale de ces piézomètres, adaptée pour le suivi du niveau et de la qualité de la nappe, n'est pas optimale en regard de la structure du sous-sol. Les piézomètres se trouvent autour des anomalies détectées en géophysique.

Une série de panneaux électriques réalisée avec deux configurations (wenner- α et dipôle-dipôle) a permis de localiser des anomalies conductrices après inversion avec le logiciel Res2dInv [Loke and Barker, 1996]. L'étude des profils géoélectriques LA (fig. 7a et 7b) et T80 (fig. 7c et 7d) positionnés sur la figure 6, permet d'identifier trois horizons de résistivités vraies différentes qui reflètent la nature lithologique des terrains sous-jacents et d'appréhender leur répartition latérale. On observe :

i) un terrain superficiel de résistivité > 80 Ω m (en blanc/gris clair sur la figure) dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 4 m,

ii) un terrain de faible résistivité (< 10 Ω m, en noir/gris foncé sur la figure) entre 4 et 12 m de profondeur, et

iii) un substratum de résistivité moyenne (en gris sur la figure).

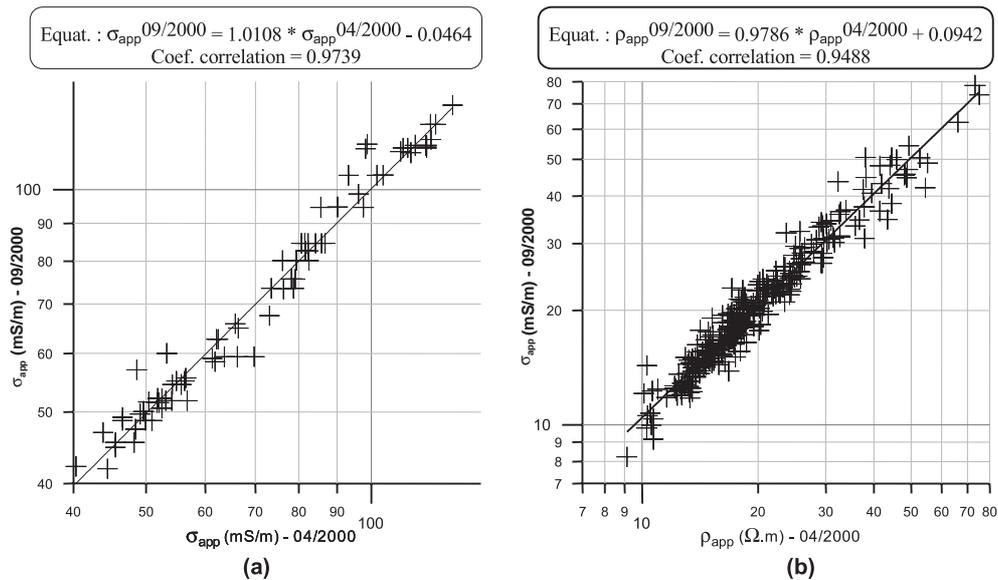


FIG. 5. – Comparaison de données obtenues en (a) cartographie électromagnétique slingram et en (b) panneau électrique en avril et en septembre 2000 (nuage de points et droite de régression proche de la bissectrice, qui correspond à l'absence de variation).
 FIG. 5. – Comparison of (a) slingram electromagnetic mapping and (b) electrical resistivity profile data carried out in april and september 2000 (scattered data and regression line near to bisecting line, that corresponds to lack of variation).

Par ailleurs, on peut remarquer la présence dans les niveaux superficiels d'anomalies conductrices relativement verticales (entre 4 et 10 m de large). L'inversion 2D ne permet pas d'estimer avec précision la profondeur des différents horizons mais fait apparaître d'importantes variations de celle-ci. Les frontières entre les différents terrains semblent relativement diffuses. Cela peut traduire le fait que les différents niveaux contiennent tous plus ou moins de l'eau minéralisée. Cet effet peut également être attribué à la géométrie figée des blocs du modèle associée à la représentation sous forme de carte d'isovaleurs (cf. fig. 7). La ré-interprétation des données à la verticale de zones apparemment tabulaires (sous forme de sondage électrique extrait des pseudo-sections, d'après le processus décrit sur la figure 4) permet de déterminer la profondeur des interfaces et leur variation (profondeurs qui ainsi déterminées ne correspondent pas forcément aux limites du maillage du modèle utilisé pour l'inversion, fig. 8). Les sondages électriques (choisis dans des zones éloignées des hétérogénéités bien visibles sur la représentation du modèle sous la forme des blocs utilisés lors de l'inversion) montrent une structure à trois couches où varie principalement la profondeur du toit du terrain conducteur intermédiaire.

