

GÉOFOCAN

Colloque

Géophysique
des sols
et des
formations
superficielles



Abstracts
et
Résumés
étendus

11-12 septembre 1997

Bondy

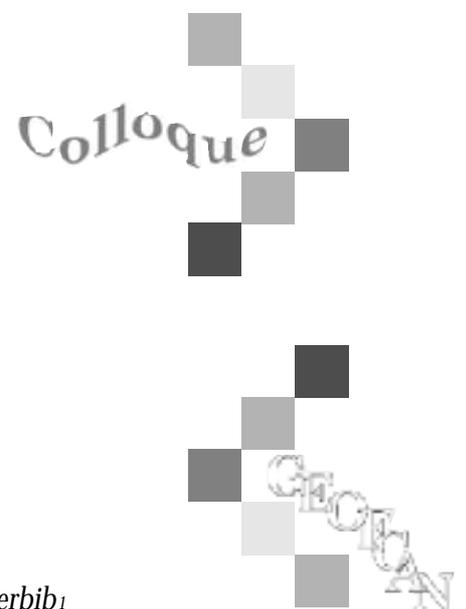


**Abstracts
et
Résumés
étendus**

***G*éophysique des sols
et des
formations superficielles**

Organisé par Yves Albouy¹, Jean-Pierre Montoroi¹, Alain Tabbagh², Nicole Zerbib¹

¹ ORSTOM - ² UPMC



Comité scientifique

P. ANDRIEUX

UPMC - Université Pierre et Marie Curie ◆ CGG - Compagnie Générale de Géophysique

A. BEAUCE

BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières

J-C. BÉGON

INRA - Institut National de la Recherche Agronomique

J-L. FAVRE

ECP - Ecole Centrale de Paris

A. GUILHEM

BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières

A. HESSE

CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique

P-Y. HICHER

ECN - Ecole Centrale de Nantes

R. LAGABRIELLE

LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

G. de MARSILY

UPMC - Université Pierre et Marie Curie

J-P. MULLER

ORSTOM - Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

G. PEDRO

INRA - Institut National de la Recherche Agronomique

M. RIEU

ORSTOM - Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération





Avant propos



L'objectif du réseau GEOFCAN est de développer et de mettre en oeuvre l'outil Géophysique pour l'Etude structurale de l'Organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisées et Naturelles. Ce réseau a été mis en place en 1994 par la signature d'un protocole d'accord entre quatre établissements, le BRGM, l'INRA, l'ORSTOM et l'UPMC. Il avait reçu l'année précédente l'approbation du Comité National du CNRS (sections 12 et 31) auquel il avait été présenté sous forme d'un GDR (Groupement de Recherche).

Il est normal que les équipes impliquées dans le réseau rendent compte de leurs travaux après plus de deux ans d'activité, mais il est bon que ce soit dans le cadre d'un colloque ouvert à tous ceux, pédologues, hydrogéologues, mécaniciens des sols, que la géophysique du proche sous-sol intéresse en tant qu'outil de reconnaissance du milieu, de description de sa structure ou de suivi de son fonctionnement. L'objet de ce colloque est donc très ouvert, aussi bien aux différentes méthodes qui constituent l'outil géophysique, qu'aux différentes thématiques et aux interventions des différents acteurs du secteur public comme du secteur privé, y compris les fournisseurs d'instruments d'exploration du sous-sol auxquels l'ORSTOM a bien voulu permettre de présenter leur matériel.

S'il faut dégager les idées force à l'origine de l'emploi de l'outil géophysique pour le proche sous-sol on retiendra les suivantes. Il est d'abord souhaitable de pouvoir réaliser une investigation non destructive sur toute l'épaisseur que l'on souhaite reconnaître ; toute excavation en effet modifie le milieu, sa structure à l'emplacement du trou et son fonctionnement sur un volume qui peut être beaucoup plus important. Il est nécessaire aussi de disposer d'une information bien échantillonnée, au sens de la théorie de l'information, ce qui signifie pratiquement que les mesures doivent être suffisamment serrées pour que la description du milieu soit complète, sans laisser d'espace non reconnu ; cet objectif est impossible à réaliser par des excavations puisque cela reviendrait à détruire complètement l'objet même de l'étude. Il est aussi très souhaitable d'aller vite, tant pour réduire les coûts que pour garder identiques les conditions d'acquisition des mesures.

Tout ceci a conduit à rechercher parmi les propriétés physiques des sols et des roches celles qui pouvaient donner lieu à des mesures fiables, faciles à exécuter avec un appareillage léger et d'un faible coût, et répétables sans altération du milieu. Ces propriétés doivent aussi présenter une dynamique de variation étendue et une bonne corrélation avec les variations des paramètres couramment utilisés pour décrire le sous-sol : granularité, porosité, teneur en eau, perméabilité hydraulique... Le choix de l'outil géophysique et son utilisation n'excluent pas les prélèvements et les observations directes, mais elles en limitent le nombre (et donc le coût) et surtout elles en augmentent significativement la pertinence.

Le développement et l'automatisation de techniques "de suivi", à côté des techniques d'exploration, permet d'obtenir une continuité dans l'analyse des variations temporelles des phénomènes et débouche sur une reconnaissance "4D" du milieu étudié.

Les travaux présentés dans ce volume sont à la fois l'illustration de notre démarche et le compte-rendu d'une première étape. Puisse le lecteur y trouver de l'intérêt et le goût d'y participer pour en augmenter encore la qualité et la portée.

Alain Tabbagh
Président du colloque GEOFCAN

Thème 1 - Reconnaissance structurale des milieux peu anthropisés **11**

- 13 Contribution à l'étude des aquifères par audio-magnétotellurique à source contrôlée (C.S.A.M.T.). Zone de Beaux Songes (Ile Maurice)
Y.Albouy, J.L.Join, M. Ritz, B.Robineau, M.Courteaud, D.Groom, L.Giorgi
- 17 Interprétation pédologique de données électromagnétiques et électriques. Application au bassin versant d'El Gouazine (Tunisie centrale)
G.Bellier, N.Gaaloul, J.O.Job, J.P.Montoroj, P.Zante
- 23 Utilisation de la prospection géophysique par résistivité pour l'étude de la variabilité spatiale du sol et des matériaux géologiques d'un site de Petite Beauce
H.Bourennane, D.King, M.Isambert, R.Le Parco
- 29 Etude d'aquifères peu profonds à l'aide de sondages électriques et électromagnétiques
A.Bouvier, P.Croisy, P.Andrieux
- 33 Apport des imageries électriques et radar à la reconnaissance des couvertures d'altération, bassin versant de Nsimi (Cameroun)
M.Descloîtres, H.Robain, M.Dabas, C.Camerlynck, Y.Albouy
- 39 Analyse d'une couverture de sol développée sur formations deltaïques à l'aide du dispositif multi-électrodes MU.C.E.P.
O.Duval, C.Panissod, M.Dabas, B.Remy, S.Lochon, A.Bruand
- 45 Première application de la thermographie infrarouge à l'analyse des hétérogénéités et du fonctionnement d'une zone humide
R.Guérin, C.Pinot, H.Bendjoudi, M.Dabas
- 49 Etude du site d'El Gouazine (Tunisie centrale) par méthodes EM31 et EM38
O.Martiré, Y.Albouy
- 53 Cartographie géophysique des sols et des formations superficielles.
Cas du "grison" en forêt de Fréteval (Loir et Cher)
D.Michot, C.Panissod, A.Dorigny, H.Bourennane, B.Renaux, A.Couturier, M.Isambert, D.King, A.Tabbagh

- 59 Méthode électrique 2D appliquée à la recherche des aquifères du granite de Saraya (Sénégal)
M.F.K.Niang, S.Diouf
- 65 Réinterprétation par inversion bayésienne des sondages électriques sur le lac Tritrivakely (Madagascar)
H.Rakoto, F.Ranaivo-Nomenjanahary, JB.Ratsimbazafy, Y.Albouy, J.J.Schott, M.Menvielle
- 71 Reconnaissance hydrogéologique par méthodes électrique et électromagnétique dans la région du Lac Ihotry, sud-ouest de Madagascar
E.Rasolomanana, Y.Albouy, M.Ritz, L.Robison, L.Ferry, J.Ralaimaro

Thème 2 - Reconnaissance des structures anthropiques **(sites urbains, industriels...)**

79

- 81 Exemples d'utilisation des ondes de surface pour la reconnaissance d'objets du génie civil
O.Abraham, D.Blanchard, G.Hévin
- 87 Prospection électrique pour l'étude de glissement de terrain dans la région volcanique du Pichincha (Equateur)
M.H.Ardisson, Y.Albouy, V.Risser, Xu Shi Zhe
- 91 Recherche de potentiels sableux en milieu alluvionnaire remanié. Prospection électromagnétique de sub-surface EM31
V.Borne, T.Marguet
- 97 La prospection géophysique : une aide à l'interprétation stratigraphique des "Terres Noires" archéologiques
C.Féchant, C.David, C.Benech
- 101 Les diagraphies nucléaires appliquées au génie civil
V.Ferber
- 107 Apports de la modélisation dans l'interprétation des signatures radar en milieu urbain
G.Grandjean, A.Bitri, J.C.Gourry
- 111 De l'intérêt raisonné des investigations sur plusieurs paramètres en prospection archéologique
A.Hesse

Thème 3 - Suivi du fonctionnement et du comportement
(pollution, risque...)

117

- 119 Apport des méthodes géophysiques à l'étude des bilans hydrique et salin d'une oasis du sud tunisien
B.Askri
- 121 Application de la mesure des potentiels électriques de polarisation spontanée (PS) à la reconnaissance des formations superficielles
M.Aubert
- 127 Chutes de pluie et résistivité du sol
Y.Benderitter, J.J.Schott
- 133 Le contact eau douce-eau de mer entre Dakar et Saint-Louis (Sénégal). Une étude géoélectrique
S.Diouf, R.Gomis, J.Tchani
- 139 Cartographie prédictive des propriétés mécaniques des altérites par mesure de la résistivité électrique en continu
J.C.Gourry, R.Wyns, F.Lebert
- 143 Détermination précise de la salinité des sols par conductivimétrie électromagnétique
J.O.Job, J.L.Gonzales Barrios, M.Rivera Gonzales
- 147 Analyse des relations entre les constituants des sols, la dynamique de la surface et les réflectances simulées ou mesurées par télédétection satellitaire. Exemple de la vallée du fleuve Sénégal
L.Mane, P.Boivin, J.F.Richard, C.Hammecker
- 153 Détermination de la relation résistivité électrique-teneur en eau au laboratoire. Application aux sols de Tunisie centrale
J.P.Montoroi, G.Bellier, J.Larvy Delarivière
- 161 Analyse bayésienne par chaîne de Markov de cartographie pôle-pôle. Aspects théoriques et exemples d'application
J.J.Schott, M.Schmutz, E.Frugier, V.Girard
- 167 Contribution de la méthode radiomagnétotellurique à la délimitation des structures hydrogéologiques en milieu hétérogène de subsurface
P.Turberg, I.Müller
- 173 Apport de la méthode électrique pour la reconnaissance hydrogéologique et l'étude des variabilités superficielles en zone sédimentaire subsaharienne
A.Zanolin, J.Tchani, L.Barbiero, P.Boivin, M.Descloîtres

179

***Deuxième
partie***

Les exposants

- 181 Abem France
- 185 EuroCim
- 189 Géotrade
- 195 Iris Instruments
- 199 Matériel de sondage (M.D.S.)

201

***Index
des auteurs***

P première partie

A decorative graphic consisting of a series of colored squares arranged in a staircase pattern. The squares are colored in shades of pink, green, blue, and maroon, and are positioned to the right of the text.



*Reconnaissance structurale des milieux
peu anthropisés*

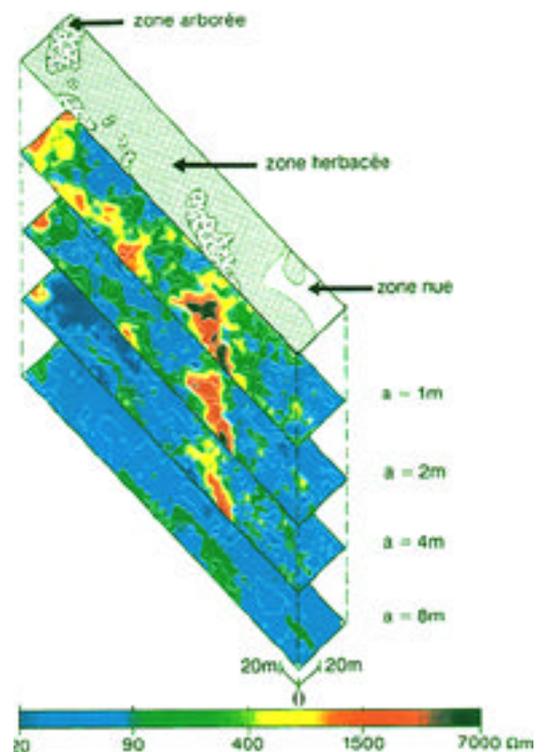


Photo de Mathieu Lamotte

Cartes de résistivité électrique apparente des sols sableux à forte cohésion ("hardé") à Lagadgé (Nord-Cameroun)

C

ontribution à l'étude des aquifères par audio-magnétotellurique à source contrôlée (C.S.A.M.T.). Zone de Beaux Songes (Ile Maurice)

**Yves Albouy¹, Jean-Lambert Join², Michel Ritz³, Bernard Robineau²,
Michel Courteaud², Doug Groom⁴, Loïc Giorgi⁵**

¹ ORSTOM, Laboratoire de Géodynamique Interne, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

² Université de La Réunion, Département des Sciences de la Terre, 97490 Sainte-Clotilde, France

³ ORSTOM, Laboratoire de Géophysique, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

⁴ Geometrics, 395 Java Drive, Sunnyvale, Ca 94089, USA

⁵ Water Ressources Unit, Royal Commercial Centre, Rose Hill, Mauritius

Abstract

A.C.S.A.M.T measurements campaign has been carried out on Beaux Songes site with a new equipment Stratagem (Geometrics). The controlled source is an antenna that sends radio frequencies signals in the range of 1 kHz to 70 kHz, from a distance of the MT recording station far enough to valid the far field approximation. Quick 2D interpretations are directly available on the field. 44 stations have been set up to cover the 10 km² area. An inversion method of the results provides the topography of conductive substratum.

Appareillage

Habituellement, la C.S.A.M.T. emploie comme source un dipôle électrique de plusieurs centaines de mètres ou de quelques km, alimenté par un générateur de fréquence de quelques kiloWatts ou quelques dizaines de kW. La méthode est efficace mais lourde à mettre en oeuvre. Depuis 2 ans, les firmes E.M.I. et Geometrics se sont associées pour produire le Stratagem, appareil d'audio M.T. classique, auquel est jointe une antenne qui émet un signal radio, sur 14 fréquences régulièrement réparties dans la gamme 1 kHz - 70 kHz, dans deux dipôles magnétiques verticaux perpendiculaires permettant l'utilisation de l'appareillage A.M.T. en mode tensoriel.

Il existe deux versions d'antenne, qui se différencient par leur puissance d'émission : le moment de la première est de 400 A-m² et celui de la seconde est de 6 000 A-m². La mise en place de la petite antenne est particulièrement rapide : un seul opérateur la monte en moins de 10 minutes et une batterie de 12 V - 60 Ah suffit pour l'alimenter. C'est dire l'avantage par rapport à la C.S.A.M.T. traditionnelle.

On admet généralement que l'approximation onde plane ou champ lointain est réalisée à mieux que 5% pour des rapports distance émetteur-récepteur et profondeur de pénétration égaux ou supérieurs à 5. La profondeur de pénétration P d'une onde de fréquence f dépend de la résistivité du terrain :

$$P = 500 (\rho / f)^{1/2} \text{ avec } \rho \text{ en Ohm.m, } f \text{ en Hz et } P \text{ en m.}$$

Pour un terrain de 10 Ohm.m et une fréquence de 1 000 Hz, la profondeur P est de 50 m et la distance minimale entre l'antenne et la station est de 250 m, distance tout à fait convenable pour la puissance de la petite antenne. Si le terrain atteint 1 000 Ohm.m, la profondeur d'investigation P devient 0,5 km pour 1 000 Hz et la distance minimale est de 2,5 km, distance bien trop grande pour la petite antenne. L'utilisateur doit alors recourir à la grande antenne. En pratique, le signal est souvent insuffisant pour des distances supérieures à 1 km ou 1,5 km. Suivant le bruit électromagnétique du terrain, quelques fréquences de l'émetteur ne pourront plus être considérées comme ondes planes. Pour les interpréter, il faudrait recourir à la modélisation en "champ proche", difficile à réaliser en même temps que l'interprétation A.M.T. classique. L'utilisateur se souviendra que le champ proche tend à abaisser la résistivité apparente et à augmenter la phase, tout comme en Slingram où champs primaires et champs secondaires sont déphasés de 90°.

Un autre avantage du Stratagem est la possibilité de modéliser rapidement les données sur le terrain, soit en 1D, soit en 2D. En effet, le programme visualise les données acquises sous forme de courbes de résistivité apparente, de phase et de cohérence. Il donne immédiatement une inversion 1D (**figure 1**). Si l'on a mesuré une série de stations sur un profil, la dernière électrode de l'une des stations étant la première de la suivante, le programme permet d'obtenir une inversion pseudo 2D suivant les principes du filtrage spatial énoncés par Torres-Verdin et Bostick (1992), qui s'appliquent soit au relief soit aux structures 2D proches de la surface (**figure 2**).

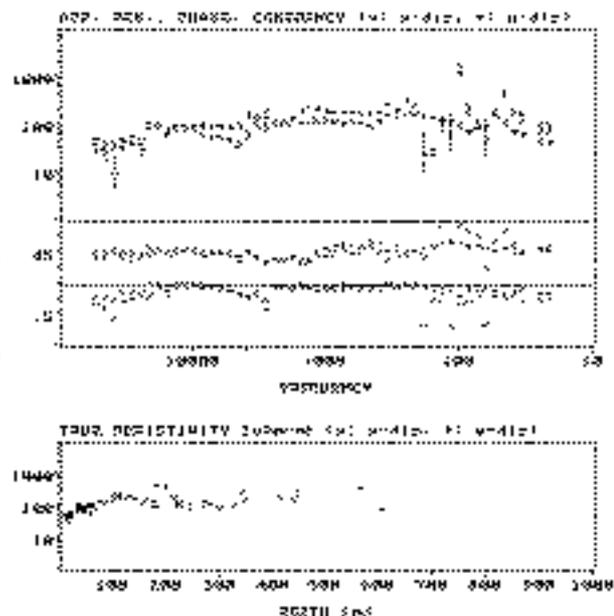


Figure 1 - Données d'une station C.S.A.M.T.

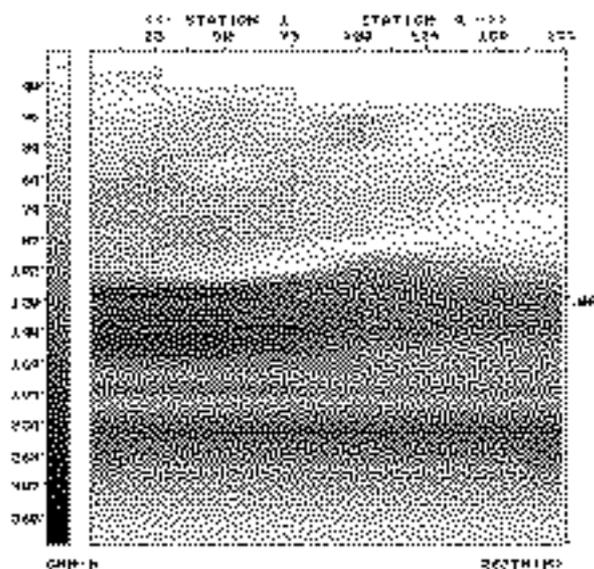


Figure 2 - Modélisation pseudo 2D d'un profil de 4 stations

Contexte géologique et géographique de l'île Maurice

L'île Maurice (longitude 57°35' S latitude 20°15' E), d'origine entièrement volcanique, est située dans l'océan indien, au nord-ouest de Madagascar. Les formations aériennes les plus anciennes sont datées à 8 millions d'années. Aujourd'hui considéré comme éteint, ce volcan a connu deux périodes principales d'activité. Une série ancienne (8 à 5 Ma), constituée par des basaltes alcalins et des trachytes, forme l'essentiel du relief ; plus tard, après une longue période d'érosion (5 à 3,5 Ma), une reprise de l'activité volcanique met en place une série récente (3,5 à 0,2 Ma), constituée de basaltes alcalins dont les coulées comblent en grande partie les principales dépressions, creusées au cours de la période précédente par le jeu simultané de la tectonique et de l'érosion.

Le cadre de l'étude

Le site de Beaux Songes correspond à une vallée haute (altitude moyenne de 250 m) à fond plat et à faible déclivité vers l'ouest. La vallée est limitée au nord et au sud par les reliefs du Mont Saint-Pierre et Mont du Rempart, cette morphologie s'ouvre vers l'ouest en même temps que la pente s'accroît sensiblement. La structure, identifiée par photographies aériennes et relevés de terrain, correspond à une paléovallée, d'abord creusée dans les formations anciennes, puis comblée par les coulées volcaniques de la série récente. D'un point de vue hydrogéologique, cette structure constitue un axe majeur pour les écoulements souterrains qui sont guidés par la topographie du substratum ancien faiblement perméable. Ce contexte a été clairement identifié sur le site de Beaux Songes en photographie aérienne et vérifié sur le terrain par des sondages de reconnaissance et des mesures électriques en courant continu. En revanche, la profondeur maximum du creusement dans la série ancienne est inconnue. C'est dans le cadre du projet FAC sur la recherche et la gestion des ressources en eaux souterraines de l'île Maurice qu'a été proposée la mise en oeuvre d'une prospection électromagnétique pour préciser la géométrie du système en profondeur.

Les résultats

Sur ce secteur d'une superficie de 10 km², ont été réalisés 44 sondages CSAMT répartis aussi régulière-

ment que possible. Les données ont été interprétées par modélisation inverse (**figure 3**) et rassemblées pour décrire la structure géoélectrique. Ainsi, la **figure 4** présente la surface topographique du toit de la série ancienne. Ces résultats permettent de visualiser la position de l'axe de cet ancien thalweg et de définir la profondeur de l'interface série ancienne/série récente.