DISCUSSION

Les trois horizons décrits précédemment peuvent être interprétés comme la signature :

- i) en surface des débris industriels (anciennes fondations, dalles de béton des usines...) et des remblais minéralisés,
- ii) à moyenne profondeur, des alluvions argileuses,
- iii) d'un substratum correspondant aux Sables d'Ostercourt.

Cependant, il est établi que la profondeur du toit des alluvions argileuses (mesurée lors de l'implantation des piézomètres) varie peu sur l'ensemble du site. Cette

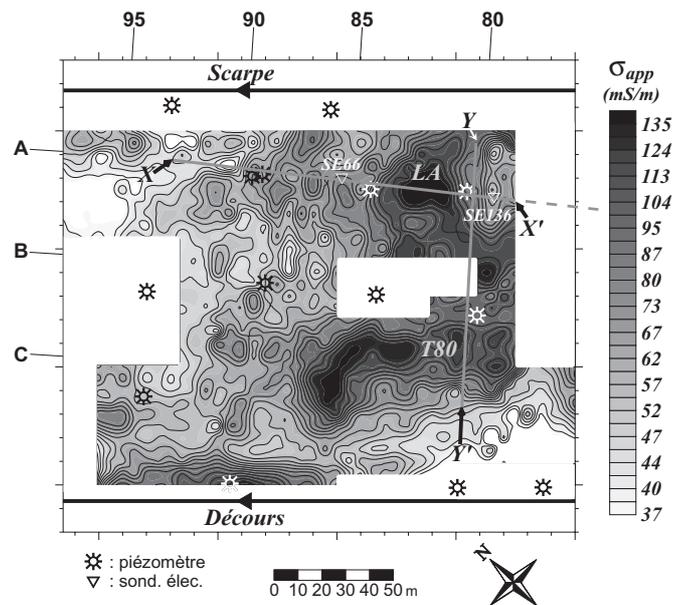


FIG. 6. – Cartographie électromagnétique slingram de conductivité électrique apparente (σ_{app}). Les zones non cartographiées correspondent à des zones inaccessibles. Le maillage des piézomètres (cf. fig. 1) est reporté sur les bords.

FIG. 6. – Apparent electrical conductivity (σ_{app}) slingram electromagnetic mapping. Non mapped areas correspond to inaccessible areas. The mesh of the piezometers (cf. fig. 1) is posted on the edges.

profondeur, de l'ordre de 2 à 4 m, correspond à celle de l'ancien marais naturel (fig. 8). Par ailleurs, les résistivités observées des différents terrains sont globalement plus faibles que celles attendues (résistivité des alluvions argileuses de l'ordre de 10 Ωm , au lieu de 20 Ωm ; résistivité des sables de l'ordre de 50 Ωm , au lieu de 200 Ωm). On peut attribuer ces faibles valeurs à la présence d'eaux minéralisées qui baignent ces formations.

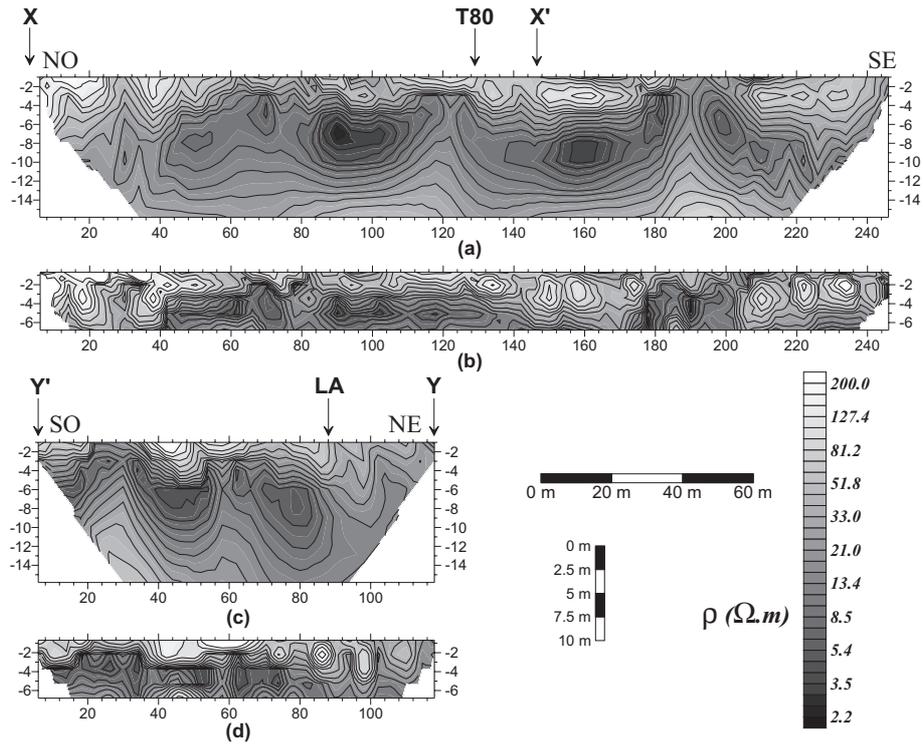


FIG. 7. – Profil de résistivité électrique réalisé en dispositif (a) wenner- α 4 m et (b) dipôle-dipôle 4 m pour le profil LA, (c) wenner- α 4 m et (d) dipôle-dipôle 4 m pour le profil T80. Ces profils de résistivité sont représentés en isocontours à partir des valeurs de résistivité obtenues après inversion suivant un maillage géométrique.