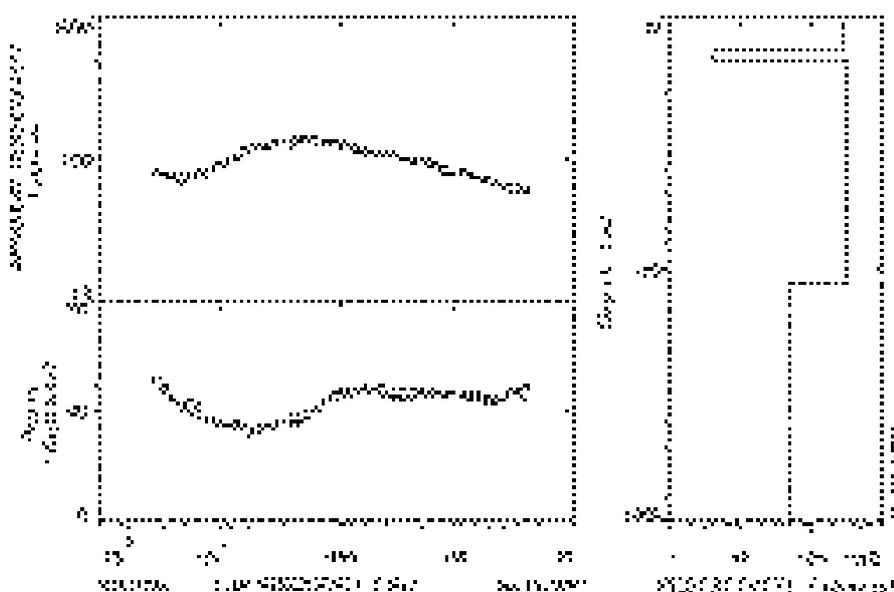


Figure 3 - Modélisation par inversion 1D d'une station

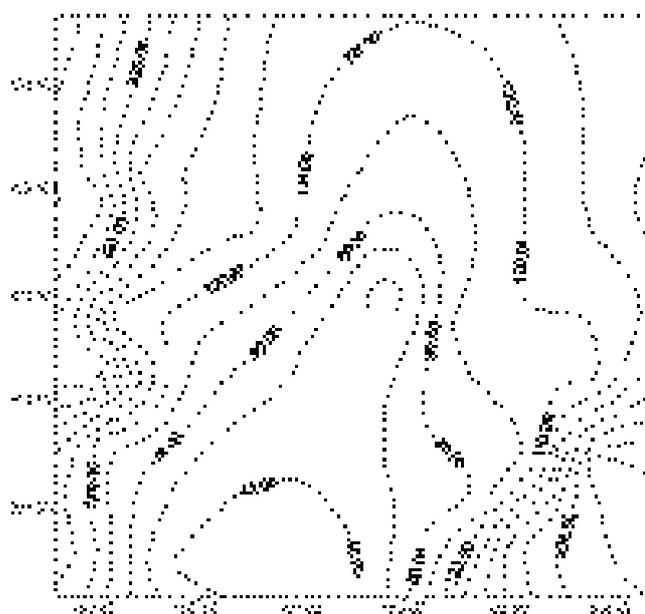


Figure 4 - Surface topographique du substratum conducteur

Bibliographie

Torres-Verdin C., Bostick F.X., 1992. Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics : Electromagnetic Array Profiling (EMAP). *Geophysics*, 57, 603-622.

Interprétation pédologique de données électromagnétiques et électriques. Application au bassin versant d'El Gouazine (Tunisie centrale)

**Gérard Bellier¹, Nouredine Gaaloul², Jean-Olivier Job³,
Jean-Pierre Montoroi¹, Patrick Zante³**

¹ ORSTOM, Laboratoire des Formations Superficielles, 32 Avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

² INRGREF, rue Hédi Karray, B.P. 10, 2080 Ariana, Tunisie

³ CENID RASPA/ORSTOM, Programme de recherche sur la dynamique des sels dans la Comarca Lagunera, A.P. 225-3, Z.I. 35071, Gomez Palacio, Dgo, Mexique

⁴ ORSTOM, 5 impasse Chahrazed, B.P. 434, 1004 El Menzah 4, Tunisie

Abstract

The numerous hill lakes, recently constructed in central Tunisia, have to prevent the risks of soil erosion. The knowledge of soil distribution in the watershed is required to optimize the implementation of anti-erosive devices. Geophysical and pedological prospectings were carried out in the lower part of El Gouazine watershed. Electromagnetic and electrical methods were applied along three toposequences and the variation of resistivities were compared with pedological observations.

In spite of scarce geological information, the geophysical approach complete the pedological observations and precise the limits of four soil types.

Introduction

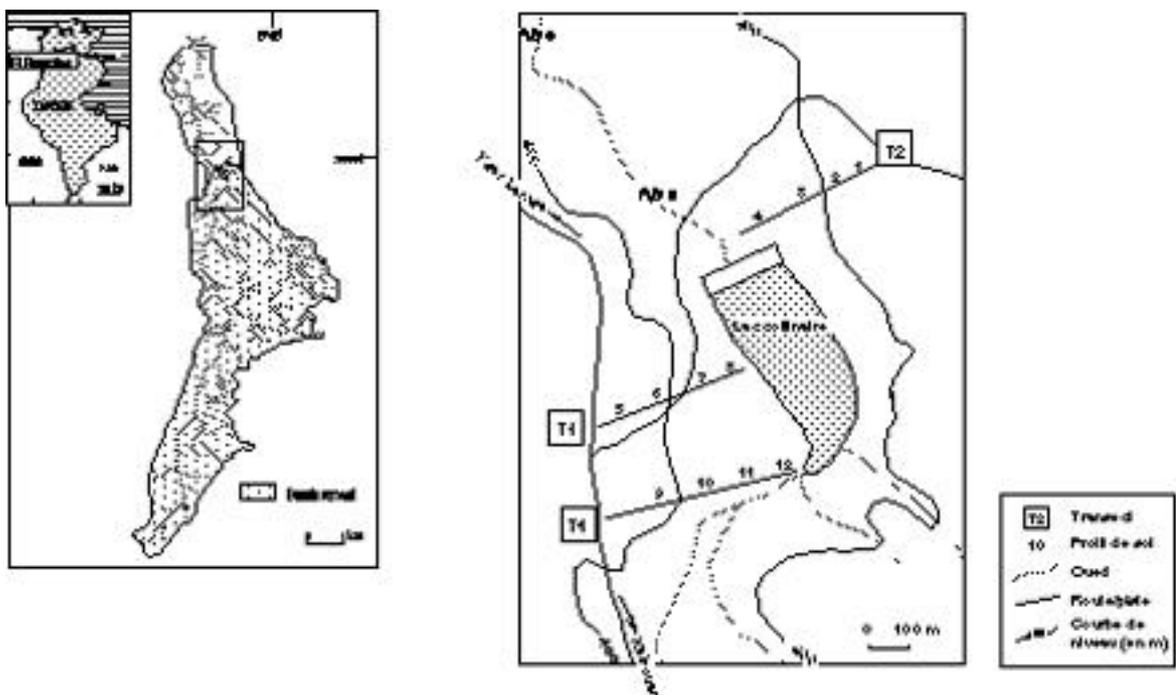
La construction de nombreux lacs collinaires en Tunisie centrale au cours de l'actuelle décennie soulève plusieurs questions pour les sociétés et l'environnement (Talineau et al., 1994 ; Selmi, 1996). L'une d'entre elles concerne les risques d'envasement des retenues. Une réponse pourra être apportée par l'étude du mode d'alimentation en eau et en matières (solides et/ou dissoutes) de ces retenues et, par voie de conséquence, de la structure des formations sédimentaires complexes dans lesquelles cheminent les écoulements.

Les méthodes géophysiques sont utilisées pour l'étude des couvertures pédologiques (Bottraud et al., 1984 ; Hesse et al., 1986 ; Dabas et al. 1989). Elles ont été mises en oeuvre en milieu sahélien (Delaître, 1993 ; Lamotte, 1995 ; Lamotte et al., 1993) et forestier (Robain et al., 1996).

L'objectif de cette communication est de présenter les premiers résultats d'une démarche qui couple une prospection géophysique à des observations pédologiques et qui est testée pour des sols de milieu méditerranéen semi-aride.

Site et méthodes d'étude

L'étude a été effectuée dans la partie aval d'un bassin versant dont l'exutoire est le lac collinaire d'El Gouzine. Le bassin a une superficie d'environ 17 km² et l'altitude est comprise entre 565 m à l'extrême sud et 376 m au niveau de la retenue (**figure 1**). Il se situe sur la bordure est du synclinal d'Ousseltia dont l'axe est orienté sud-ouest nord-est et qui est caractérisé par un substrat marno-calcaire et gréseux (Fournet, 1969). Les mouvements tectoniques ont redressé les couches géologiques sur le versant est du bassin, le pendage étant vertical ou subvertical (Castany, 1951 ; Jauzein, 1967). La partie sud-est du bassin est occupée par les formations éocène qui comprennent une formation à dominante carbonatée de marnes et de calcaire à nummulites (Yprésien ou lutétien inférieur) et une formation à dominante argileu-



se de marnes et de bancs calcaires à huîtres (lumachelles à *Ostrea* du Lutétien supérieur). La partie nord-ouest est formée par la base des formations oligocène dont le faciès détritique est à dominance gréseuse (formation *fortuna*). Comblé au quaternaire, ce synclinal a été entaillé par les oueds formant des colluvions caillouteux.

Dans la zone d'étude, des affleurements de grès et de lumachelles (à huîtres et à gastéropodes) ont été observés en plusieurs endroits.

La *prospection géophysique* s'est déroulée en avril 1995 de part et d'autre de la digue de retenue (**figure 1**), le périmètre d'étude occupant une surface de 1 200 m x 1 200 m, soit 144 ha (Albouy et al., 1995).

Deux méthodes géophysiques ont été utilisées le long de 3 transects nivelés (T1, T2 et T4) :

- la méthode électrique avec un résistivimètre RMCA-4 (Septa),
- la méthode électromagnétique à l'aide des appareils Slingram EM31 et EM38 (Geonics).

Les mesures électriques ont été réalisées à la surface du sol, selon la configuration Wenner, la fréquence du courant d'injection étant de 111 Hz. Ces mesures stationnelles sont réparties le long des transects T1 (ZW01 et ZW02), T2 (ZW04 à ZW10) et T4 (ZW11 à ZW15). Sur chaque site, 14 mesures de résistivité ont été faites, l'écartement inter-électrodes étant de 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,8 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 7 m et 10 m. Pour cette dernière valeur, la profondeur explorée par le courant est d'environ 7,5 m.

Les mesures électromagnétiques ont été effectuées à la surface du sol en mode vertical et en mode horizontal. Pour l'EM31, une mesure supplémentaire a été faite à 1 m de hauteur en mode horizontal.

La *prospection pédologique* s'est déroulée l'année suivante en mars 1996. Sur les 3 transects, 12 fosses pédologiques, dont la profondeur est comprise entre 1 et 1,5 m ont été creusées et décrites. Des échantillons de sol ont été prélevés pour la détermination au laboratoire des caractéristiques physico-chimiques, soit un total de 40 échantillons. Dans plusieurs fosses, des observations par sondage à la tarière ont été également faites jusqu'à 4 m de profondeur.

Dans tous les profils de sol décrits, des mesures électriques ont été réalisées à l'aide d'un quadripôles à faible écartement ($a = 10$ cm). Des échantillons de sol ont été prélevés simultanément pour déterminer leur humidité pondérale.

||| Résultats

Pour chaque station de mesure, les données expérimentales, obtenues par les sondages électriques Wenner, ont été traitées par le logiciel SELPCW qui permet de modéliser la courbe résistivité-profondeur explorée et de distinguer plusieurs couches chacune étant caractérisée par une valeur de résistivité (Albouy et al, 1995).

❖ *Transect T1*

Les résistivités sont comprises entre 20-50 $\Omega \cdot m$ avec l'EM38 et de l'ordre de 10 $\Omega \cdot m$ avec l'EM31 (sols limoneux). La modélisation multicouches montrent que les résistivités décroissent avec la profondeur sur tout le versant : elles sont de l'ordre de 100 $\Omega \cdot m$ pour le premier mètre (état hydrique sec) et inférieures à 5 $\Omega \cdot m$ au delà de 5 m de profondeur.

❖ *Transect T2*

Dans la partie sommitale, on mesure, par la méthode électrique, de fortes résistivités ($>1\ 000 \Omega \cdot m$) pour

les premiers mètres qui correspondent à un encroûtement calcaire. Dans la partie inférieure du transect, les formations du versant sont beaucoup plus conductrices, la résistivité électrique étant d'environ 7-8 $\Omega \cdot m$ avec l'EM31 et l'EM38 ou inférieure à 6 $\Omega \cdot m$ par la modélisation multicouches. Elles sont relatives à des sols bruns calcaires et argileux sur marnes. Les couches supérieures des sols présentent des valeurs de résistivité électrique très élevées car les sols sont très secs. Cependant, le long de la pente et en bas de pente, des colluvions caillouteuses sont également présents et donnent de plus fortes valeurs de résistivité qu'il n'est pas aisé de discriminer. Ces colluvions surmontent un niveau plus argileux et conducteur.

❖ *Transect T4*

L'interprétation du profilage électromagnétique (**figure 2**) montre que les résistivités électriques sont beaucoup plus élevées dans la partie intermédiaire de la séquence (environ 90-100 $\Omega \cdot m$ avec l'EM38 et 30-40 $\Omega \cdot m$ avec l'EM31). Elles correspondent à des sols bruns calcaires développés sur des grès ferrugineux dont on observe en amont de la séquence quelques affleurements subverticaux. En amont et en aval de ces sols, la résistivité électrique diminue : en aval, elle est d'environ 7-8 $\Omega \cdot m$ avec l'EM31 et l'EM38 (sols argileux) tandis qu'en amont elle est de l'ordre de 20-30 $\Omega \cdot m$ avec l'EM38 et légèrement supérieure à 10 $\Omega \cdot m$ avec l'EM31 (sols limoneux). L'épaisseur et la résistivité électrique des différentes couches modélisées sont présentées sur la **figure 3** en prenant en compte la topographie.

Les mesures de résistivité électrique réalisées dans les profils de sol confirment les variations latérales observées à partir de la modélisation multicouches (figure 2). Cependant, elles sont difficilement comparables, en valeur absolue, à celles obtenues l'année précédente car les sols étaient très secs la première année et très très humides la seconde. Elles doivent donc être ramenées à un même état hydrique pour que cette comparaison soit possible (Montoroi et al., 1997).

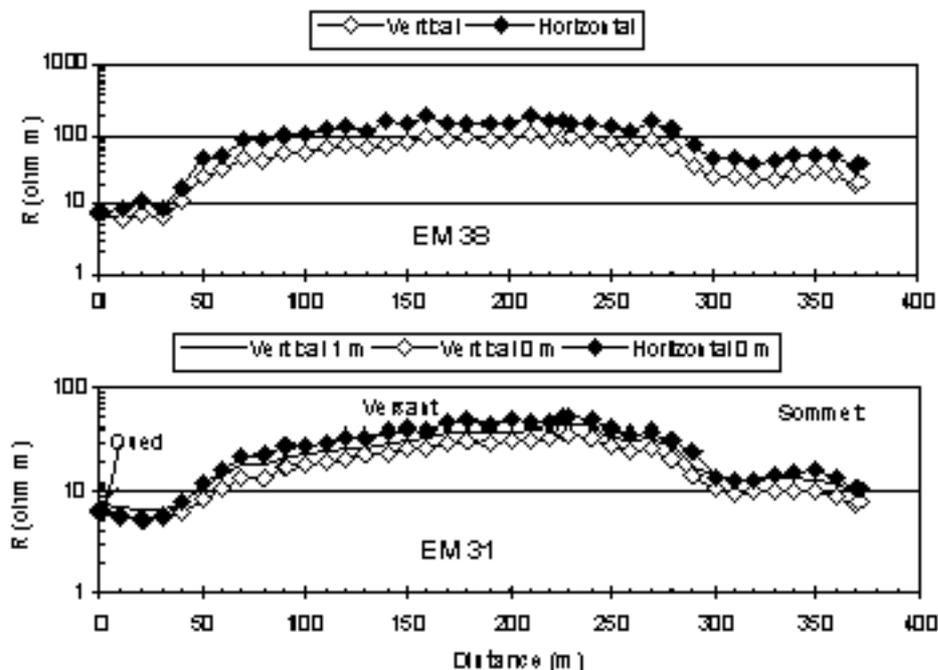


Figure 2 - Mesures de résistivité électrique par conductivimétrie électromagnétique pour le transect T4 du site d'El Gouazine

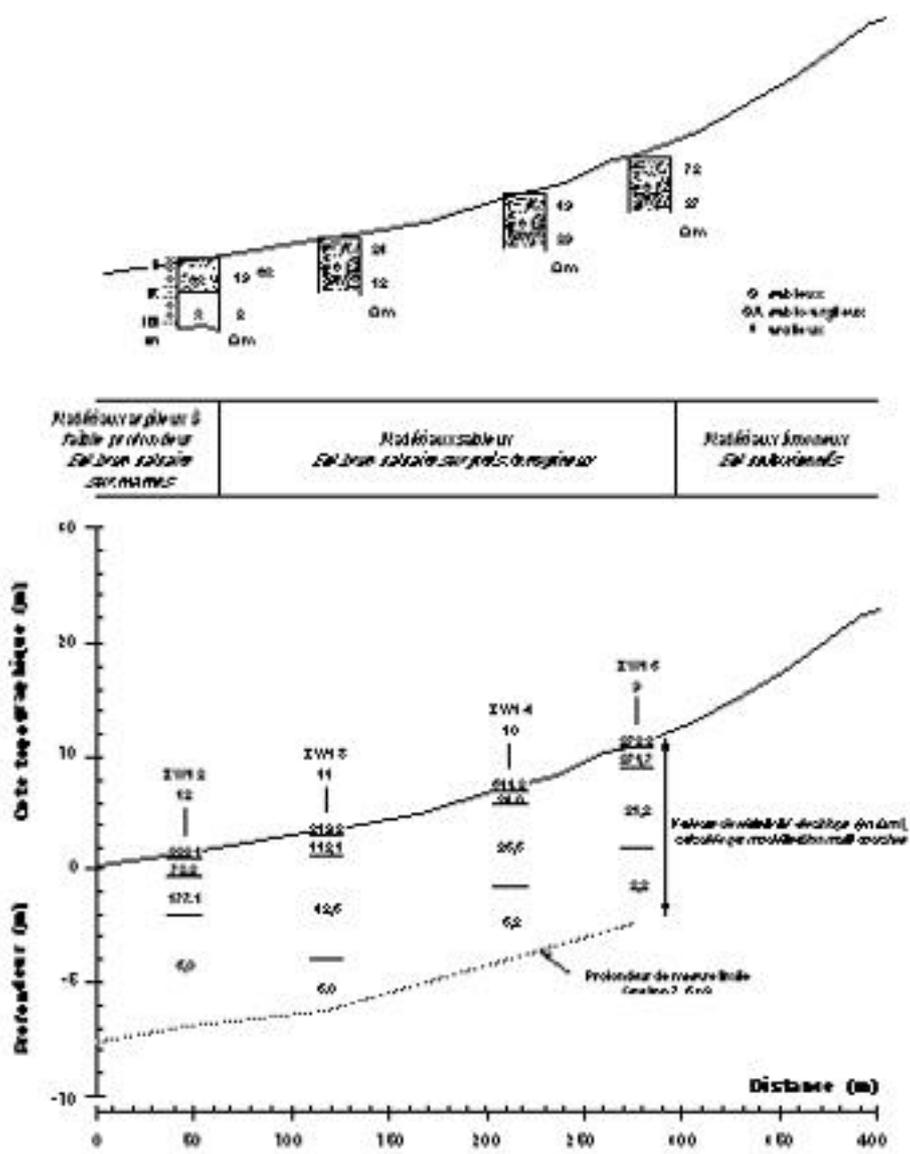


Figure 3 - Caractérisation pédologique et géophysique du transect T4 du site d'El Gouzine

Conclusion

Cette étude pédologique et géophysique a permis de dégager les premiers enseignements concernant l'organisation spatiale des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouzine.

L'étude pédologique met en évidence quatre principaux types de sol : des sols calcaires encroûtés, des sols bruns calcaires argileux à tendance verticale sur marnes, des sols bruns calcaires sableux-argileux sur grès ferrugineux et des sols colluvionnés sablo-limoneux à taches et concrétions calcaires. Ces sols s'organisent et se répartissent selon la topographie et l'orientation des mouvements tectoniques.

Les résultats de la prospection géophysique, réalisée dans un milieu sédimentaire pourtant complexe, sont bien en adéquation avec les principales formations observées. La combinaison des méthodes géophy-

siques stationnelles (méthodes électriques) et mobiles (méthodes électromagnétiques) permet donc de préciser l'extension spatiale des grands types de sol, à la fois latéralement et verticalement.

Les deux approches sont donc complémentaires pour caractériser les sols et les formations superficielles à grande échelle. Ainsi, la connaissance des organisations pédologiques du bassin et l'analyse des processus régissant les transferts d'eau et de matières solides et/ou dissoutes dans le bassin permettront de mieux appréhender le fonctionnement hydrogéochimique du lac collinaire et de mieux gérer l'eau de la retenue selon les besoins des populations rurales.

Bibliographie

Albouy Y., Bellier G., Job J.O., Montoroi J.P., Arfaoui M., Gaaloul N., Gasmi M., Guiguen N., Khalifa F., Lamy V., Larvy Delarivière J., Millot G., 1995. Application des méthodes géophysiques à l'étude des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/CRGR, Bondy, 50 p. et annexes.

Bottraud J.C., Bornand M., Servat E., 1984. Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Sci. Sol*, 4 : 279-294.

Castany G., 1951. Etude géologique de l'Atlas tunisien oriental. Thèse Etat, Besançon, 632 p.

Dabas M., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1989. Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la reconnaissance du sol à grande échelle. *Sci. Sol*, 27 : 65-68.

Delaître E., 1993. Etude des latérites du Sud-Mali par la méthode du sondage électrique. *Trav. et Doc. microfichés*, 134,

Fournet A., 1969. Etude pédologique de la dorsale tunisienne. transversale Kebir-bargou-Serdj-Ousseltia. Mém. DESS, Univ. Paris, multigr., Paris, 121 p. et annexes

Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1986. New projects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological application. *Geophysics*, 51 : 585-594.

Jauzein A., 1967. Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunisienne (Tunisie septentrionale). *Annales Mines et Géologie, Tunis*, 22, 475 p.

Lamotte M., 1995. Les sols sableux à forte cohésion des zones tropicales arides. Etude du *hardé* Lagagdé au Nord-Cameroun. *Trav. et Doc. microfichés*, 134,

Lamotte M., Bruand A., Dabas M., Donfack P., Gabalda G., Hesse A., Humbel F.X., Robain H., 1993. Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord-Cameroun. Apport d'une prospection électrique. *Comptes Rendus Acad. des Sci., Paris, Série II*, 318 : 961-968.

Montoroi J.P., Bellier G., Larvy Delarivière J., 1997. Détermination de la relation résistivité électrique - teneur en eau au laboratoire. Application aux sols de Tunisie centrale. In Y. Albouy, J.P. Montoroi, N. Zerbib, A. Tabbagh : "Colloque Geofcan. Géophysique des formations superficielles et des sols", Orstom, Bondy (le présent document).

Robain H., Descloîtres M., Ritz M., Yene Atangana Q., 1996. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Applied Geophysics*, 34 : 237-253.

Selmi S., 1996. Interventions de l'Etat en milieu rural et réaction des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien. Thèse Doct. ENSA, Montpellier, 400 p.

Talineau J.C., Selmi S., Alaya K., 1994. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Sécheresse*, 4, 5 : 251-256.

Utilisation de la prospection géophysique par résistivité pour l'étude de la variabilité spatiale du sol et des matériaux géologiques d'un site de Petite Beauce

Hocine Bourennane, Dominique King, Michel Isambert, Rémy Le Parco

INRA Orléans, Unité de Science du Sol - SESCPF, 45160 Ardon, France

Abstract

Electrical resistivity was used for the identification of soil and underlying materials on an area in the "Petite Beauce" region. The results show that the method allows to emphasise the calcareous top situated bellow uncemented materials. Thus, it constitutes an efficient tool for survey. However, in this region, a well- adapted equipment is necessary to clearly distinguish the various uncemented materials above the calcareous.

Introduction

Sur un secteur de Petite Beauce, une étude de la relation entre le sol et les matériaux géologiques qui lui sont immédiatement sous-jacents a été réalisée selon une approche multilocale à partir de fosses pédologiques "ponctuelles". Cette étude a permis d'identifier les principaux ensembles constituant les formations superficielles et la couverture pédologique de Petite Beauce. Il s'agit de :

- l'ensemble argilo-limoneux (le sol) ;
- l'ensemble matériaux cryoturbés ;
- l'ensemble calcaires pulvérulents ;
- l'ensemble calcaires durs.

Cette étude ponctuelle n'a cependant pas permis d'avoir une vision continue de la variabilité spatiale des différents matériaux. L'objectif de ce travail est de décrire l'organisation tridimensionnelle du sol et des matériaux géologiques sous-jacents qui constituent généralement le substrat du secteur. Pour cela, nous avons choisi de mesurer la résistivité électrique pour accéder à moindre coût à des informations en profondeur. Le second objectif est de cartographier la profondeur d'apparition du toit calcaire à partir de cette prospection géophysique.

Pour ce faire, deux types de mesures électriques ont été réalisés :

- des mesures électriques ponctuelles, selon un écartement variable des électrodes, afin d'explorer des couches de plus en plus profondes et ainsi d'analyser les discontinuités verticales ;
- des mesures électriques exhaustives et quasi continues par traînées électriques selon un écartement fixe des électrodes (1 m).

L'interprétation de ces traînées électriques est faite sur la base des sondages électriques, réalisés sur la même surface, afin d'aboutir à une cartographie des horizons présents et plus particulièrement de la profondeur d'apparition du toit calcaire.

Présentation du site d'étude

L'étude se situe en "Petite Beauce" au sud-ouest du Bassin de Paris. Il couvre une surface de 20 ha. Le choix de ce site a été guidé par le fait qu'il présente des situations pédologiques et géomorphologiques variées et très représentatives de la région. L'argile limoneuse rencontrée dès la surface recouvre, avec une épaisseur variable, les calcaires durs, les calcaires pulvérulents et les matériaux cryoturbés.

Une zone de 3 500 hectares, englobant le site d'étude, a fait l'objet d'une cartographie à l'échelle du 1/10 000 (Duval et Isambert, 1992), dont l'objectif était de décrire les principaux types de sol ainsi que leur organisation dans le paysage. Il ressort 5 unités cartographiques, dont quatre sont représentées sur le site d'étude. Il s'agit (Baize, 1995 ; Girard et Baize, 1995) :

- des unités de sol relatives à des sols de type néoluvisol qui diffèrent par l'épaisseur et la nature du matériau sous-jacent. Ils se sont développés dans des limons d'épaisseur variant entre 60 et 120 cm ;
- des unités de sol relatives à des sols de type calcisol. Ces sols peuvent reposer sur des calcaires durs, des matériaux cryoturbés peu épais ou des matériaux cryoturbés épais et leur épaisseur varie entre 45 et 65 cm ;
- des unités de sol relatives à des sols de type calcosol, qui diffèrent par la nature du matériau sous-jacent : calcaires durs, calcaires pulvérulents, matériaux cryoturbés sur calcaires

durs et matériaux cryoturbés sur calcaires pulvérulents. L'épaisseur de ces sols varie entre 40 et 75 cm ;

- des unités de sol relatives à des sols du type brun calcaire à brun calcique qui sont généralement très peu épais, situés dans les fonds de vallon, et reposent sur des matériaux calcaires.

Par ailleurs, des formations constituées de produits remaniés, probablement hérités des périodes périglaciaires, sont fréquemment observées, intercalées entre les matériaux limono-argileux et les calcaires de Beauce. Des observations effectuées dans des fosses ont montré que ces formations remaniées sont organisées en poches de cryoturbation. Ces mêmes observations ont montré aussi l'existence d'un encroûtement calcaire discontinu situé entre les matériaux limoneux et les matériaux cryoturbés.

Cette cartographie a mis en évidence que les sols varient essentiellement par l'épaisseur des horizons limono-argileux à argilo-limoneux et, secondairement, par la teneur en éléments grossiers calcaires et par l'intensité de l'effervescence à l'HCl.

||| Méthode d'étude

❖ *Etude de la variabilité verticale des matériaux par sondage électrique*

Les sondages électriques servent à déterminer la succession des différentes couches sur la base des résistivités et des épaisseurs (Dabas *et al.*, 1989). Pour notre étude, douze sondages électriques ont été réalisés, le long d'une toposéquence orientée nord-sud et située à l'est de la parcelle d'étude, en faisant varier l'écartement des électrodes (a) de 10 cm à 10 m. La modélisation des couples de valeurs résistivité apparente (ρ_a)-écartement entre électrodes (a) permet de déterminer la résistivité et l'épaisseur des différentes couches.

❖ *Etude de la variabilité latérale des matériaux par trainé électrique*

Afin d'étudier la variabilité latérale des matériaux, la technique mise en oeuvre est une prospection électrique à l'aide de trainés électriques. Dans ce cas, l'écartement entre les électrodes est fixe et le déplacement du dispositif appelé RATEAU permet d'obtenir un "profil électrique", c'est-à-dire un tracé de la résistivité apparente en fonction de la distance parcourue. Ainsi, avec plusieurs profils électriques, les variations latérales de la structure du terrain sont mises en évidence.

||| Résultats de prospection électrique

❖ *Différenciation des couches par sondage électrique*

Les douze sondages électriques réalisés font apparaître trois matériaux distincts d'un point de vue électrique :

- un premier matériau dont la résistivité varie entre 25 et 35 $\Omega \cdot m$ au sein des douze sondages électriques (résistivité moyenne 28 $\Omega \cdot m$) ;
- un second matériau de 95 $\Omega \cdot m$ de résistivité moyenne, la résistivité au sein de ce matériau pouvant varier de 65 à 125 $\Omega \cdot m$ suivant les sondages ;
- un troisième matériau dont la résistivité varie entre 215 et 390 $\Omega \cdot m$ (résistivité moyenne 300 $\Omega \cdot m$).

Ces trois matériaux apparaissent dans cet ordre de la surface vers la profondeur. Cependant, il faut noter la présence au sein de certains sondages électriques d'une couche peu résistive et assez épaisse, souvent en position intermédiaire par rapport au second et au troisième matériaux cités ci-dessus.

Aux mêmes emplacements que les sondages électriques, douze sondages pédologiques ont été réalisés. L'objectif était d'identifier les matériaux pédologiques situés dans le premier mètre de profondeur et de déterminer leur épaisseur. Ces sondages pédologiques :

- permettent de reconnaître les trois types de matériaux précédemment décrits ;
- montrent que l'épaisseur de l'argile limoneuse varie entre 15 et 60 cm (épaisseur moyenne de 35 cm).

La comparaison des sondages électriques et des sondages pédologiques deux à deux permet de constater une remarquable coïncidence entre les profondeurs d'arrêt sur calcaire dur à la tarière et les profondeurs d'apparition du matériau de résistivité moyenne. Par contre, les sondages électriques ne distinguent qu'un seul matériau peu résistif alors qu'il est aisé de distinguer à la tarière les différents horizons et matériaux sous-jacents. Ainsi, nous pouvons dire que les trois matériaux (argile limoneuse, calcaires pulvérulents et matériaux cryoturbés) apparaissent confondus au sein d'un sondage électrique. Ceci explique aussi le fait de rencontrer des matériaux en profondeur ayant une résistivité électrique semblable à celle de l'argile limoneuse supérieure.

❖ **Cartographie de la profondeur d'apparition du toit calcaire à partir de la prospection par trainé électrique**

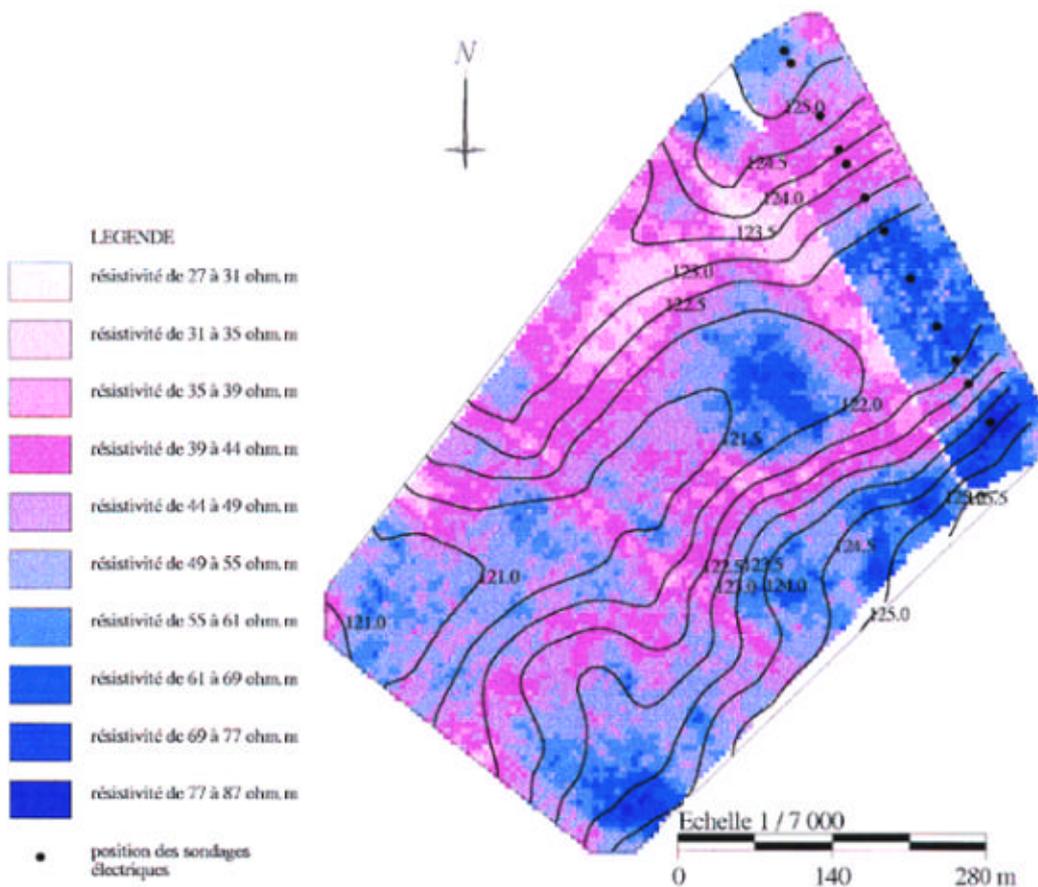


Figure 1 - Carte des résistivités apparentes estimées par krigeage ordinaire

Les sondages électriques exposés précédemment font apparaître jusqu'à quatre couches pour 4 m de profondeur prospectée. Cependant, le signal obtenu sur les profils électriques grâce au RATEAU ne dépasse pas 1 m de prospection en profondeur. Le terrain d'étude peut donc être assimilé à un modèle à deux couches (ou modèle à deux terrains) car les troisième et quatrième couches détectées par sondage électrique n'apparaissent qu'au delà d'une profondeur de 1,5 m. Ainsi, si nous considérons ce modèle de terrain à deux couches, la résistivité apparente () pour le dispositif RATEAU peut être calculée par :

$$\rho_a = \rho_1 \times \left[1 + \frac{4a}{2 - \sqrt{2}} \times \sum_{n=1}^{\infty} C^n \times \frac{1}{\sqrt{a^2 + 4n^2 \times h^2}} - \frac{1}{\sqrt{2a^2 + 4n^2 \times h^2}} \right]$$

avec $C = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

ρ_1 et ρ_2 sont les résistivités respectives des deux couches du modèle de terrain, h l'épaisseur de la première couche et a = 1 m l'écartement entre les électrodes. Connaissant ρ_1 et ρ_2 grâce aux sondages électriques, nous pouvons inverser l'équation ci-dessus et obtenir h à partir de ρ_a .

La prospection par traîné électrique a permis la réalisation de 170 profils électriques. Pour éliminer les très hautes fréquences du signal, tout en conservant les variations rapides pouvant correspondre à des changements dans les matériaux du sol, un filtrage par la médiane (Tabbagh, 1988) est appliqué à l'ensemble des 170 profils.

Pour obtenir une carte des résistivités apparentes (**figure 1**), une analyse variographique puis un krigeage ordinaire aux noeuds d'une grille de 25 m² de résolution ont été réalisés. Les résultats sont cohérents avec ceux obtenus à partir des sondages électriques. Par contre, nous constatons des structures nouvelles, très linéaires d'orientation nord-ouest sud-est. Ces structures correspondent à d'anciennes limites de parcelle où l'argile limoneuse se trouve accumulée.

La connaissance de la résistivité des matériaux grâce aux sondages électriques permet d'exprimer les résistivités apparentes obtenues à l'aide du RATEAU en termes de "profondeur d'apparition du toit calcaire dur" (**figure 2**).

On accède ainsi à la cartographie de l'épaisseur des matériaux meubles. Cependant, nous ne distinguons pas l'argile limoneuse du reste des matériaux meubles, bien que nous sachions que cet horizon est toujours présent dès la surface.

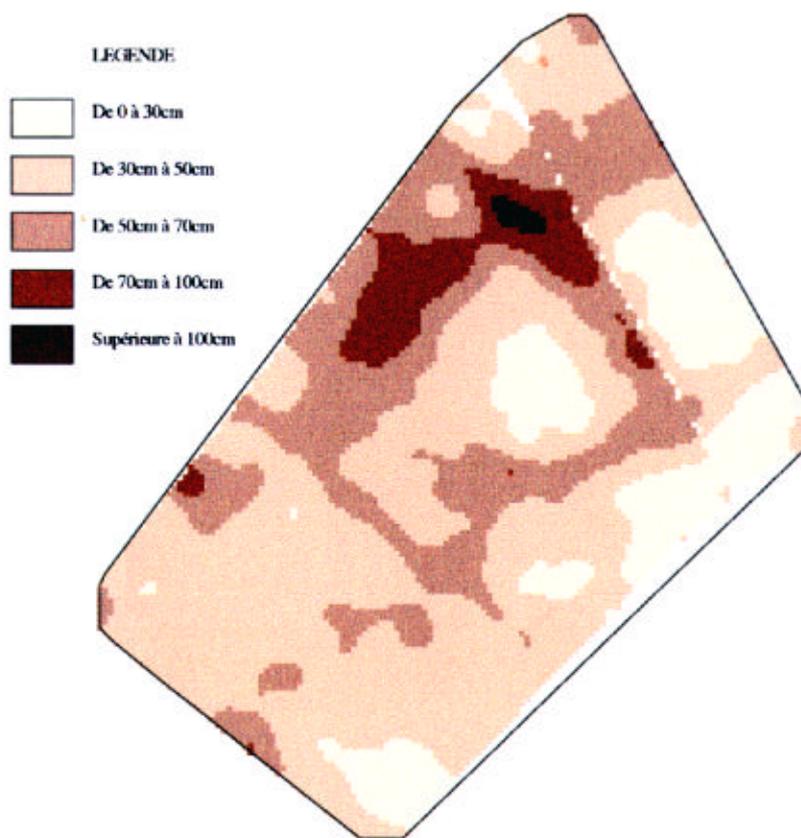


Figure 2 - Carte de la profondeur d'apparition du toit calcaire

Conclusion

L'épaisseur de l'argile limoneuse supérieure risque d'être surestimée par l'approche géophysique dans le contexte de cette étude. Toutefois, il faut signaler que les calcaires pulvérulents, s'ils possèdent de mauvaises qualités agronomiques en raison, notamment, de leur teneur élevée en carbonate de calcium, jouent par contre un rôle important dans la rétention et le transfert d'eau et de soluté. De plus, ils ne constituent pas systématiquement un obstacle aux racines (Nicoullaud et al., 1995). La prospection électrique est donc d'un intérêt premier pour l'évaluation des ressources en eau à l'échelle du parcellaire agricole.

D'un point de vue méthodologique, le profilage électrique a déjà été testé sur un autre secteur en Petite Beauce pour la cartographie des matériaux argilo-sableux (Chéry et al., 1996). L'appareil de mesure de la résistivité électrique par trainé en continu est donc confirmée comme un outil très efficace pour la cartographie des sols à grande échelle. Cependant, un appareillage plus adapté est nécessaire pour pouvoir distinguer les différents matériaux meubles, sus-jacents au calcaire dur en place ou faiblement remanié.

Références

- Baize D., 1995. Brunisols. In : *"Référentiel Pédologique"*. Tech. et Prat., AFES/INRA, Paris, pp. 103-107.
- Chéry P., Dabas M., Bruand A., Voltz M., 1996. Epaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par des méthodes électriques. Etude de cas en Petite Beauce. *Géologues*, 109, 17-23.
- Dabas M., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1989. Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du Sol*, 27, 65-68.
- Duval O., Isambert M., 1992. Etude pédologique du secteur de Villamblain (Beauce). Rapport interne, SESCPF, INRA, Orléans.
- Girard M.C., Baize D., 1995. Solums carbonatés et saturés. In : *"Référentiel Pédologique"*. Tech. et Prat., AFES/INRA, Paris, pp. 109-120.
- Nicoullaud B., Darthout R., Duval O., 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 183-200.
- Tabbagh J., 1988. Traitement des données et élimination des valeurs erronées en prospection électrique en continu. *Revue d'Archéométrie*, 12, 1-9.

*E*tude d'aquifères peu profonds à l'aide de sondages électriques et électromagnétiques

Antoine Bouvier¹, Philippe Croisy², Pierre Andrieux^{1,2}

¹ *Compagnie Générale de Géophysique, 1 rue Léon Migaux, 91341 Massy, France*

² *Université P. et M. Curie, Département de Géophysique Appliquée, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris cedex 05, France*

Abstract

D.C. electrical sounding is known to be the most efficient exploration tool for shallow aquifers in alluvium close to large streams in arid zones. T.D.E.M. sounding has been tested in addition to D.C. for four areas. The aquifers top is located between 5 and 15 m deep. Aquifers are composed with sands that turn locally into sandstones and are interbedded with clay.

D.C. sounding, as expected, shows the best vertical resolution ; it is the only technique that can accurately predict the section to be met when drilling is completed.

T.D.E.M. sounding can be carried out more quickly and inexpensively ; it appears an efficient reconnaissance technique which delivers a reliable general outline of the aquifers.

The most reliable answer is obtained when simultaneous inversion of D.C. and T.D.E.M. soundings is carried out at the same site.

En zones arides, l'étude d'aquifères peu profonds (5-30 m) dans les alluvions récentes et anciennes des grands fleuves et de leurs affluents, est le domaine privilégié des méthodes à courant continu. Il était néanmoins tentant de tester le sondage électromagnétique temporel (T.D.E.M.), en raison de son intérêt logistique, donc de son faible coût.

Quatre exemples récents permettent de comparer les avantages respectifs de ces deux techniques.

Les deux premières études correspondent à des situations géologiques voisines : les sondages sont situés sur des basses terres alluviales ; l'aquifère est constitué de sables des alluvions récentes et anciennes, ces sables étant plus ou moins argileux et présentant quelques passées gréseuses. Les alluvions reposent sur le Continental Terminal, qui comporte également quelques intercalations sableuses à son sommet, avant de devenir franchement argileux. Le niveau piézométrique est situé à des profondeurs comprises entre -5 et -20 m.

Les sondages électriques (S.E.) et électromagnétiques sont généralement effectués le long de profils perpendiculaires au fleuve, à des distances de ce dernier variant de 50 à 300 m. Une grille relativement régulière permet une cartographie de bonne qualité de la géologie et des aquifères potentiels.

Les études ayant un caractère méthodologique, nombre de sondages électriques et électromagnétiques sont superposés ; des sondages étalons sur des forages et des puits ont été également réalisés.

La situation géologique est favorable à l'utilisation des deux techniques. La résolution verticale et le pouvoir discriminant du sondage électrique restent néanmoins supérieurs à ceux du T.D.E.M., comme on s'y attendait, ceci en raison de la faible sensibilité de l'électromagnétisme aux formations résistantes intercalaires fines et de son absence de résolution dans les 10 à 15 premiers mètres et en raison de la taille du dispositif et du délai entre la coupure du courant primaire et la prise du premier échantillon du champ secondaire (6 microsecondes). Si ces deux problèmes étaient résolus, il resterait à prendre en compte les courants de déplacement pour les temps très courts. La comparaison entre les pseudo-sections de résistivité apparente, obtenues avec chacune des techniques, est intéressante et confirme les conclusions énoncées ci-dessus.

L'interprétation quantitative des sondages électriques conduit à des coupes de grande qualité pour l'hydrogéologue malgré une certaine incertitude sur les profondeurs, du fait des problèmes d'équivalence sur les conductances horizontales et les résistances transversales des formations (**figure 1**).

L'interprétation quantitative des sondages électromagnétiques conduit à des coupes moins détaillées que les précédentes. Par contre, la profondeur du toit des formations conductrices est connue avec une meilleure précision.