FIG. 7. – Electrical resistivity carried out with (a) wenner- α (4 m) and (b) dipole-dipole (4 m) array for LA profile, (c) wenner- α (4 m) and (d) dipole-dipole (4 m) array for T80 profile. These profiles are shown with isocontour based on resistivity values obtained after inversion following a geometric mesh.

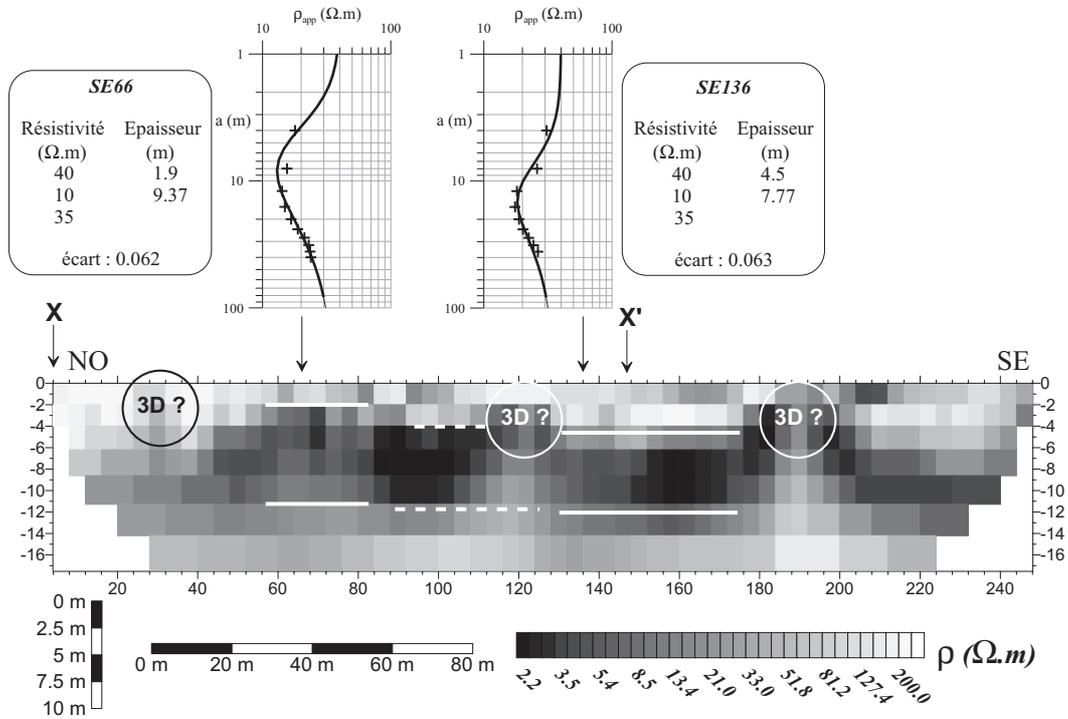


FIG. 8. – Interprétation du profil LA de résistivité électrique réalisé en dispositif wenner- α 4 m, et sondages électriques extraits (suivant le processus détaillé sur la figure 4) aux abscisses 66 m (SE66) et 136 m (SE136). Ce profil de résistivité est représenté en blocs correspondant au maillage géométrique utilisés lors de l'inversion. Les sondages sont représentés suivant le graphique bilogarithmique classique.

FIG. 8. – Interpretation of LA electrical resistivity profile carried out with wenner- α (4 m) array, and electrical soundings extracted (following the process described in figure 4) from 66 m (SE66) and 136 m (SE136) coordinates. This profile is shown with block corresponding to the geometric mesh used during the inversion. These electrical soundings are shown following the classical bilogarithmic graph.

La « remontée » de terrains conducteurs vers l'abscisse 66 m sur le profil LA (sondage électrique SE66 extrait) correspond à une zone particulière des remblais reconnue par les forages : les scories et remblais grossiers y font complètement défaut ; les remblais sont presque exclusivement constitués de gypse rapporté, accompagné de teneurs importantes en sulfates de zinc et de plomb [Thiry *et al.*, 2001]. Cette zone a de toute évidence été aménagée spécialement pour supporter certaines installations de l'usine d'acide sulfurique.