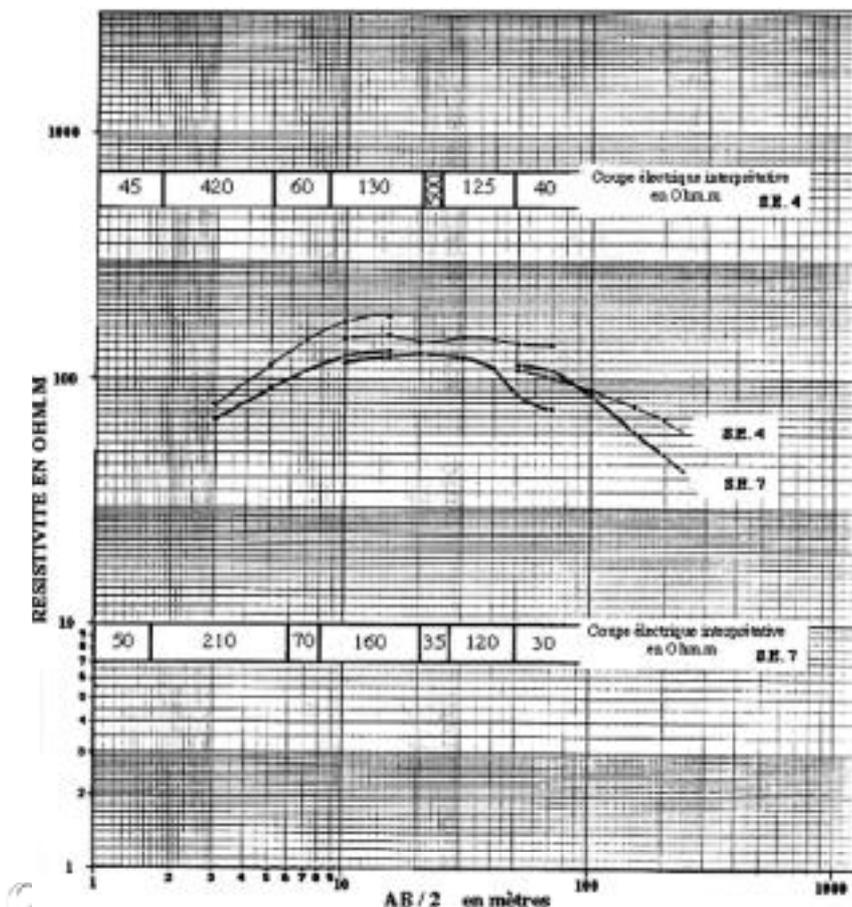


Figure 1 - Deux sondages électriques et leurs coupes interprétatives



Une interprétation quantitative intégrée (S.E.+T.D.E.M.) est idéale.

Pour une profondeur d'investigation de l'ordre de 20 m, une carte de résistivité apparente est tracée à partir des sondages électromagnétiques et fournit une bonne image de la distribution spatiale des alluvions les moins argileuses (figure 2).

C'est en combinant les résultats des deux techniques que les forages de reconnaissance ont été implantés.

La troisième étude est moins favorable aux sondages électromagnétiques car la couche superficielle est de résistivité supérieure à 1 000 Ohm.m. Elle permet de définir la profondeur des argiles conductrices sans véritablement individualiser l'aquifère situé au-dessus.

La quatrième étude est très différente des précédentes car le substratum est résistant. Les deux méthodes sont bien adaptées. Les limites du T.D.E.M., en matière de profondeur d'investigation, sont en revanche bien mises en évidence.

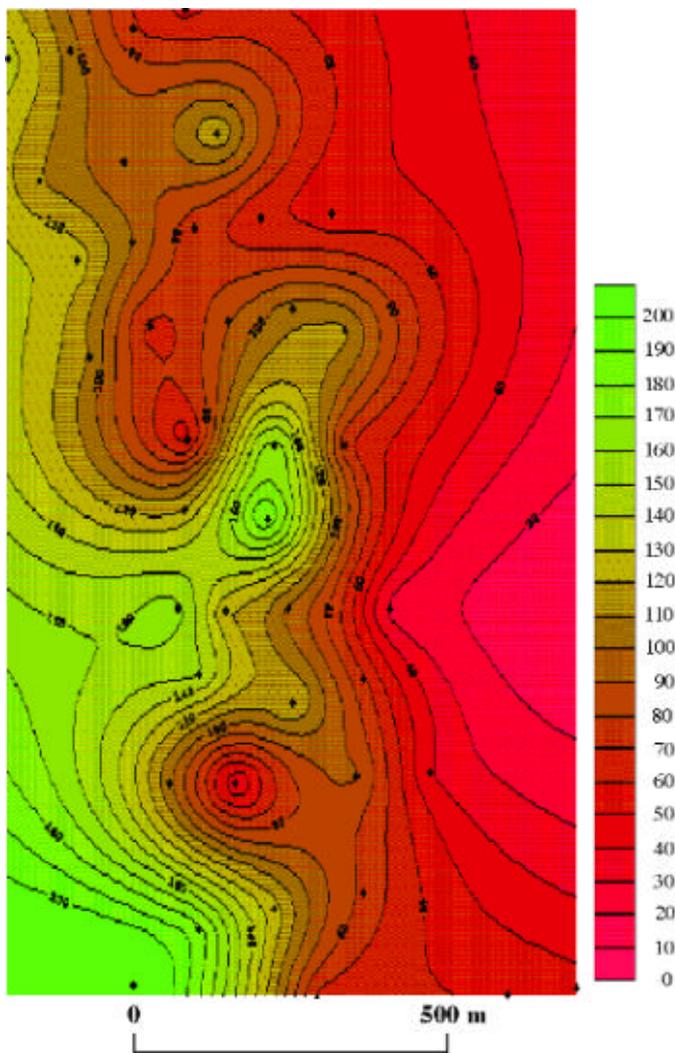


Figure 2 - Carte de résistivité apparente E.M. à la profondeur de 20 m

→ En conclusion

- le sondage électromagnétique dans cette application est une bonne méthode de reconnaissance, car il est intéressant du point de vue logistique et fournit une information générale pertinente pour l'hydrogéologue.
- le sondage électrique reste indispensable pour l'étude quantitative détaillée des sites qui seront retenus pour l'implantation des forages ; l'inversion simultanée des données obtenues avec les deux techniques en une même station conduit à une coupe de fiabilité maximale.

A

pport des imageries électriques et radar à la reconnaissance des couvertures d'altération, bassin versant de Nsimi (Cameroun)

**Marc Descloîtres^{1,2}, Henri Robain¹, Michel Dabas²,
Christian Camerlynck², Yves Albouy¹**

1 ORSTOM, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

2 Université P. et M. Curie, Département de Géophysique Appliquée, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris Cedex 05, France

Abstract

The tropical soils systems cover more than 1/3 of the emerged earth. The knowledge of the shallow structures is crucial for the understanding of global pedological functioning of soils. Multifrequency radar and pole-pole multi-electrode DC resistivity surveys were conducted here along the 950 meters long main traverse of Nsimi watershed to delineate the main pedological horizons. The results of pole-pole survey are interpreted using RES2DINV software, which allows a rapid 2-D inversion. The resulting image shows the main structures from shallow depth to more than 80 meters deep. Features like major fault, bedrock topography or altered zones are clearly defined. In order to image the shallower part of the section, the radar and a more detailed electrical section are presented together and compared to dense pedological observations available on this traverse. In the first ten meters, the main radar reflectors at 25 MHz and iso-resistivity curves correlate themselves. This allows to give precise indications to the pedologist who can locate more accurately observation pits or borehole investigations as well as to give precise geometrical limits to pedo-hydrogeologic models.

Un radar géologique et un système électrique multi-électrodes ont été utilisés sur le même site pour caractériser la géométrie des horizons pédologiques. De la surface vers la profondeur, on rencontre successivement (Robain et al., 1996) :

- les horizons meubles superficiels (200 - 500 Ohm.m) ;
- les horizons ferrugineux : gravillons, cuirasse ou carapace (200 - 4 000 Ohm.m) ;
- le saprolite (argiles, 200 - 600 Ohm.m) ;
- le bedrock granitique (7 000 Ohm.m).

Nous présentons dans cette étude les mesures réalisées sur le layon le mieux reconnu par les investigations hydro-pédologiques (**figure 1**) : 45 trous de tarière, 11 fosses, 1 forage, 14 piézomètres.

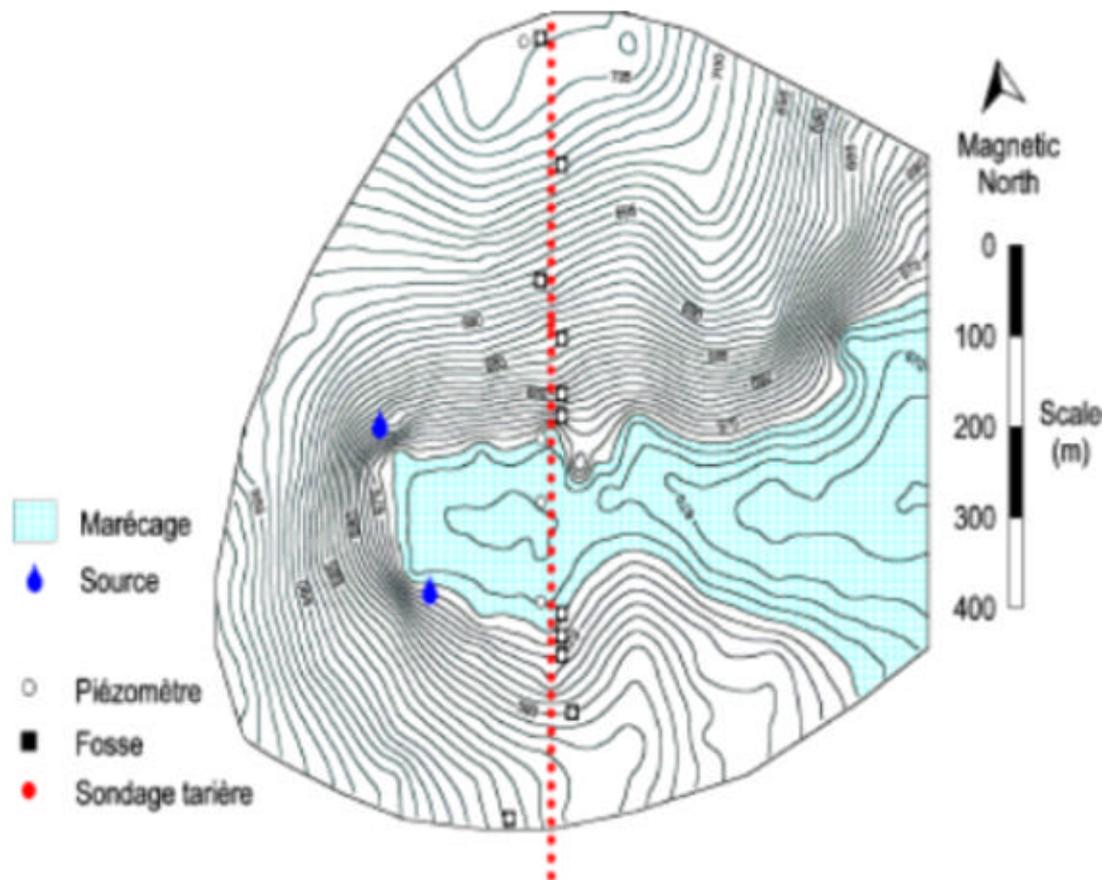


Figure 1 - Site expérimental du bassin versant de Nsimi (Cameroun)

Données expérimentales

❖ *Electrique multi-électrodes*

Les mesures ont été réalisées avec un système Lund à 64 électrodes de la société Abem. Nous avons couvert la totalité du layon de 950 m avec un écartement entre les électrodes égal à 2 ou 4 m et utilisé un dispositif pôle-pôle (N et B à l'infini), l'écartement maximale du dipôle AM valant respectivement 48 ou 96 m. En 10 jours, 5 350 valeurs de résistivité ont été enregistrées, avec une erreur généralement inférieure à 2%, grâce à la qualité des prises de terre.

❖ Radar géologique

Nous avons utilisé le radar Pulse Ekko 100 de Sensors et Software avec quatre antennes de fréquence croissante : 25, 50, 100 et 200 MHz et des pas d'échantillonnage au sol respectifs compatibles de 1, 0,5, 0,2 et 0,2 m. La végétation forestière rend le déploiement des antennes difficile et 10 jours ont été nécessaires pour couvrir la totalité du layon.

||| Résultats et interprétation

❖ Panneau électrique

Pour inverser les données des panneaux électriques, nous utilisons le logiciel RES2DINV (Loke et Barker, 1996). Nous donnons deux exemples de traitement. La **figure 2** présente les résultats de l'inversion pour un écartement entre électrodes de 4 m et donc une profondeur d'investigation de près de 90 m. L'on remarque de prime abord que l'image de la résistivité en fonction de la profondeur ne présente pas des contours bien tranchés : en effet, le procédé d'inversion privilégie les gradients faibles et l'interpolation crée, autour d'un corps de résistivité très contrasté avec celle de son environnement, une sorte de halo de résistivités intermédiaires.

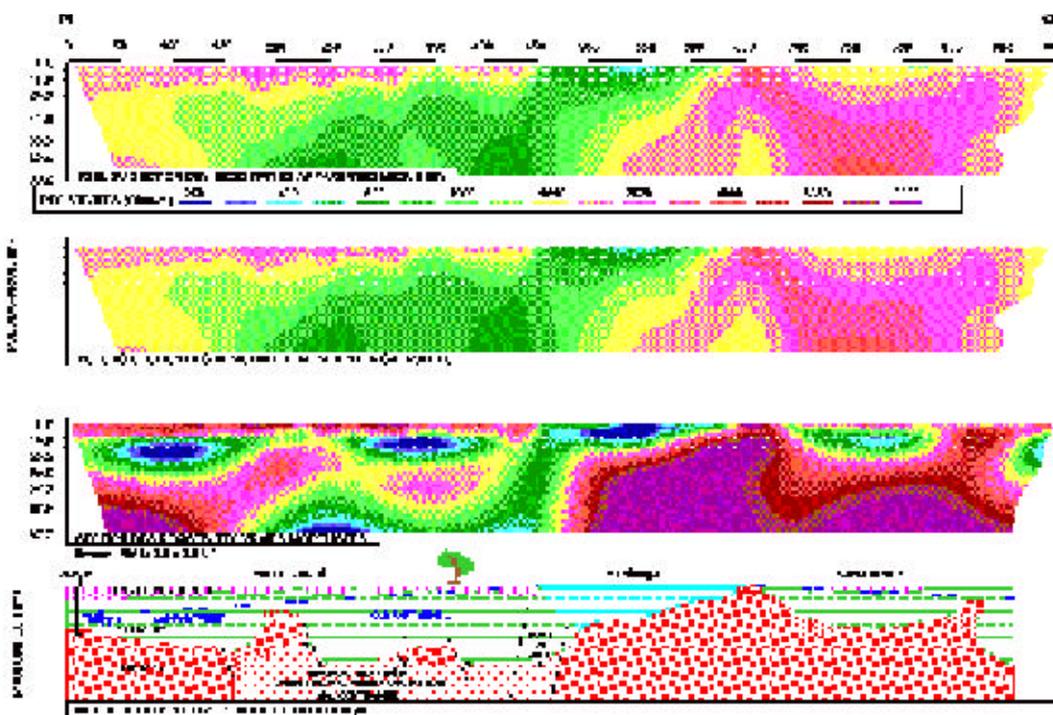


Figure 2 - Interprétation 2D des panneaux électriques (layon 6, pas d'écartement entre électrodes : 4 m)

Les éléments suivants sont néanmoins facilement visibles :

- verticalement, les principaux horizons pédologiques sont bien différenciés :
 - cuirasse, carapace, gravillons 1 000-4 000 Ohm.m ;
 - saprolite 250-1 000 Ohm.m ;
 - bedrock 1 000-8 000 Ohm.m ;
 - en revanche, le niveau phréatique, repéré par les piézomètres, n'est pas mis en évidence.

- latéralement :
 - le toit du bedrock présente des ondulations caractéristiques aux environs de 20-40 mètres de profondeur ;
 - une structure verticale est nettement repérée à l'abscisse 450, cette discontinuité correspondant sans doute à une faille majeure à l'échelle du bassin ;
 - au nord, deux monolithes semblent détachés du bedrock au sein d'une zone d'altération importante ;
 - au sud, les contrastes de résistivité sont mieux marqués : le bedrock semble moins altéré et atteint presque la surface en deux endroits (abscisses 660 et 870), alors qu'on n'observe pas d'affleurement encadrant une zone d'altération ;
 - au nord comme au sud, plusieurs compartiments conducteurs s'individualisent sous les gravillons résistants, à des profondeurs de la dizaine à quelques dizaines de mètres ;
 - le corps conducteur qui serait situé entre les abscisses 200 et 400 est improbable à une profondeur aussi grande ; il s'agit vraisemblablement d'un artefact qui reste à expliquer.

❖ Radar

Le panneau électrique plus superficiel, à pas de 2 m, est interprété en relation avec la coupe radar (**figure 3**). Nous avons choisi de présenter la coupe radar obtenue avec l'antenne de 25 MHz, fréquence qui, malgré son plus faible pouvoir de résolution, possède la plus grande profondeur de pénétration (Davis et Annan, 1989). Sur cette image faiblement traitée (filtrages passe-bas temporel et spatial), des réflexions aériennes, dues à la canopée, gênent l'interprétation profonde. La vitesse moyenne, obtenue par analyse de vitesse (Common Mean Point), permet une correspondance entre les temps de propagation et les profondeurs.

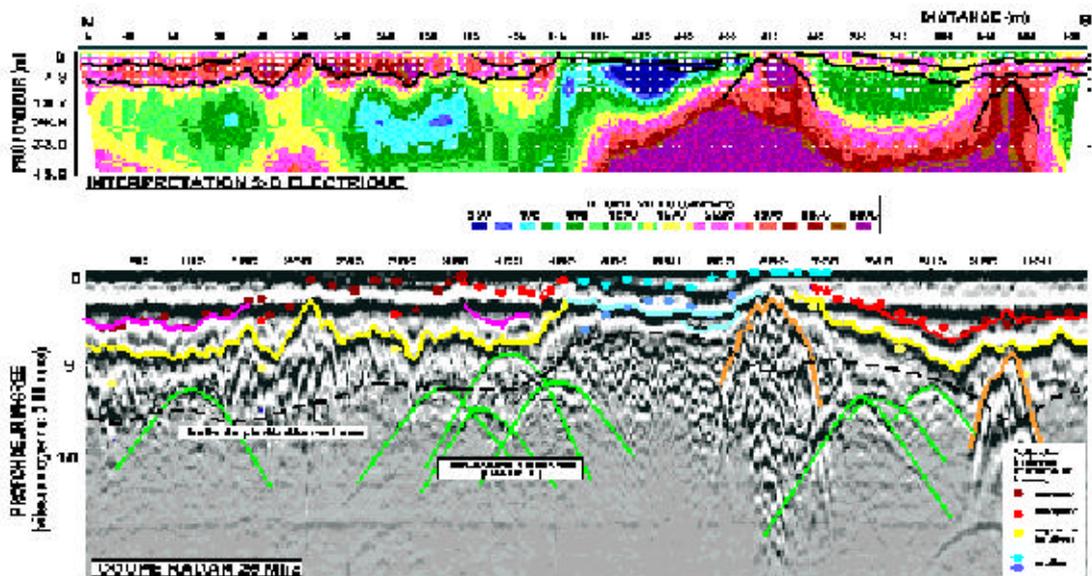


Figure 3 - Corrélation entre les sections radar et électrique (layon 6).
Radar, pas d'échantillonnage en distance : 1 mètre ; électrique, pas d'écartement entre électrodes : 2 mètres.

Les principales structures, à moins de 10 m de profondeur, sont bien vues par le radar, notamment le toit du saprolite et les deux remontées du bedrock à 660 et 870 m, mais les horizons plus superficiels sont mal discriminés à cette fréquence. En général, les observations à la tarière ou en fosse confirment l'interprétation du radar, interprétation qui permet d'interpoler les données discontinues des trous et des fosses.

Sur la coupe électrique, nous avons reporté à la même échelle les interprétations du radar. Nous pouvons établir les constatations suivantes :

- les ondulations du toit du saprolite coïncident ainsi que les positions et les formes des pointements du bedrock au sud ;
- au nord, l'interprétation électrique semble surestimer l'épaisseur des horizons latéritiques ;
- au centre, dans le marécage, la corrélation des deux interprétations est grossière sur le toit des argiles remplissant la cuvette ;
- le toit de la nappe n'est pas mis en évidence par le radar.

Néanmoins, dans l'ensemble, les interprétations conjointes du radar et de l'électrique sont intéressantes pour le positionnement adéquat des fosses sur les secteurs clefs d'un layon. Dans notre cas à Nsimi, l'interprétation géophysique peut être calée sur un ensemble très dense de données de terrain. Il sera ensuite possible d'étendre les interprétations aux autres profils pour tenter la reconnaissance tri-dimensionnelle des principales structures et du fonctionnement hydrodynamique du bassin.



Bibliographie

Loke M.H., Barker R.D., 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

Robain H., Descloitres M., Ritz M., Yene Atangana O., 1996. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of applied Geophysics*, 34, 237-253.

Davis J.L., Annan A.P., 1989. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.

A

nalyse d'une couverture de sol développée sur formations deltaïques à l'aide du dispositif multi-électrodes MU.C.E.P.

**Odile Duval¹, Cédric Panissod², Michel Dabas²,
Brigitte Remy³, Sylvia Lochon⁴, Ary Bruand¹**

¹ INRA Orléans, Unité de Science du Sol, SESCPF, 45160 Ardon, France

² CNRS, Centre de Recherches Géophysiques, Garchy, 58150 Pouilly-sur-Loire, France

³ FREDEC, 93 rue de Curambourg, 45403 Fleury-les-Aubrais cedex, France

⁴ SRPV, 93 rue de Curambourg, 45403 Fleury-les-Aubrais cedex, France

Abstract

The variability of soils which are developed on deltaic deposits restricts the study of both water and solute flow in these soils. A site was selected in the southern Paris Basin. A pedological survey using auger holes and an electrical survey with a Multi-depth (0,5 m, 1 m and 1,5 m) Continuous Electrical Profiling equipment (MUCEP) was performed. The comparison of the apparent resistivity maps with the soil maps showed that the variations in apparent resistivity can be interpreted as indicating variation in the depth of the clayey horizons. Then, the data from the electrical survey were inversed using a tabular model made of three layers. This enabled the calculation of the width of the clayey horizon which was in good agreement with the width obtained from the pedological survey.

Introduction

Dans les couvertures de sol fortement différenciées, l'étude des transferts d'eau et de solutés nécessite que soit connue avec précision la distribution des différents horizons pédologiques, en particulier celle des horizons à propriétés hydrauliques très contrastées. L'analyse par sondages pédologiques permet une observation directe des horizons mais perturbe le milieu en faisant communiquer des horizons qui sont naturellement séparés par d'autres de très faible conductivité hydraulique. On aboutit ainsi à une connaissance précise de la structure de la couverture de sol mais il n'est plus alors possible d'y étudier la circulation de l'eau et de solutés en raison des perturbations introduites par les observations.

Les méthodes géophysiques apparaissent alors comme autant d'alternatives qui ne nécessitent généralement qu'un nombre très limité d'observations directes de la disposition des horizons. Parmi ces méthodes, la prospection électrique a longtemps été pratiquée avec de petits résistivimètres à courant alternatif nécessitant l'insertion manuelle des électrodes dans le sol. Des dispositifs de mesure se déplaçant en continu et permettant l'enregistrement automatique des données ont été développés et appliqués à des couvertures de sol (Tabbagh, 1992 ; Dabas *et al.*, 1995). L'objectif de cette étude est de comparer l'information obtenue lors d'une prospection réalisée en utilisant un dispositif autotraîné multi-électrodes à celle obtenue lors d'une prospection pédologique.

Présentation du site et méthodes d'étude

Le site (9 000 m²) est localisé au nord d'Orléans sur le domaine du Service Régional de la Protection des Végétaux de la Région Centre (Dabas *et al.*, 1995). Il est situé sur les formations deltaïques du Burdigalien (Miocène) nommées "sables et argiles de Sologne" (Berger et Desprez, 1969 ; Lamotte *et al.*, 1988).

Le dispositif de prospection électrique MUCEP (MUlti-depth Continuous Electrical Profiling) est un ensemble de huit pôles (roues dentées) tiré par un véhicule. Le courant alternatif est injecté dans les deux premières électrodes et la tension est mesurée en trois points au moyen des trois dipôles suivants. Les distances entre les pôles permettent des profondeurs d'investigation d'environ 0,5 m, 1 m et 1,5 m. Un capteur de distance sans contact avec le sol (radar Doppler) permet un positionnement très précis des mesures. Celles-ci ont été effectuées le long de profils de 150 m de long et équidistants de 1 m (Dabas et Panissod, 1996).

La prospection pédologique a été réalisée de façon systématique selon un quadrillage régulier de 10 x 5 m. Cette dimension de maille a été choisie suite à une prospection de reconnaissance (Duval *et al.*, 1995). La profondeur des observations a été variable. Dans la partie sud-ouest destinée à accueillir un dispositif expérimental pour l'étude des transferts de produits phytosanitaires, les sondages n'ont concerné que les 50 premiers centimètres afin d'éviter de "percer" un éventuel plancher hydrologique. Au nord et à l'est, les sondages ont en moyenne 1,20 m de profondeur et une vingtaine de sondages profonds (à environ 2,20 m) a aussi été réalisée. Deux fosses pédologiques ont été creusées, décrites et analysées.

Résultats et discussion

Les trois cartes correspondant à chaque dipôle de mesure (**figure 1**) ont révélé un niveau profond plus résistant. En effet, la zone conductrice située à l'ouest des cartes disparaît peu à peu avec la profondeur et la résistivité reste élevée avec la profondeur dans des zones où elle l'était déjà en surface (nord-est des cartes). Les principales anomalies résistantes (A, B et C) sont présentes sur les trois cartes mais leur forme et leur résistivité varient sensiblement.

L'anomalie résistante principale (A) est celle dont le niveau de résistivité est le plus constant sur les trois cartes. Si cette anomalie semble appartenir à un ensemble de grande taille en surface, elle est nettement individualisée en profondeur. La seconde anomalie (B) peut être aisément distinguée sur les trois cartes.

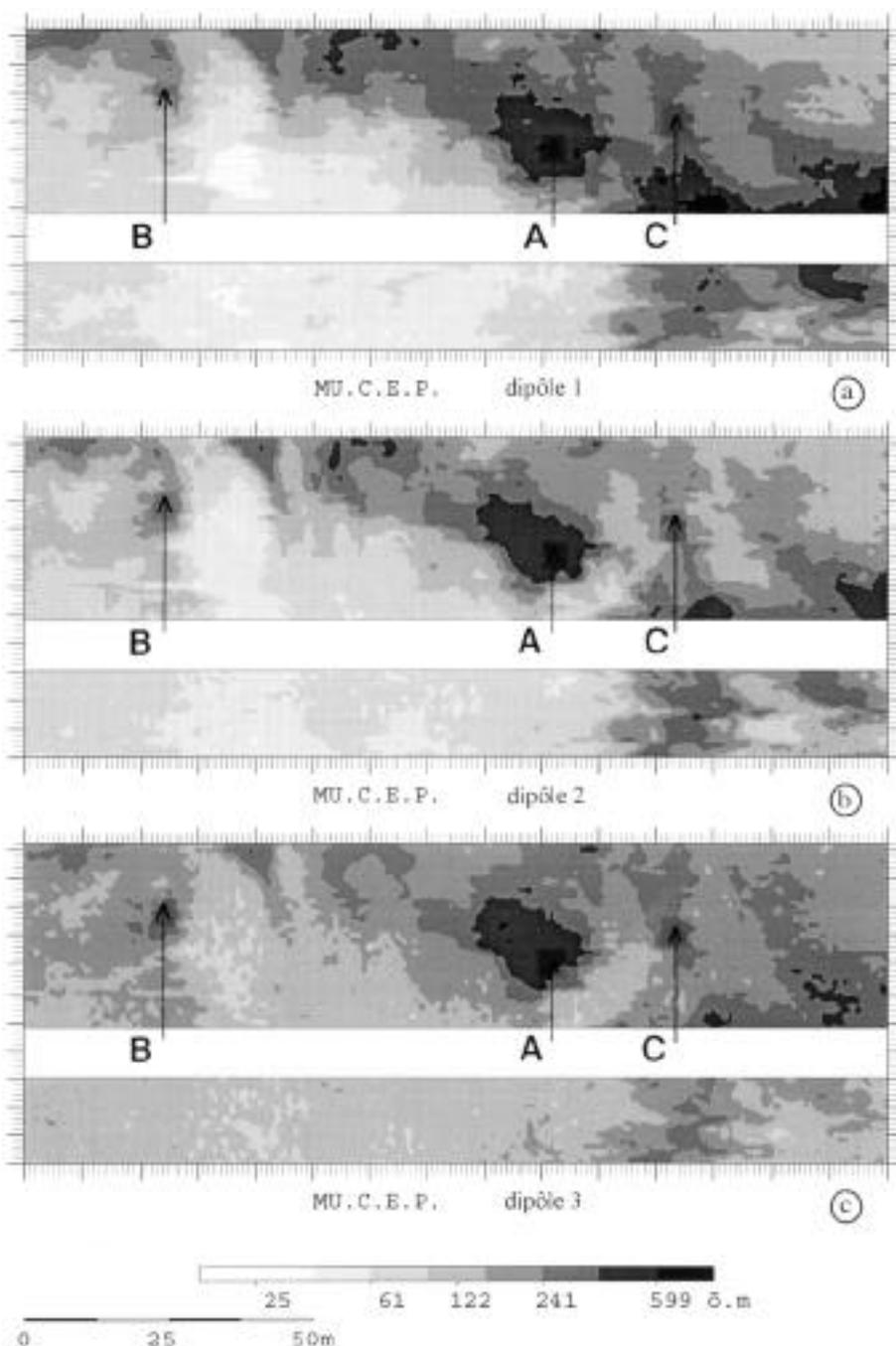


Figure 1 - Cartes de résistivité apparente obtenue avec le dispositif en 0,5 m (a), 1 m (b) et 1,5 m (c)

pond à un approfondissement de cette profondeur d'apparition (**figure 2**). Le caractère bien défini de cette anomalie sur la carte en 1,5 m (**figure 1**) indiquerait que, dans cette zone, les horizons argileux sont présents à une profondeur nettement supérieure à 1,2 m (classe de profondeur limite sur la carte de la **figure 2**). L'anomalie B, quant à elle, correspond à une zone où des horizons argileux sont présents à proximité de la surface. Sa faible définition sur les cartes en 0,5 m et 1 m et sa meilleure définition sur la carte en 1,5 m indiqueraient la faible épaisseur des horizons de texture argileuse et la présence d'horizons

Elle est néanmoins assez étalée sur les cartes en 0,5 m et 1 m et mieux définie sur celle en 1,5 m. Enfin, la troisième anomalie (C) est en revanche bien définie sur les cartes en 0,5 m et 1,5 m alors qu'elle est peu nette sur la carte en 1 m.

Les observations effectuées au niveau de deux fossés (Duval et al., 1995 ; Dabas et al., 1995) ont montré que le sol présente un horizon superficiel de texture sableuse dont la structure est peu nette. Il s'agit d'un ancien horizon cultivé. Sous cet horizon, on observe soit des horizons de texture sableuse à sablo-argileuse à structure polyédrique assez nette, soit des horizons de texture argileuse à structure polyédrique sub-anguleuse peu nette. Plus en profondeur, on observe des horizons de texture argileuse lourde à structure verticale.

Les coupes réalisées à partir de sondages pédologiques ont confirmé le caractère très variable de la couverture de sol. Elles montrent l'hétérogénéité des dépôts sédimentaires et la complexité des différenciations pédologiques qui se sont surimposées. Les volumes de texture homogène ne sont généralement que d'extension plurimétrique dans le plan horizontal et décimétrique dans le plan vertical.

La carte de la profondeur d'apparition des horizons argileux (textures argilo-sableuse, argileuse et argileux-lourd), réalisée à partir des sondages pédologiques, montre que l'anomalie A corres-

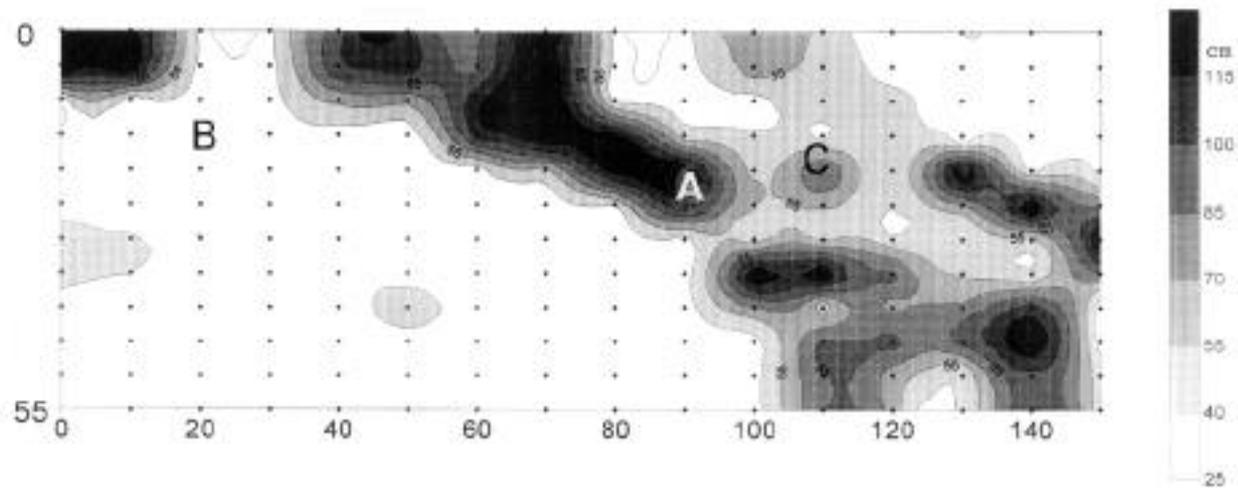


Figure 2 - Carte de la profondeur d'apparition des horizons argileux établie à partir des sondages pédologiques.

de texture sableuse sous-jacents à ces derniers. Enfin, l'anomalie C, dont l'extension diminue sur la carte en 1 m puis augmente sur celle en 1,5 m, correspond à une zone où les horizons argileux de faible épaisseur, intercalés dans des horizons sableux, sont présents en profondeur.

Les données de la prospection électrique ont été inversées à l'aide d'un modèle tabulaire à trois couches. Les paramètres de ces couches ont été choisis à partir de sondages réalisés sur le site et des observations pédologiques. Nous avons considéré un modèle composé d'un horizon supérieur d'épaisseur constante et de résistivité 150 $\Omega \cdot m$, d'un horizon inférieur sableux de résistivité 1 000 $\Omega \cdot m$ et un horizon intermédiaire argileux de résistivité 20 $\Omega \cdot m$. On calcule l'épaisseur des horizons pour que la résistivité corresponde à celle mesurée. La carte de l'épaisseur de l'horizon argileux ainsi obtenue (**figure 3**) a été com-

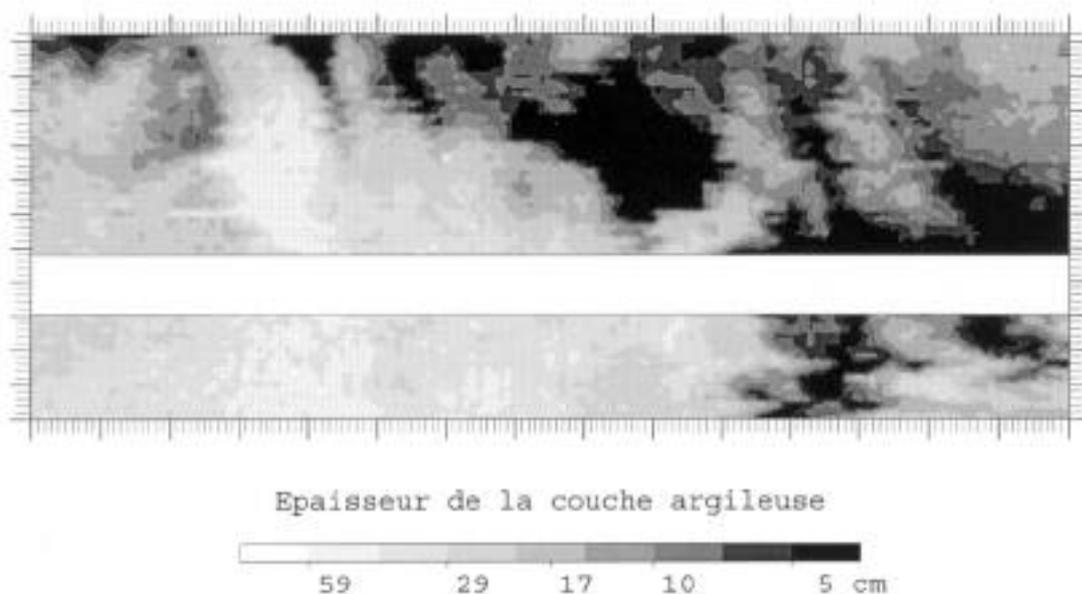


Figure 3 - Carte de l'épaisseur de l'horizon argileux pris en compte dans le modèle d'inversion des données de la prospection géophysique.

parée avec les données des sondages pédologiques dans la zone où ces sondages avaient au moins 1,2 m d'épaisseur. Les variations d'épaisseur obtenues par les deux méthodes sont très proches, excepté très localement quand l'épaisseur est sensiblement supérieure à celle déterminée à partir de la prospection géophysique (figure 4).

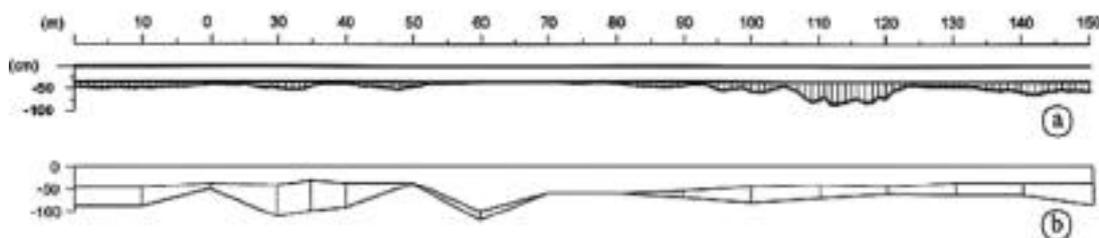


Figure 4 - Coupe de l'épaisseur de l'horizon argileux (hachures) obtenue à partir des données de la prospection géophysique (a) et des sondages pédologiques (b)

Conclusion

Les résultats de cette étude illustrent l'intérêt du dispositif autotracté de mesures électriques automatiques. La prospection à trois profondeurs a permis de localiser l'horizon argileux superficiel qui constitue le plancher hydrologique le plus superficiel et d'en déterminer l'épaisseur avec précision. L'inversion des données de la prospection électrique, qui s'est jusqu'alors limitée à utiliser un modèle tabulaire à trois couches, sera poursuivie. De la sorte, il sera bientôt possible d'établir une image 3D de la couverture de sol qui renseignera sur la localisation des principaux horizons, donnée essentielle pour être en mesure de modéliser les transferts d'eau et de solutés au sein d'une couverture de sol très fortement différenciée.

Bibliographie

- Berger G., Desprez N., 1969. *Carte géologique à 1/50 000, feuille d'Orléans. Notice explicative*. BRGM, Orléans. 8 p.
- Dabas M., Duval O., Bruand A., Verbèque B., 1995. Cartographie électrique en continu : Apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques. *Etude et Gestion des Sols*, 2(4), 257-268.
- Dabas M., Panissod C., 1996. Prospection d'une parcelle dans l'enceinte du SRPV par méthode électrique multi-profondeur (MUCEP). Rapport, 12 p.
- Duval O., Bruand A., Le Lay C., Renaux B., 1995. Etude pédologique de la parcelle expérimentale du SRPV. Rapport interne, INRA, Orléans, 19 p.
- Lamotte M., Bruand A., Duval O., Humbel F.X., 1988. Un système planosol-sol hydromorphe en forêt d'Orléans. *Science du Sol*, 26, 3, 139-155.
- Tabbagh A., 1992. Méthodes géophysiques appliquées à la prospection archéologique. *Mémoires de la Société Géologique de France*, 161, 9-15.

*P*remière application de la thermographie infrarouge à l'analyse des hétérogénéités et du fonctionnement d'une zone humide

Roger Guérin¹, Céline Pinet², Hocine Bendjoudi², Michel Dabas³

¹ Université P. et M. Curie, Département de Géophysique Appliquée, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris Cedex 05, France

² Université P. et M. Curie, Laboratoire de Géologie Appliquée, 4 place Jussieu, case 123, 75252 Paris Cedex 05, France

³ Université P. et M. Curie, CNRS, URA 1367, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris Cedex 05, France

Abstract

IR thermographic method is considered as a powerful tool for archaeological and pedological prospection. First result of the use of this technique for hydrogeological problem is the aim of this presentation. In the context of a survey of humid zones (Aube river), already studied by pluridisciplinary geoscientists, air-borne prospection was undertaken. Both thermic and visible images show an information about water presence.

La prospection thermique aéroportée, déjà largement utilisée pour des objectifs archéologiques (Tabbagh, 1986) et pédologiques (Gauthier et Tabbagh, 1994), est employée ici pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique d'une zone humide.

Dans le cadre du programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH), un projet d'études est mis en oeuvre pour mieux comprendre l'hétérogénéité et le fonctionnement des zones humides et des milieux riverains des cours d'eau. De caractère pluridisciplinaire (géophysique, hydrogéologie, paléoenvironnements, palynologie, géochimie...), ce projet concerne un site de la Seine amont (**figure 1**) présentant des situations très contrastées aussi bien du point de vue physique (extension du corridor alluvial), hydrodynamique (rôle par rapport aux crues) que des contraintes anthropiques (chenalisation, carrières, barrages réservoirs...).

Une clé de compréhension du fonctionnement actuel des zones humides est à rechercher dans la reconstitution et la modélisation des alluvions, qui leur servent de substrat, ainsi que du fonctionnement hydrique passé et présent. L'étude débute donc par la connaissance tant de l'état de surface que de la structure du sous-sol (nature des matériaux et géométrie des interfaces). Dans cette optique, a été réalisée en période hivernale, sur sol nu, une prospection thermique aéroportée (radiomètre à balayage) sur l'ensemble de la zone pour corréliser les propriétés thermiques avec la granulométrie obtenue par les sondages superficiels.

Cette mission aéroportée a été déclenchée sur les vallées de la Seine et de l'Aube (**figure 1**). Onze axes, représentant un linéaire de 80 km, ont été acquis en couvrant le secteur de la Bassée, la plaine de Romilly, l'Aube et la Seine amont.

Nous avons utilisé le radiomètre ARIES (Monge et Sirou, 1975) qui permet d'acquérir, sur deux canaux et directement sur un ordinateur, une image dans les domaines visible et thermique lointain (10,5-12,5 μm), dont la résolution au sol importante ne peut pas être atteinte avec les satellites actuels. La vitesse de l'avion et l'altitude de vol ont permis d'atteindre une résolution au sol de 2 m dans les deux directions et pour les deux canaux. Le positionnement des axes a été effectué grâce à un GPS embarqué. Un gyroscope couplé au système d'acquisition d'ARIES enregistre les mouvements de roulis et de tangage, ce qui permet de corriger la géométrie de l'image acquise.