L'interprétation des anomalies superficielles est rendue délicate par le fait que l'on peut soupçonner des effets 3D. L'anomalie conductrice à proximité de l'abscisse 190 m sur le profil LA, peut correspondre à une zone d'infiltration privilégiée. Les anomalies résistantes au nord-ouest du profil LA peuvent correspondre aux vestiges des anciennes constructions (dalle de béton...) des différentes usines détruites depuis sans avoir gardé de plan précis des installations.

CONCLUSION

Les résultats des premières expérimentations entreprises sur le site de Mortagne-du-Nord mettent en évidence l'inté-

rêt des méthodes géophysiques pour appréhender les variations spatiales d'un milieu aussi hétérogène et complexe que celui d'une friche industrielle. Une des difficultés de l'interprétation des données géophysiques obtenues sur ce site réside dans le caractère diffus des différentes structures mises en évidence. Néanmoins, la cartographie slingram permet de déterminer des anomalies conductrices coïncidant avec des anomalies chimiques obtenues dans les piézomètres, et indique des lieux de sortie de l'eau vers les drains fluviaux. Les panneaux électriques quant à eux, permettent d'indiquer avec précision la position des alluvions argileuses, et de décrire des zones d'infiltration superficielle. La méthodologie établie dans le cadre de ce projet sera susceptible d'être appliquée non seulement aux anciens sites industriels mais aussi aux sites miniers et à leurs déblais.

Remerciements. – Cette étude est financée par l'ADEME, *i.e.* Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (convention entre fin 2000 et fin 2002) et par le PNRH, *i.e.* Programme National de Recherche en Hydrologie (en 1999 et 2000) du CNRS. Les auteurs remercient N. Bouzid pour sa contribution à l'acquisition des données de terrain.

Références

- BERNSTONE Ch. & DAHLIN T. (1997). – DC resistivity mapping of old landfills : two case studies. – *Europ. J. Environ. Engin. Geophys.*, **2**, 2, 121-136.
- BUSELLI G. & LU K. (2000). – Detection of groundwater contamination with induced polarisation and resistivity methods using a 64-channel receiver. – *62nd EAGE Conference Proceedings, paper D-07*, Glasgow, may 2000.
- CHAMBERS J., OGILVY R., MELDRUM P. & NISSEN J. (1999). – 3D resistivity imaging of buried oil- and tar-contaminated waste deposits. – *European J. Environ. Engin. Geophys.*, **4**, 1, 3-14.
- HALLOF P.G. (1957). – On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. – Ph.D thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- HUET-TAILLANTER S., SCHMITT J.M. & THIRY M. (2001). – Altération oxydante des scories de la friche de Mortagne-du-Nord : hydrochimie, modélisation géochimique et essais de lixiviation. *In* : J.M. SCHMITT, M. THIRY & F. VAN OORT (ed.), Mémoires des Sciences de la Terre de l'Ecole des Mines, Industrie Minérale et Environnement (aspects géochimiques, hydrogéochimiques, biogéochimiques), **40**. – Ecole des Mines, Paris, 97-100.
- LOKE M.H. & BARKER R.D. (1996). – Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. – *Geophys. Prosp.*, **44**, 2, 131-152.
- McNEILL J.D. (1980a). – Electrical conductivity of soil and rocks. – Technical note TN-5, Geonics Limited, 22 p.
- McNEILL J.D. (1980b). – Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. – Technical Note TN-6, Geonics Limited, 15 p.
- PANISSOD C., POIGNARD S., AIT-SAAD L. & DIDIER G. (2000). – Electric and electrostatic surveys on a municipal solid waste landfill capping system. – *Proc. 6th Environ. Engin. Geophys. Soc. – European Section Annual Meeting*, Bochum, Germany, 3-7 september.
- SCHMITT J.-M., HUET-TAILLANTER S. & THIRY M. (2002). – La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) – II – Altération oxydante des scories, hydrochimie, modélisation géochimique, essais de lixiviation et proposition de remédiation. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **173**, 4, 383-393.
- THIRY M., HUET-TAILLANTER S. & SCHMITT J.M. (2001). – La friche industrielle de Mortagne-du-Nord : de la reconnaissance à la remédiation. – *In* : J.M. SCHMITT, M. THIRY & F. VAN OORT (ed.), Mémoires des Sciences de la Terre de l'Ecole des Mines, Industrie Minérale et Environnement (aspects géochimiques, hydrogéochimiques, biogéochimiques), **40**. – Ecole des Mines, Paris, 149-152.
- THIRY M., HUET-TAILLANTER S. & SCHMITT J.M. (2002). – La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) – I – Prospection du site, composition des scories, hydrochimie, hydrologie et estimation des flux. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **173**, 4, 369-381.