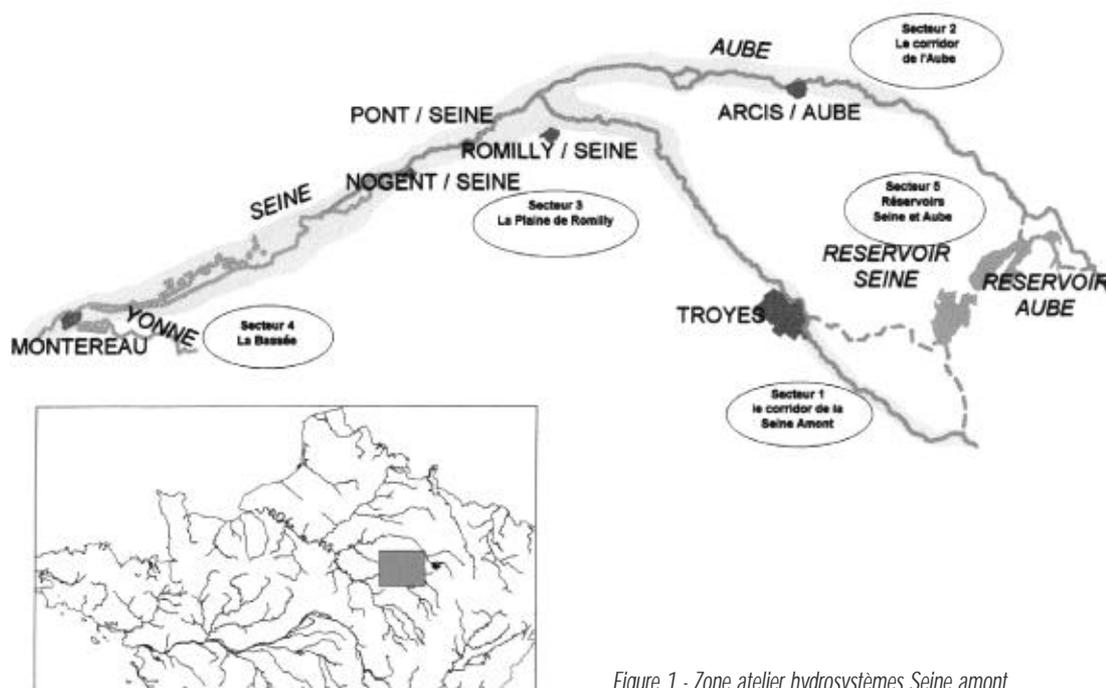


Figure 1 - Zone atelier hydrosystèmes Seine amont

Dans le cadre de la présente communication, nous nous sommes restreints à une zone de 3 km de long sur 2,5 km de large au-dessus de l'Aube en amont de la confluence avec la Seine. L'étude simultanée des canaux visible (**figure 2**) et thermique (**figure 3**) permet de séparer aisément les zones d'eau libre et les eaux stagnantes grâce aux propriétés thermiques bien différenciées de l'eau. De plus, la profondeur d'investigation de la méthode thermique (0,5 m à 1 m, fonction de l'évolution du flux thermique dans les jours précédents le vol) permet une estimation des réserves en eau du très proche sous-sol.



Figure 2 - Données visibles

En particulier, certaines zones d'anomalies thermiques liées visiblement à des écoulements souterrains sont visibles dans le canal thermique et invisibles dans le canal visible qui ne met en évidence que l'eau libre. Le canal visible du radiomètre ARIES permet aussi une mise à jour des données hydrologiques présentes sur les cartes IGN dans ces zones caractérisées par un fort remaniement anthropique sur des échelles de temps courtes (de l'ordre de l'année). De même, les anciens chenaux de la rivière apparaissent clairement sur l'image thermique. Bien que non actifs la plupart du temps, ces chenaux peuvent avoir un rôle important dans les processus d'inondation, or, ils n'apparaissent ni dans l'image visible, ni sur les cartes topographiques.

Il est clair qu'une campagne pluridisciplinaire de terrain est nécessaire pour valider les données aériennes. Cependant, cette première approche thermique suggère, pour un coût et un temps d'opération limités, d'avoir une vision globale des structures de l'ensemble de la zone, permettant d'orienter les investigations plus approfondies au sol.

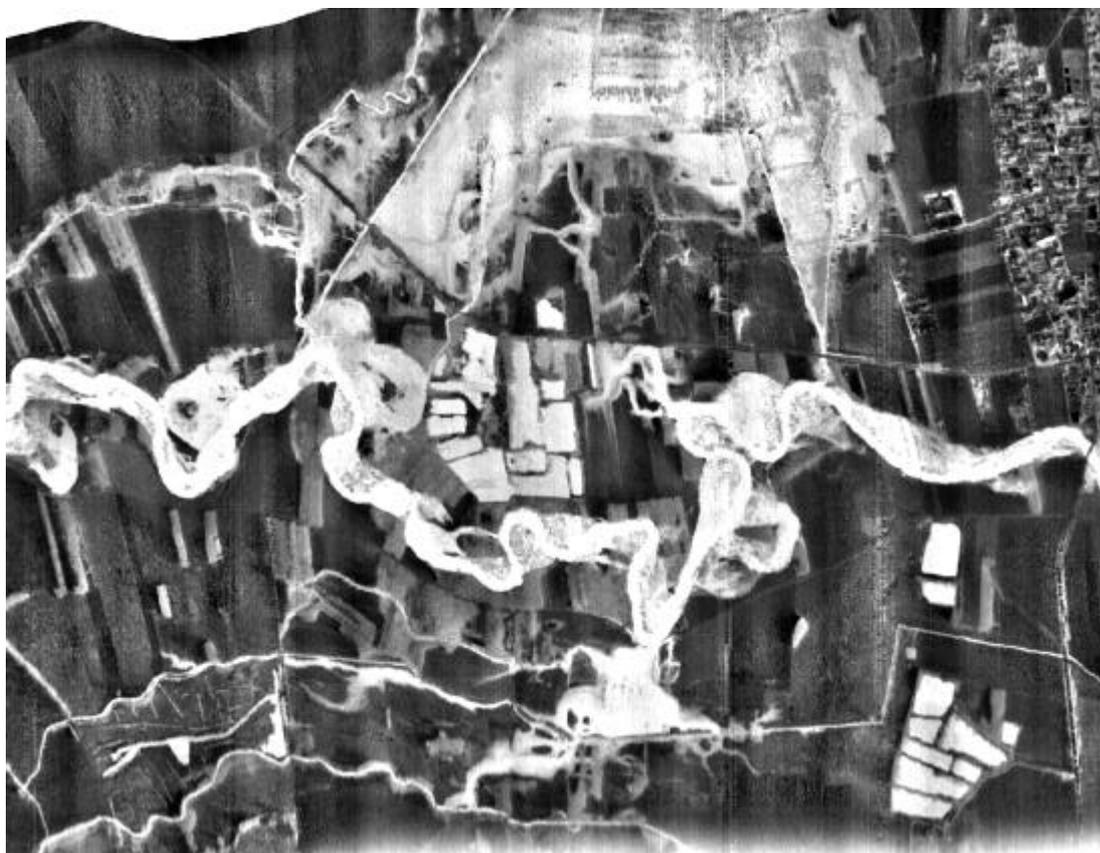


Figure 3 - Données thermiques

||| Bibliographie

Gauthier F., Tabbagh A., 1994. The use of airborne thermal remote sensing for soil mapping : a case study in the Limousin Region (France). *Int. J. Remote Sensing*, 15, n°10, 1981-1989.

Monge J.L., Sirou F., 1975. ARIES : un radiomètre multi-canal à balayage. *5^{ème} journée d'optique spatiale*, Marseille.

Tabbagh A., 1986. Bilan des prospections thermiques aéroportées réalisées en France entre 1975 et 1985. *Jornadas sobre teledeteccion y geofísica aplicadas a la arqueología*, Madrid.

*E*tude du site d'El Gouazine (Tunisie centrale) par méthodes EM 31 et EM 38

Olivier Martiré¹, Yves Albouy²

¹ Université P. et M. Curie, Département de Géophysique Appliquée, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris cedex 05, France

² ORSTOM, Laboratoire de Géodynamique Interne, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

Abstract

A geophysical survey has been carried out on the El Gouazine site (central Tunisia). Quantitative interpretation was performed using electrical soundings and qualitative interpretation was realized with EM 38 and EM 31 data. In this paper, we propose to use the EM 38 and EM 31 data to perform an 1D inversion.

Forward modelling is realized by using Mac Neil formulas, and inversion is achieved by a least squares method. Interpretated profiles has been compared with DC recovered resistivities and thickness and led to correct results.

Introduction et méthodes

Le site d'El Gouazine (Tunisie centrale) a été étudié par plusieurs méthodes géophysiques (EM 31, EM 38, VLF, sondages électriques) dans le cadre général d'une étude pédologique (Albouy et al, 1995).

Nous proposons dans ce papier d'utiliser les données électromagnétiques EM31 (dipôle magnétique vertical, horizontal et vertical à 1 m du sol) et EM 38 (dipôle magnétique vertical, horizontal) pour réaliser une inversion 1D, à 2 ou 3 terrains. Pour une inversion 3 terrains, c'est-à-dire 3 résistivités et 2 épaisseurs, il faut en effet disposer en chaque point de 5 mesures indépendantes.

Mac Neil (1980) donne les formules asymptotiques des conductivités apparentes d'un terrain stratifié. Celles-ci ont été utilisées, comme préconisées par Grésillon (1996), pour calculer un modèle 2 terrains qui satisfasse au mieux au sens des moindres carrés. Une inversion avec un modèle 3 terrains a été également testée.

La somme $S = \sum_i (i_{a_exp} - i_{a_calc})^2$ où $i_{a_calc} = f^i(z_1) \rho_1 + g^i(z_1, z_2) \rho_2 + h^i(z_2) \rho_3$

(dans le cas d'un modèle trois terrains), est dérivée par rapport aux conductivités vraies des terrains. On obtient alors un système linéaire par rapport aux conductivités (ρ_1 , ρ_2 et ρ_3) mais pas par rapport aux épaisseurs (z_1 et z_2). La solution triviale retenue consiste à faire varier les épaisseurs avec un pas suffisamment fin, puis à calculer pour ces épaisseurs les conductivités et l'écart quadratique moyen entre le modèle et les données expérimentales et enfin à retenir le "meilleur" modèle.

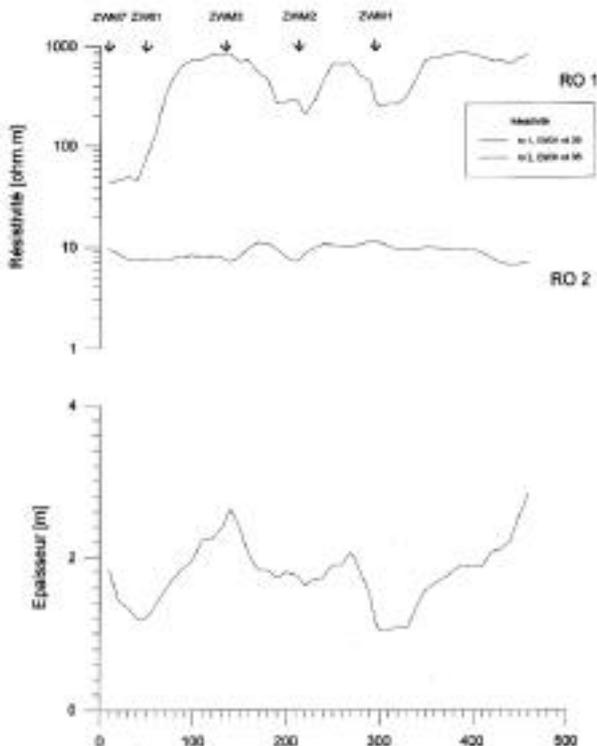


Figure 1 - Profil 1 : résistivité et épaisseur calculées pour un modèle à 2 terrains

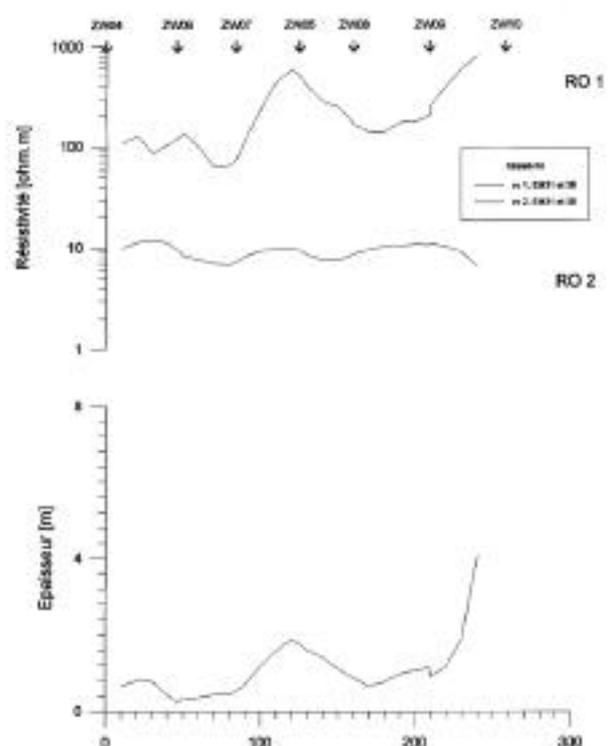


Figure 2 - Profil 2 : résistivité et épaisseur également calculées pour un modèle à 2 terrains

Les avantages d'une telle méthode sont évidents, car épaisseurs et conductivités peuvent être testées pour satisfaire des conditions physiques raisonnables (épaisseurs positives, par exemple). Les inconvénients sont que les données sont assez haute fréquence, ce qui est propre aux inversions par moindre carré, où seul l'écart quadratique entre les données mesurées et calculées est pris en compte.

Résultats

Les profils 1 et 2 (figures 1, 2) ont été inversés en modèle deux terrains. Les données concordent assez bien avec celles des sondages électriques (cf. annexe), même si les résistivités calculées du premier terrain sont bien plus fortes. Néanmoins, sur le profil 1, les résistivités les plus faibles sont situées à l'endroit des sondages électriques.

Le profil 2 a été également traité en modèle 3 terrains (figure 3) ; jusqu' à la cote longitudinale 100 m, on observe que la couche intermédiaire est plus conductrice que le "substratum", de même à la cote 160m : ces propriétés correspondent bien aux données interprétées des sondages électriques (cf. annexe).

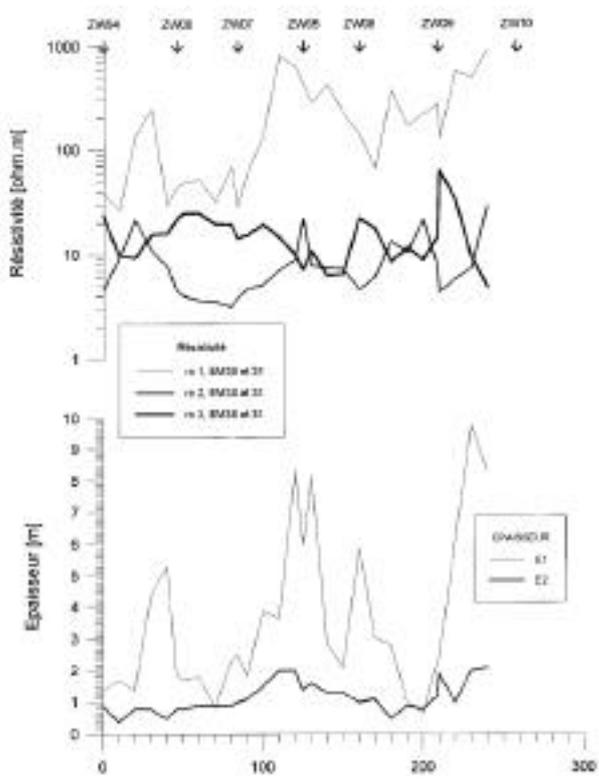


Figure 3 - Profil 2 : résistivité et épaisseur calculées pour un modèle à 3 terrains

Conclusion

Les inversions qui ont été menées semblent assez satisfaisantes par rapport aux hypothèses de départ (modèles tabulaires).

Remerciements

Nous remercions A. Tabbagh, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, pour ses conseils sur l'EM31 et sur l'interprétation des données Slingram.

Bibliographie

Albouy Y., Bellier G., Job J.O., Montoroi J.P., Arfaoui M., Gaaloul N., Gasmi M., Guiguen N., Khalifa F., Lamy V., Larvy Delarivière J., Millot G., 1995. Application des méthodes géophysiques à l'étude des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/CRGR, Bondy, 50 p. et annexes.

Mac Neil J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. Technical note TN6, Geonics LTD.

Gresillon F-X., 1996. Manuel à l'intention du prospecteur - Méthodes EM 31-34. Rapport de stage du DESS de Géophysique Appliquée, Université Pierre et Marie Curie.

Annexe

❖ Sondages électriques interprétés (Albouy et al., 1995)

Profil 1

ZWM7		ZW01		ZWM3		ZWM2		ZWM1	
ρ	e	ρ	e	ρ	e	ρ	e	ρ	e
26,5	1,0	14,3	0,1	91,5	0,2	99,8	1,6	94,2	0,3
17,8	4,4	24,1	0,9	149,8	1,0	10,0	2,7	10,1	3,3
2,8		12,6	3,9	14,2	4,2	3,0		5,0	
		3,7		3,2					

Profil 2

ZW04		ZW06		ZW07		ZW05		ZW08		ZW09		ZW10	
ρ	e	ρ	e	ρ	e	ρ	e	v	e	ρ	e	ρ	e
41,1	0,3	73,1	0,1	72,0	0,1	145,9	0,5	39,2	0,3	675,7	0,2	1125,2	0,7
6,3	3,8	8,2	0,7	11,2	0,8	26,3	2,6	6,5	0,7	97,4	1,2	1355,6	2,9
11,4		5,4	3,1	4,0	2,8	3,5		4,6	3,2	5,4		5,0	
		17,2		11,3				16,5					

C

artographie géophysique des sols et des formations superficielles

Cas du "Grison" en forêt de Fréteval (Loir et Cher)

**Didier Michot¹, Cédric Panissod², Abel Dorigny¹, Hocine Bourennane¹, Bernard Renaux¹,
Alain Couturier¹, Michel Isambert¹, Dominique King¹, Alain Tabbagh³**

¹ INRA Orléans, Laboratoire de Science du Sol - SESCPF, 45160 Ardon, France

² CNRS, Centre de Recherches Géophysiques, Garchy, 58150 Pouilly-sur-Loire, France

³ Université P. et M. Curie, Département de Géophysique Appliquée, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris cedex 05, France

Abstract

The Faux-Perche region, situated at the West of Paris, is a large plateau, constituted with loamy podzoluvisols. Under this loamy soils, very clayed materials resulted from the alteration of Cretaceous flint chalk during the tertiary period. During the winter, the superficial soil water is concentrated and eliminated by a colluvial hydrological pattern. In these depressive parts, the flint fragments are consolidated by iron oxides, forming an hard ironpan, called "grison". Very restrictive for agriculture and forestry, this conglomerate was used to build many monuments (churches, traditional houses...).

Our aim is the mapping of this pedological horizon to realize a distribution model. Classical auger hole cannot precisely define his extent. Therefore, we have tested geophysical technics to determine the location, the depth, the continuity and the cohesion of the "grison" horizon and its eventual relationship with geological materials and hydrology. We have realized, using the Wenner's electrical resistivity method, continuous measurements along many linear transects. Three depths are investigated (50 cm, 1 m and 2 m) at each measurement point along the transect. Along the same transects, we have also made electromagnetic conductivity measurements, allowing then to investigate the flint clay at higher depths (5 to 6 m).

First results show a good identification of the "grison" horizon by the geophysical methods. But many informations about the spatial variability of other neighbouring soils give an important interest to this beginning research.

Introduction

Le Faux-Perche est une région de plateaux humides, formée d'argile à silex recouverte de limon. Les eaux superficielles s'infiltrent peu et sont éliminées latéralement vers des colluvions de plateaux, épaisses, formant un réseau colluvial de sols à engorgement temporaire et à blocs erratiques appelés "*grisons*". Ces blocs sont composés de silex cimentés par du fer et du manganèse. L'accumulation de ces éléments est probablement liée à des phénomènes d'hydromorphie.

L'objectif de ce travail a été d'essayer de mieux cartographier la présence des *grisons* pour tenter d'en établir un modèle de répartition et donc de mieux comprendre les relations entre le *grison*, la nature des matériaux et la morphologie du terrain. Face à la difficulté de détecter et de cartographier le *grison* avec une méthode traditionnelle telle que la tarière, plusieurs méthodes géophysiques ont été retenues. Ces méthodes ont été testées également sur les sols avoisinants très caillouteux et donc eux-mêmes très difficilement identifiables au sondage à la tarière.

Matériels et méthodes

Une campagne de terrain a eu lieu durant l'hiver 1997 sur deux parcelles forestières de la Forêt de Fréteval, choisies spécialement pour leur situation géographique et leur intérêt géologique et pédologique (présence de *grison*). La première phase a consisté à réaliser un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) à partir de mesures très fines de nivellement.

Sur le fond topographique détaillé résultant du MNA, une carte pédologique a été dressée à l'aide d'une centaine de sondages pédologiques (<1,2 m) et a été complétée par des fosses pédologiques (1,5 à 2,5 m) pour une analyse plus fine de la structure des horizons. Par cette méthode de prospection, le *grison* n'est cartographié qu'en probabilité de présence. Sa logique de répartition ainsi que celle des sols caillouteux voisins sont donc difficiles à analyser.

❖ Des mesures électriques ont été testées selon différentes approches. Dans un premier temps, 17 sondages électriques, sensibles aux variations verticales de résistivité, ont été réalisés en des sites d'intérêt majeur, afin d'obtenir l'épaisseur et la résistivité des différents terrains rencontrés sur une profondeur de 10 à 15 m. Un quadripôle Wenner d'électrodes en contact avec le sol et un résistivimètre RMCA-4 ont servi à mesurer la résistivité apparente ρ_a

La résistivité propre des horizons de sol caractéristiques a été mesurée dans des fosses pédologiques profondes. Ces mesures ont été effectuées par des sondages électriques en configuration Wenner, à l'aide de mini-électrodes implantées, avec un faible écartement ($a = 2,5$ ou 5 cm), au sein même de chaque horizon du sol et des formations superficielles traversées.

❖ Dans un but de spatialisation, 41 trains électriques ont été réalisés dans un second temps à l'aide du dispositif autottracté multi-électrode MUCEP (MUlti-depth Continuous Electrical Profiling) dit en "Vol de Canard". Cet appareil est développé par le Centre de Recherches Géophysiques du CNRS-Garchy et permet une mesure en continu de la résistivité apparente du terrain à trois profondeurs. Un courant alternatif de fréquence 122 Hz est injecté dans le sol par un premier dipôle. La tension est mesurée par trois autres dipôles d'écartement croissant. La profondeur d'investigation est de 0,5 m, 1 m et 2 m respectivement pour le 1^{er}, le 2^{ème} et le 3^{ème} dipôle de mesure. Ces trains électriques recoupent à la fois la couverture pédologique et la structure géologique.

❖ A ces méthodes de résistivité électrique, s'est ajoutée, dans un troisième temps, une méthode de conductivimétrie électromagnétique. Ainsi, l'appareil EM31 de GEONICS, constitué de deux bobines d'induction espacées de 3,66 m, a permis d'acquérir une information encore plus profonde (de l'ordre de 5 m) le long de 17 transects recoupant les structures. La bobine émettrice parcourue par un courant électrique de fréquence f produit un champ primaire H_p qui génère un courant induit dans le sol. Celui-ci pro-

duit à son tour un champ magnétique secondaire H_s mesuré par la bobine réceptrice et d'autant plus important que le sol est conducteur.

Le long des transects, les mesures de conductivité ont été effectuées tous les 2 m. A chaque site de mesure, trois valeurs de conductivité et de phase ont été obtenues en fonction de l'orientation des bobines d'induction par rapport au sol et au cheminement.

La conductivité étant l'inverse de la résistivité on transforme les mesures pour obtenir des profils de résistivité électrique comparables avec ceux obtenus par la méthode électrique.

Traitement des données

Dans un premier temps le Modèle Numérique d'Altitude a permis de construire un fond topographique précis sur lequel ont été géoréférencées, en coordonnées Lambert II, toutes les données de la pédologie et de la géophysique.

L'inversion des sondages électriques a permis de déterminer l'épaisseur et la résistivité des différentes couches de terrains sous-jacentes. Elle a consisté à faire coïncider au mieux la courbe théorique $\rho_a = f(a)$ avec les points expérimentaux obtenus pour les différents écartements (a) des électrodes. La courbe théorique $\rho_a = f(a)$ est obtenue à partir des paramètres d'un modèle choisi par l'expérimentateur en fonction de la forme de la courbe expérimentale et de sa connaissance du terrain.

Afin d'éliminer les valeurs erronées dues aux mauvais contacts des électrodes avec le sol, les résistivités des traînés électriques ont été filtrées par la médiane (Tabbagh, 1988). Les profils de résistivité apparente multiprofondurs ont ensuite été dressés pour chaque transect..

Les profils de résistivité obtenus à l'EM31 ont une forme plus lissée que ceux obtenus à partir des traînés électriques effectués par le dispositif MUCEP. Ils ont donc été utilisés directement sans filtrage.

Résultats préliminaires

Dans cet article, les résultats ne concernent que la détermination des principales unités typologiques de sol et l'analyse des relations entre ces unités et les mesures géophysiques. La présentation est limitée ici à un seul transect. Celui-ci est choisi pour sa représentativité du point de vue de la pédologie mais également vis-à-vis de l'intérêt soulevé par les profils de résistivité. L'analyse des données cartographiques est en cours et devrait permettre de généraliser ces premiers résultats.

Quatre unités typologiques de sol (UTS) sont reconnues le long du transect (**figure 1**) :

- L'UTS 1 située au sommet du versant exposé vers l'ouest. Il s'agit d'un planosol de départ, à horizon albique avec très peu de taches rouille d'oxydation, développé dans un matériau dérivant de l'argile à silex rubéfiée. Le ressuyage du sol est rapide.
- L'UTS 2 développée sur la partie inférieure du versant exposé vers l'ouest est constituée d'un planosol d'arrivée, développé dans un matériau dérivant de l'argile à silex. Il est caractérisé par la présence d'un horizon albique gris clair, avec de nombreuses taches rouille d'oxydation et des concrétions ferro-manganiques. Le ressuyage de ce sol semble plus tardif.
- L'UTS 3 est constitué d'un sol peu évolué alluvio-colluvial à pseudogley, très caillouteux et à grisons erratiques ou en bancs discontinus, reposant sur une argile à silex décolorée, voire blanche. Une nappe temporaire à forts battements se développe au dessus de l'argile à silex blanche. Ce sol n'est présent que dans les fonds de vallon mais peut en être absent.
- L'UTS 4, présente sur le versant exposé vers l'est, est formée d'un sol lessivé dégradé hydro-morphe développé dans des formations limoneuses de pente reposant sur l'argile à silex. Cette

couverture limoneuse est hétérogène et montre des poches de cailloux. Une nappe perchée se traduit par un engorgement prolongé des glosses et en bas de pente par un horizon Eg plus humide et plus gris qu'en haut de toposéquence. Une seconde nappe est peut-être présente à la base de la formation limoneuse au contact de l'argile à silex.

Dans la région, cette toposéquence est caractéristique de la distribution des limons sur argiles à silex en relation avec l'intensité et l'orientation des pentes. Le *grison* est principalement localisé dans les zones de concentration de l'eau, zones identifiables sur le terrain ou d'après le MNA.

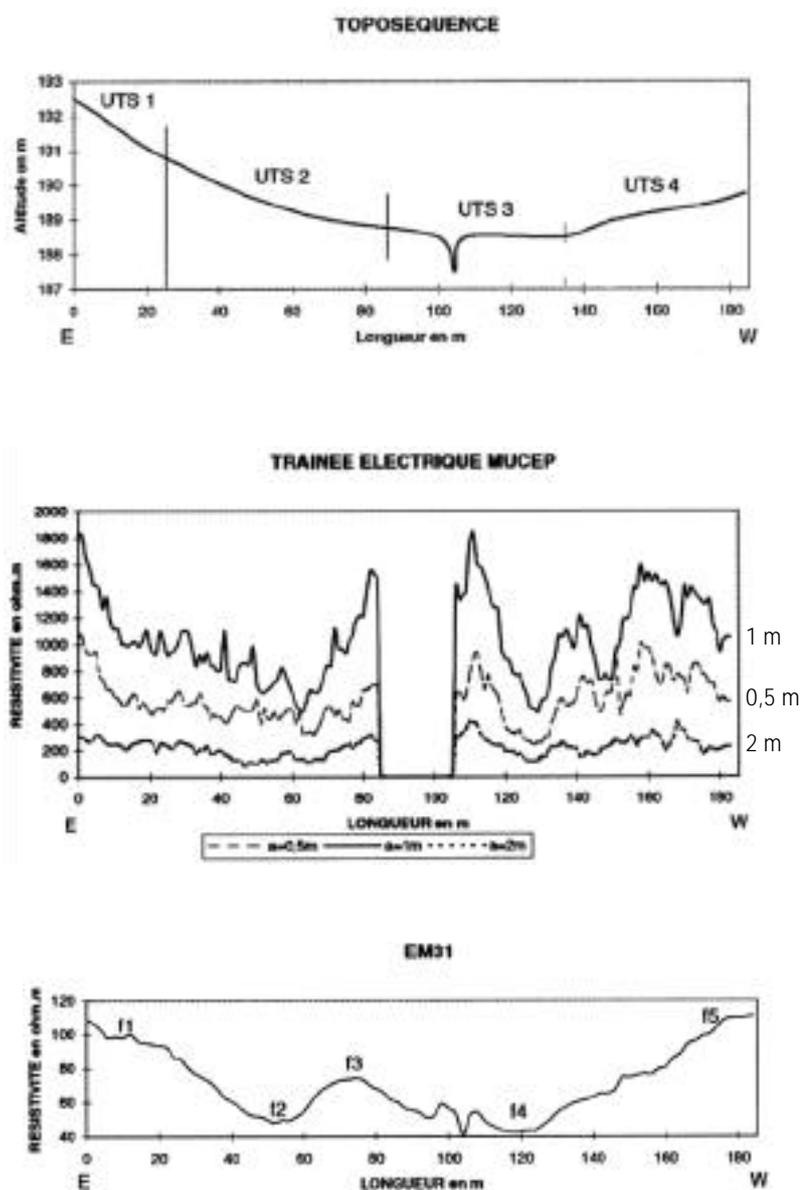


Figure 1 - Toposequence : pédologie et résistivité apparente

Les profils de résistivité apparente (**figure 1**) sont obtenus, soit directement à partir des trainés électriques MUCEP, soit à partir des mesures de conductivimétrie à l'EM31. Ces différentes approches permettent de discuter la typologie proposée :

- Les trois profils, provenant des mesures MUCEP à différents écartements, présentent des similitudes. L'écartement 1 m discrimine le mieux les UTS selon la typologie précédemment définie. Le planosol bien drainé de l'UTS 1 possède des valeurs élevées de résistivité (1 200 à 1 800 Ohm.m). Le planosol hydromorphe de l'UTS 2 est moins résistant (600 à 1 000 Ohm.m), avec des valeurs progressivement décroissantes du haut vers le bas du versant. L'UTS 3 est marquée par des valeurs très élevées de résistivité (1 200 à 1 800 Ohm.m). Ces valeurs semblent corrélées à la présence du *grison* et montrent une limite très contrastée avec les unités voisines. Enfin, le sol lessivé dégradé de l'UTS 4 présente des valeurs de résistivité situées dans la moyenne des résultats le long de ce transect, mais cette UTS est fortement marquée par une grande variabilité spatiale des résultats.
- Le profil des mesures de conductivimétrie à l'EM31 suit grossièrement les données de résistivité du MUCEP. Toutefois, on note un amortissement beaucoup plus important des profils. En particulier, la grande variabilité des données MUCEP dans le sol lessivé dégradé de l'UTS 4 n'existe pas avec l'EM31. On observe dans cette unité une augmentation progressive de la résistivité du bas vers le haut du versant de façon comparable aux planosols du versant opposé. On constate par ailleurs des valeurs très faibles de résistivité de part et d'autre du fond de vallon. Ce résultat est également visible sur le MUCEP mais de façon moins marquée. Ainsi, malgré les différences de profondeur d'investigation entre les deux techniques, l'EM31 reste sensible aux couches de surface. Toutefois, un dôme de résistivité bien individualisé n'apparaissant pas sur les profils MUCEP est observé dans la partie inférieure de l'UTS 2 en bas de versant.

Conclusion

D'une façon générale, les unités typologiques de sol reconnues à la tarière sont distinguées les unes des autres par leur signature de résistivité électrique. Toutefois, on note d'une part, une variabilité spatiale importante au sein de certaines de ces unités (variabilité progressive ou erratique) et d'autre part, quelques désaccords sur la localisation des limites entre UTS et sur celles des paliers de résistivité le long du transect. Le *grison* est certainement l'élément le plus reconnaissable par les mesures électriques, et ce, malgré une humidité très importante en fond de vallon lors des mesures. Par contre, il est plus difficile d'interpréter les variabilités constatées dans les autres unités. Il pourrait s'agir de la présence soit de sources, soit de blocs silicifiés en partie démantelés ("perrons" datés du tertiaire). La décroissance de la résistivité du haut vers le bas du versant pourrait être due à l'action conjuguée de l'épaississement des matériels colluvionnés et de l'humidité des sols.

A partir des informations recueillies sur l'ensemble des trainés électriques et dans le but d'avoir une représentation spatialisée des phénomènes, des cartes de résistivité apparente aux trois profondeurs ainsi qu'une carte de conductivimétrie électrique sont en cours de réalisation à l'aide de méthodes d'interpolation de type krigeage. L'analyse de ces cartes permettra d'affiner les relations entre types de sol et valeurs de résistivité. Une cartographie de la présence de *grison* sera combinée avec le MNA et la distribution des matériaux afin d'établir un modèle de distribution spatiale de ce *grison*. On espère ainsi proposer des hypothèses sur la genèse de ce *grison* en relation avec les unités de sol avoisinantes.

Bibliographie

Tabbagh J., 1988. Traitement des données et élimination des valeurs erronées en prospection électrique en continu. *Revue d'Archéométrie*, 12, 1-9.

*M*éthode électrique 2D appliquée à la recherche des aquifères du granite de Saraya (Sénégal)

Magatte F.K. Niang¹, Same Diouf²

¹ Institut des Sciences de la Terre, B.P. 5396, Dakar, Sénégal

² ORSTOM, Laboratoire de Géophysique, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

Abstract

Groundwater occurrence is generally restricted to linear structural features for the birimian granite of eastern Senegal. Some lineaments, obtained from satellite Spot imagery, were selected with regard to drillhole flowrates.

Geoelectric survey, involving multi-electrode ABEM Lund Imaging System, is carried out across lineaments. Apparent resistivity of vertical pseudo-sections shows low resistivity channels deeper than the weathered layer.

2-D inversion of resistivity data suggests that the higher rate of fracturation from 20 to 60 meters in depth can be interpreted as a potential aquifer.

Hydrogeologic parameters are deduced for any case by relationships between resistivity and hydrochemical characteristics of wells water and boring holes water.

Introduction

Une étude géophysique par méthodes électriques -sondages, trainés et multi-électrodes- a été effectuée dans le massif du granite de Saraya, dans le cadre du projet "CAMPUS" initié, à Dakar, par l'I.S.T¹ de l'université Cheikh Anta Diop et le laboratoire de géophysique de l'ORSTOM². Dans cette province birimienne du Sénégal oriental (boutonnière de Kédougou), l'accroissement des besoins en eau a donné lieu à de nombreuses campagnes de forage. L'extrême variabilité des débits obtenus pour des forages voisins, souligne le caractère très discontinu des aquifères du socle. Ceux-ci se développent avec les fracturations, induites par les contacts entre les matériaux intrusifs et encaissants, ou suivant des failles.

L'objectif de ce travail était donc de tester la méthode multi-électrode pour caractériser les aquifères qui seraient associés soit aux linéaments déterminés sur les images satellites (**figure 1**), soit aux filons ou aux contacts lithologiques définis d'après la carte géologique au 1/200 000 de Kéniéba (B.R.G.M., 1963). Divers aquifères ont été identifiés par les débits de forage dans ce secteur : deux zones sont présentées dans cet exposé.

La méthode multi-électrodes

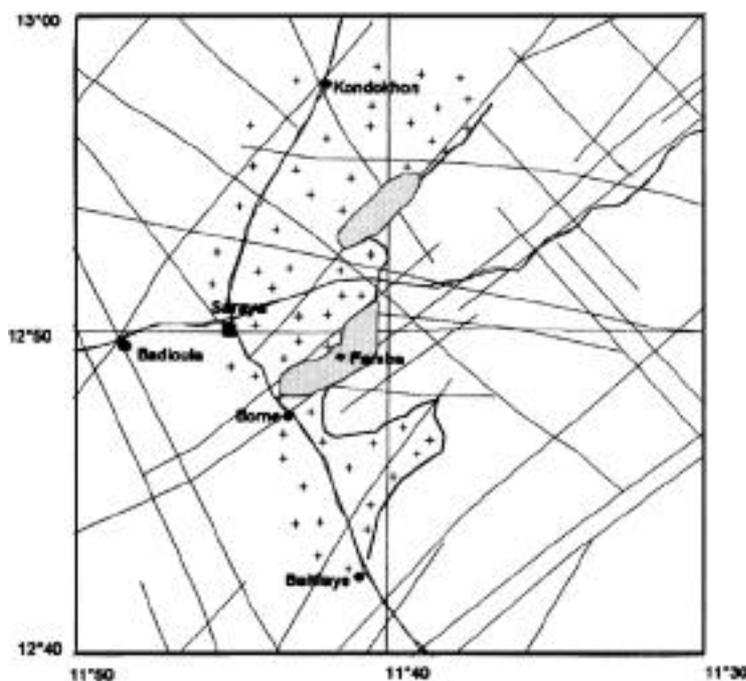


Figure 1 - Carte linéaire de l'image SPOT MS du secteur de Saraya (Witschard, 1995)

l'espace AB.

La modélisation des pseudo-sections par le logiciel RES2DINV (Loke, 1996) fournit une structure géo-électrique des résistivités vraies en fonction de la distance et de la profondeur.

La méthode multi-électrodes est adaptée aux cibles de cette étude (linéaments, failles et filons), qui se traduisent par des variations latérales de porosité en grand. Le dispositif multi-électrodes -ABEM Lund Imaging System- est basé sur l'utilisation de 64 électrodes connectées au résistivimètre par l'intermédiaire d'un sélecteur d'électrodes qui est piloté par micro-ordinateur. Des panneaux de résistivité apparente sont réalisés suivant l'organisation des électrodes.

La pseudo-profondeur d'investigation dépend de l'organisation des électrodes ABMN et de

(3) Institut des Sciences de la Terre.

(4) Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.

Résultats

❖ Secteur de Faraba

Situé à l'ouest de Saraya, ce secteur est traversé par des linéaments de direction NE-SO (**figure 1**). Il est aussi caractérisé par une image infrarouge en fin de saison sèche traduisant un potentiel aquifère persistant situé au voisinage du contact entre les granites et les schistes birimiens d'origine sédimentaire. Enfin, il comporte un forage dont le débit est de 3 m³/h.

A partir des sondages de reconnaissance, trois niveaux sont identifiés avec, en surface, un recouvrement sablo-argileux de 1 m d'épaisseur sur 5 m d'argiles d'environ 10 Ohm.m. En profondeur, un niveau à potentiel aquifère, de résistivité moyenne 100 Ohm.m, repose sur le socle granitique (>500 Ohm.m).

La comparaison entre le trainé électrique et la coupe multi-électrodes traduit (**figure 2**) une variation latérale des résistivités moyennes, qui suggère un relèvement du socle ou un changement latéral de faciès.

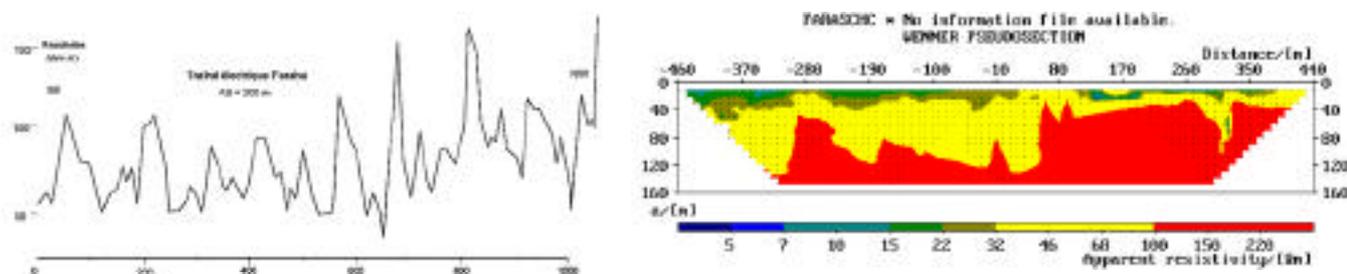


Figure 2 - Comparaison trainé électrique et multi-électrodes des résistivités apparentes à Faraba

Les sections de résistivité obtenues (**figure 3**) en Wenner et en Schlumberger, perpendiculairement aux linéaments, ne sont pas contradictoires. La modélisation de la section Schlumberger -plus profonde- souligne une structure compartimentée par les linéaments, qui n'exclut pas la présence de filon doléritique comme l'atteste le log du forage de Faraba. Un aquifère potentiel important autour de l'abscisse $x = -75$ et un second à $x = -235$ confirment l'image satellite en infrarouge liée à une végétation vivace en fin de période sèche.

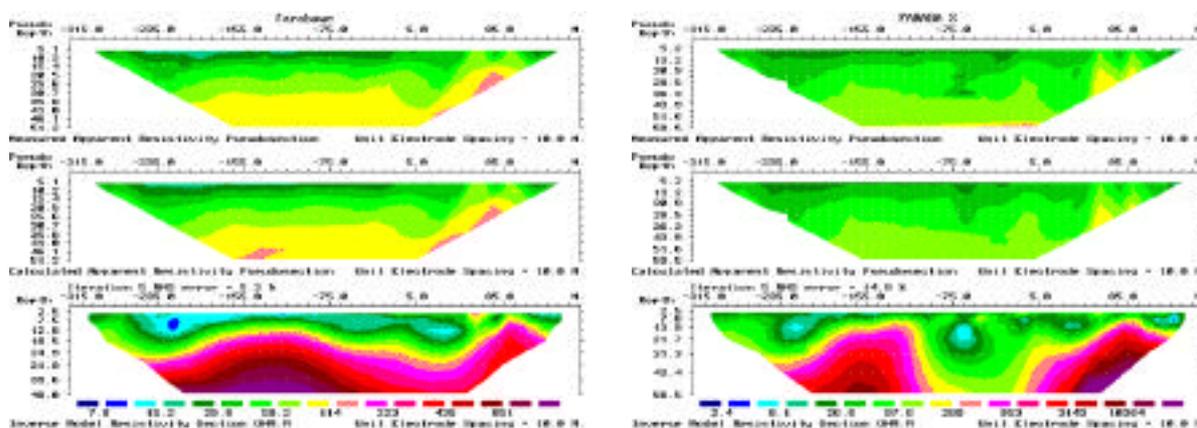


Figure 3 - Comparaison des profils multi-électrodes Wenner et Schlumberger à Faraba

❖ Secteur de Badioula

Il est caractérisé par l'intersection de linéaments identifiés par télédétection dont l'une des directions correspond au prolongement d'une intrusion basique étudiée par la méthode électrique à Kondokhon (Blot, 1980).

L'investigation menée porte sur un profil multi-électrodes Wenner (**figure 4**). La modélisation fait apparaître un enfoncement du toit des niveaux aquifères (50 à 369 Ohm.m) encadré par deux secteurs de forte

résistivité (998 à 2 695 Ohm.m) correspondant aux granites sains non fissurés. Cet approfondissement traduit une structure fracturée qui peut être due au prolongement du filon intrusif de Kondokhon qui apparaîtrait autour de l'abscisse $x = -150$.

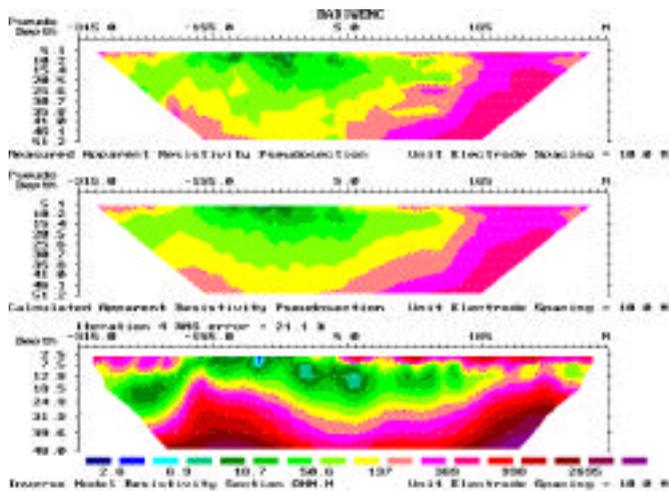


Figure 4 - Profil multi-électrodes Wenner à Badioula

Le sondage composite obtenu au centre du profil multi-électrodes est en parfaite corrélation avec le log lithostratigraphique du forage hydraulique de Badioula, qui a un débit exceptionnel de 19 m³/h.

Celui-ci pourrait s'expliquer par un noeud de failles réunissant plusieurs aquifères collecteurs.

Caractérisation hydrochimique des aquifères

La prospection géophysique des aquifères du massif du granite de Saraya a été accompagnée par une analyse hydrochimique de l'eau des nappes afin de déterminer l'influence de la nature de l'aquifère sur la composition chimique des eaux souterraines.

On peut ainsi définir plusieurs types de nappe mais aussi plusieurs niveaux de relation entre la géochimie des eaux et la géochimie des aquifères.

Les eaux des nappes du massif de Saraya sont faiblement minéralisées, à l'exception des teneurs en silice et en bicarbonates qui sont très élevées : leur faciès est bicarbonaté sodique.

Les nitrates sont en faible teneur dans les eaux de puits et absents dans l'eau des forages, à l'exception de celui de Saraya.

La teneur en chlorure et en potassium est plus élevée dans l'eau des altérites des granites que dans celle de la roche.

L'aquifère de roches granitiques est plus riche en silice que celui des roches basiques et schisteuses.

Les zones plus riches en calcium et en magnésium correspondent aux formations basiques et schisteuses tandis que les eaux riches en chlorure correspondent aux aquifères des granites.

Ces caractéristiques conduisent à différencier les aquifères profonds des aquifères de surface, séparés par un niveau d'altération argileux. D'autre part, les résistivités des eaux de puits (6 à 10 m) et des eaux de forage (45 à 60 m) permettent d'estimer la porosité en grand des formations.

Conclusion

Cette étude montre l'intérêt de la prospection électrique multi-électrodes dans la recherche des aquifères en zone de socle, car elle permet, en particulier, de vérifier que les linéaments identifiés par télédétection peuvent correspondre effectivement à des fracturations productives. Les relations entre la résistivité des formations et les paramètres hydrochimiques permettent de lever des indéterminations, qui subsisteraient par la seule méthode électrique, et conduisent à une caractérisation des aquifères.

Bibliographie

- Blot A., 1980. L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. Mém. ORSTOM, 114, Paris, 434 p.
- B.R.G.M., 1963. Notice explicative de la feuille de Kéniéba au 1/200 000. Service des mines et de la géologie, Dakar, 10 p.
- Loke M. H., 1996. Rapid resistivity inversion. Version 2.14 C.
- Witschard F., 1995. Rapport inédit.

Remerciements

Nous remercions P. Mourgues, Directeur de recherche au Laboratoire de Géophysique du centre ORSTOM de Dakar, pour l'initiation de ce travail et ses conseils. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet "CAM-PUS". Les auteurs remercient A. Dia, Directeur de l'I.S.T. et coordonnateur du projet.

Réinterprétation par inversion bayésienne des sondages électriques sur le lac Tritrivakely (Madagascar)

**Heritiana Rakoto¹, Flavien Ranaivo-Nomenjanahary¹, Jean-Bruno Ratsimbazafy¹,
Yves Albouy², Jean-Jacques Schott³, Michel Menvielle⁴**

¹ Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, B.P. 1473, Antananarivo, Madagascar

² ORSTOM, Laboratoire de Géodynamique Interne, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

³ Ecole et Institut de Physique du Globe, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France

⁴ Université Paris Sud, Laboratoire de Géophysique et Géodynamique Interne, Bât. 504, 91405 Orsay cedex, France

Abstract

The aim of this study is to interpret data from vertical electrical soundings using bayesian approach of the 1D inverse problem. Two orthogonal Schlumberger soundings were carried out on the lake Tritrivakely. By classical interpretation, thickness of first conductive layers is underestimated. Bayesian inversion method is efficient for analysis of equivalence : using two or three layers models, we obtain a well constrained estimation on resistivity of conductive(s) layer(s) but a poorly constrained estimation on thickness. Bayesian inversion may be used also for giving a smooth model resistivity versus depth.

Introduction

En sondage électrique comme dans la plupart des autres techniques de géophysique appliquée, coexistent deux méthodes d'interprétation : la modélisation directe, d'abord réalisée au moyen d'abaques, et l'inversion, qui fait appel nécessairement à des ordinateurs plus ou moins puissants.

La méthode utilisée

❖ Les modèles directs

La modélisation directe consiste à calculer, pour une distribution de résistivités donnée, la résistivité apparente ρ_a en fonction des caractéristiques géométriques de la configuration utilisée. Il faut estimer le potentiel électrique $V(M)$ créé par une source de courant continu $i(P)$ placée en un point P de la surface du sol. Si ρ est la résistivité du milieu, la loi de conservation de courant donne :

$$\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \nabla V + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \nabla V = i(P) \quad (1)$$

Cette équation différentielle a été résolue, depuis les années 50, dans le cas des milieux constitués de couches homogènes et stratifiées. Récemment, associés au développement de la micro-informatique, les traitements 2-D et 3-D ont été également mis au point, soit à partir de la méthode des éléments finis (Dey et Morisson, 1979), soit à partir des équations intégrales (Xu et al, 1988). Autrement dit, le problème direct est pratiquement résolu.

❖ L'inversion bayésienne

L'approche bayésienne consiste à intégrer toutes les informations disponibles en les exprimant sous forme de loi de probabilité. Dans le cas des sondages électriques, les informations nécessaires sont :

- les résistivités apparentes observées $Y = [\rho_a(k), k = 1, m]$ ($Y \in \mathbb{R}^m$), m étant le nombre d'observations,
- le savoir a priori sur le modèle $A = [a^i = (i, d(i), i = 1, n)]$ ($A \in \mathbb{R}^n$), n étant le nombre de couches du modèle stratifié, le nombre de paramètres est $p=2n-1$
- et la loi physique caractérisant le problème direct $Y_m = G(A) = [\rho_a(k), k = 1, m]$.

G est la fonctionnelle permettant de calculer la résistivité apparente Y en fonction des paramètres $X=A$ du modèle.

Nos connaissances sur la structure (résistivités et épaisseurs) sont traduites à l'aide d'une loi uniforme, appelée loi a priori $P(X=A)$. Elles seront actualisées au fur et à mesure qu'on reçoit des informations à partir des résistivités apparentes acquises. Selon Bayes (1763), la probabilité a posteriori

$$P(X = A | Y) = \frac{P(Y | X = A) \cdot P(X = A)}{\int_{A \in \mathbb{R}^n} P(Y | X = A) P(X = A)} \quad (2)$$

représente l'actualisation de nos connaissances a priori sur les paramètres du modèle au vu de l'information contenue dans les observations.

$$P(Y | X = A) = K \exp[-(Y - G(A))^T C_Y^{-1} (Y - G(A))] \quad (3)$$

est la probabilité conditionnelle des données lorsque le vrai modèle est $X=A$. K est la constante de normalisation et C_Y est la matrice de covariance de Y .

La résolution du problème inverse bayésien repose sur le calcul de la probabilité a posteriori. Son estimation fait appel aux principes de méthodes itératives, du type Monte Carlo. Chaque itération est associée à un tirage. L'évolution du système à l'issue de chaque tirage correspond à un processus aléatoire qui s'apparente à celui de la chaîne de Markov.

→ Equivalences

L'influence d'une couche conductrice comprise entre deux couches résistantes est traduite par sa conductance (rapport de sa conductivité à son épaisseur). Plusieurs couples de valeurs possibles des paramètres conduisent à une réponse identique dans la limite des incertitudes des mesures. Les lois marginales y afférentes sont multimodales, c'est à dire présentent plusieurs pics. Dans ce cas, il est impossible à moins de données complémentaires de préciser individuellement la résistivité ou l'épaisseur de la couche intermédiaire.

La méthode bayésienne offre deux possibilités pour estimer les limites d'équivalence :

- l'une analyse la loi jointe des couples résistivité et épaisseur,
- l'autre discrétise l'épaisseur et suppose une variation progressive de la résistivité en fonction de la profondeur. L'interaction des couches contiguës, quantifiée par :

$$I(n) = \exp - \log \frac{(n)}{(n+1)}^2 + \log \frac{(n)}{(n-1)}^2 \quad (4)$$

est utilisée pour pondérer les probabilités a postérieures. Le facteur de lissage assure la convergence de la chaîne de Markov.

||| Le lac Tritrivakely et ses informations a priori

Dans le cadre du programme d'étude des lacs de Madagascar mené par l'ORSTOM, une série de mesures géophysiques a été réalisée en 1992 par l'IOGA sur le lac Tritrivakely. La campagne avait pour objet de cartographier l'épaisseur des sédiments sous ce lac de cratère, avant la réalisation d'un forage de recherches paléoclimatiques.

Situé à 34 km au nord-ouest de la ville d'Antsirabe, sur le plateau d'Ankaratra, Tritrivakely (19°47' S, 46°55' E, 1 778 m) est constitué de coulées volcaniques plioquaternaires recouvrant un socle ancien métamorphisé.

❖ Les données

La cartographie audio-magnétotellurique (f=230 Hz) a permis de situer la région du lac où les sédiments sont les plus épais. C'est dans cette région qu'ont été réalisés les sondages électriques Schlumberger en croix que nous allons étudier. Les deux sondages ont été faits dans le lac lui-même avec des électrodes de longueur supérieure à 1,5 m, plus grande que la profondeur du lac lui-même. Les sondages électriques N-S et E-W sont représentés en **figure 1**. Une interprétation directe nous avait conduit à une modélisation en 2 couches, avec une première couche à 20 Ohm.m de 28 m d'épaisseur alors que le sondage réalisé par les paléoclimatologues (Gasse *et al.*, 1994) est toujours dans les sédiments à 40 m de profondeur.

||| Épaisseur des sédiments du lac Tritrivakely

Nous avons choisi pour l'inversion une loi a priori de nature uniforme peu contraignante par sa forme en prenant un modèle de départ de trois couches. Les résistivité apparentes sont supposées indépendantes les unes des autres et distribuées chacune suivant une loi de probabilité de nature gaussienne.

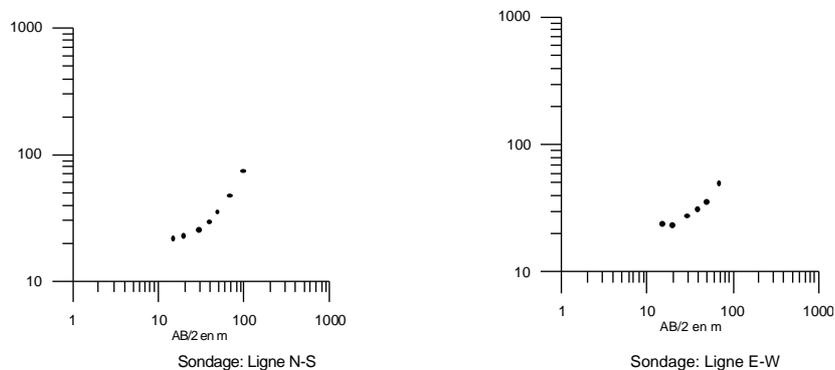


Figure 1 - Les sondages électriques (Dispositif Schlumberger)

Pour 400 tirages au sort réalisés, les lois marginales a posteriori pour cette inversion sont présentées sur la **figure 2**. Pour la première couche, la loi marginale de la résistivité présente un seul pic pour 20 Ohm.m, très net pour le sondage électrique E-W. La résolution de l'épaisseur est moins bonne, la valeur la plus probable est de l'ordre de 18 m. Pour la deuxième couche, la loi marginale de la résistivité présente plusieurs pics pour le sondage N-S. Elle ne peut pas être simulée avec une loi de distribution simple pour le sondage E-W. Le maximum se situe néanmoins autour de 20 Ohm.m. Pour l'épaisseur, la loi marginale est unimodale et ne donne aucune information supplémentaire.

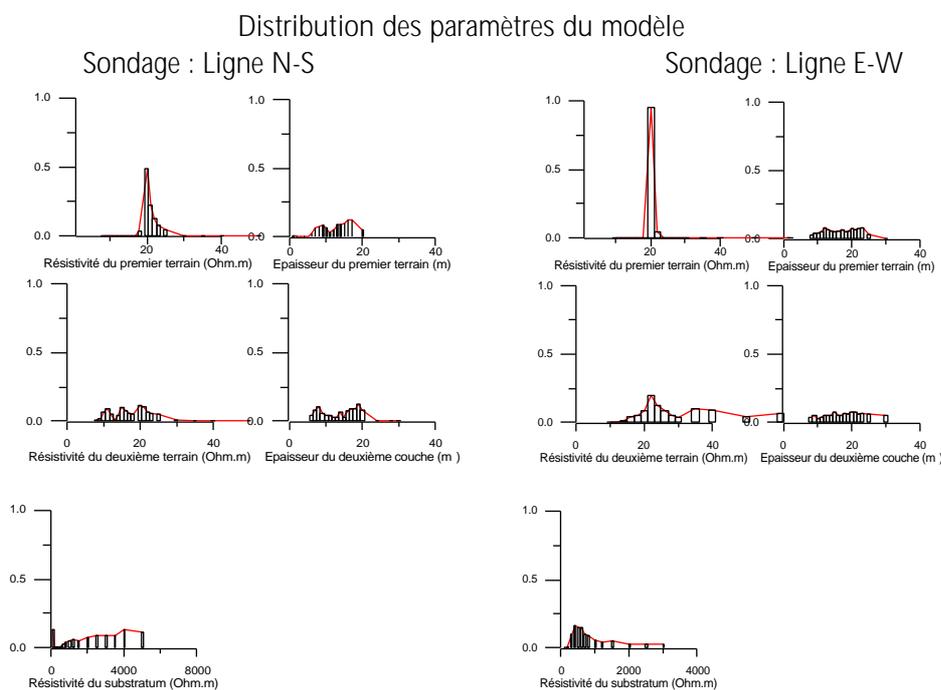


Figure 2 - Distribution a posteriori des paramètres du modèle : modèle à trois couches

Les lois marginales des résistivités de la couche 1 et de la couche 2 présentent un pic important pour des valeurs de résistivité voisines. Ceci montre clairement qu'un modèle à deux couches constitue une meilleure représentation de la distribution de la résistivité avec la profondeur. Cette analyse permet de déterminer si le nombre de couches impliquées dans l'hypothèse a priori est adéquat. Quand ce nombre est élevé, les paramètres en excès sont, soit non résolus, soit décrits par des lois marginales très similaires. Il faut remarquer aussi que la loi marginale de la résistivité du socle présente une allure très étendue, due à l'insuffisance de données pour résoudre ce paramètre.

Nous avons considéré ensuite un modèle a priori à deux couches (**figure 3**). Pour 200 tris aléatoires utilisés, nous observons que pour le sondage N-S, l'interface sédiment-socle est résolu, aussi bien que la résistivité. Les lois marginales a posteriori sont unimodales. Pour le sondage E-W, la loi marginale de

l'épaisseur est bimodale. Elle présente deux maximum équivalents, l'un pour une épaisseur de 25 m, l'autre pour une épaisseur de 35 m. Deux modèles sont donc susceptibles d'expliquer ces données de sondage. Dans ce cas, au lieu de considérer les valeurs les plus probables des paramètres, nous avons calculé leur valeur moyenne pondérée par les probabilités a posteriori. La variance est calculée autour du modèle moyen.

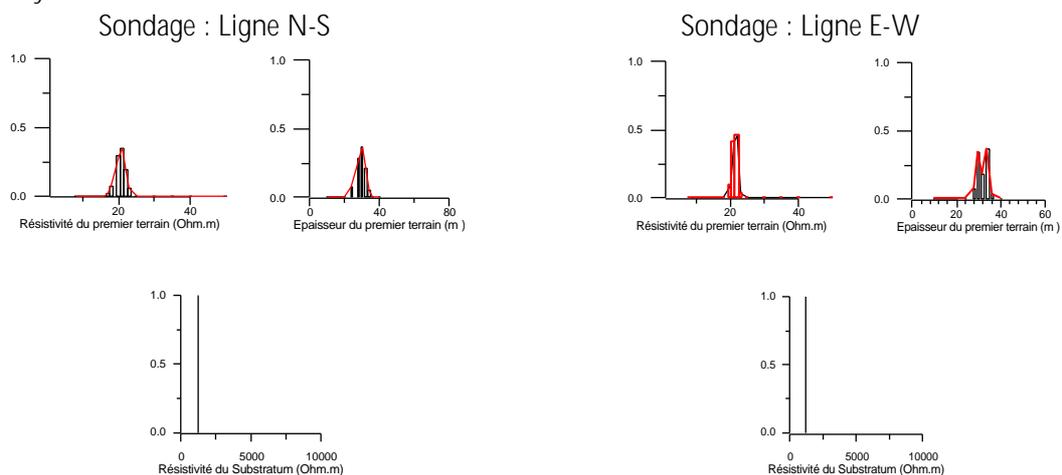


Figure 3 - Distribution a posteriori des paramètres du modèle : modèle à deux couches

Le fait de prendre 3 ou 2 couches nous permet de comprendre l'influence de l'information lorsqu'il y a erreur de spécification. Lorsqu'on introduit une couche supplémentaire dans l'information a priori, le nombre de paramètres augmente. Nous ajoutons une indétermination due aux interactions entre les paramètres, en particulier la corrélation entre épaisseur et résistivité.

Ce problème peut être abordé par les lois jointes. La **figure 4** présente une cartographie des lois jointes des différentes couches. Les régions d'amplitude maximale se situent autour des valeurs les plus probables de la résistivité et de l'épaisseur. La résistivité moyenne du sédiment reste toujours à 20 Ohm.m, par contre l'épaisseur estimée est proche de 39 mètres.

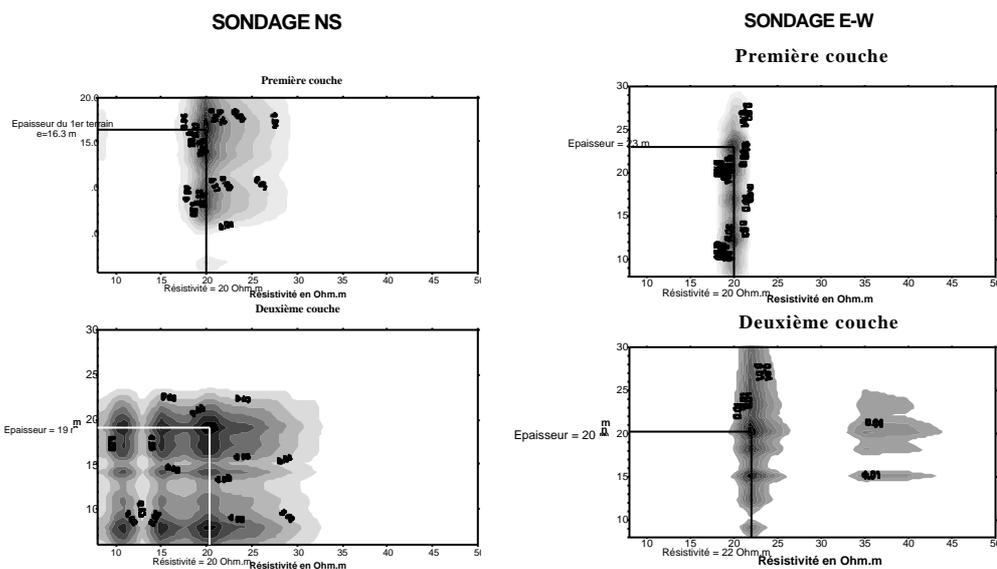


Figure 4 - Loi conjointe résistivité/épaisseur du modèle à trois terrains

L'autre possibilité qui nous est offerte consiste à découper le terrain en plusieurs plaques d'épaisseurs en progression géométrique. L'interaction des couches contiguës se manifeste par un décalage des pics des lois marginales pour l'une et une diminution de l'amplitude pour l'autre. L'effet de ce couplage peut être limité par simple filtrage qui consiste à pondérer les lois de probabilité à l'aide de la relation (4).

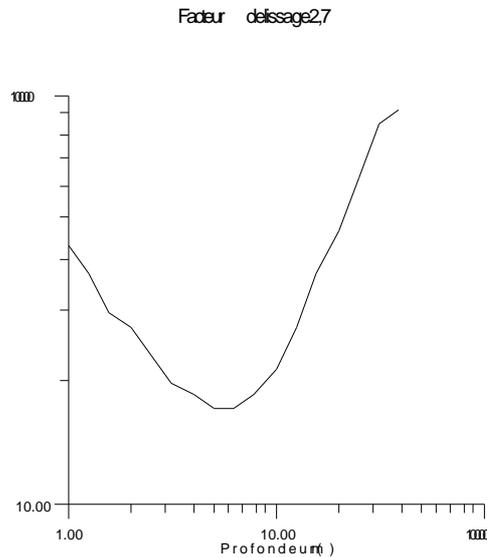


Figure 5 - Courbe de résistivité (Ohm.m) en fonction de la profondeur

La **figure 5** présente la courbe de résistivité en fonction de la profondeur pour un facteur de lissage de l'ordre de $\approx 2,7$. La comparaison entre le faciès lithologique vertical obtenu à partir des carottages et les résultats de l'inversion des données montre que les couches de résistivité différente correspondent à des dépôts sédimentaires bien identifiés. En particulier, d'après le sondage mécanique, la vase argileuse contenant des dépôts de matériaux organiques correspond au minimum de résistivité.

Conclusion

Ce travail montre que la statistique bayésienne permet non seulement de délimiter les solutions équivalentes mais d'obtenir également une distribution continue de la résistivité en fonction de la profondeur. L'échantillonnage de l'épaisseur en progression géométrique peut sembler une méthode lourde, mais elle peut être très utile pour des différenciations fines.

Bibliographie

- Bayes Th. (1702-1761), 1958. Essay towards solving a problem in the doctrine of chances, 1763, republished in *Biometrika*, 45, p. 298-315.
- Dey A., Morrison H.F., 1979. Resistivity modelling for arbitrary shaped three dimensional structures. *Geophysics*, 44 : 753-780.
- Gasse F., G.D.R. 970, 1994. A 36 ka environmental record in the southern tropics : Lake Tritrivakely (Madagascar). *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 318, série II : 1513-1519.
- Xu Shi-zhe, Zucheng Gao, Sheng-kai Zhao, 1988. An integral formulation for three-dimensional terrain modeling. *Geophysics*, 53 : 546-552.

Reconnaissance hydrogéologique par méthodes électrique et électromagnétique dans la région du Lac Ihotry, sud-ouest de Madagascar

**Eddy Rasolomanana¹, Yves Albouy², Michel Ritz³,
Laurent Robison⁴, Luc Ferry⁵, Joseph Ralaimaro⁵**

¹ Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, B.P. 1473, Antananarivo, Madagascar

² ORSTOM, Laboratoire de Géodynamique Interne, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

³ Centre ORSTOM, Laboratoire de Géophysique, B.P. 1386, Dakar-Hann, Sénégal

⁴ ORSTOM/Centre National de Recherche sur l'Environnement, Androhibe, B.P. 434, Antananarivo 101, Madagascar

⁵ Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (Antananarivo)

Abstract

"Lacs et Paléoclimats Malgaches" is an ORSTOM research project for understanding hydrological and hydrogeological behavior of lakes.

Near lake Ihotry, we have carried out a geophysical survey using Schlumberger electrical soundings and Time Domain ElectroMagnetics soundings (T.D.E.M.). These two methods are efficient for small resistivity variations. Some limestones which are good aquifers are well-identified. A structural preliminary scheme is proposed along a profile.

Introduction

La région étudiée se situe dans le sud-ouest de Madagascar au nord de la ville de Tuléar (**figure 1**) entre 21°36' et 22°24' de latitude sud et 43°30' et 44°24' de longitude est. La plaine du lac Ihotry, élément important de la région, est délimitée au nord-est par le fleuve Mangoky, à l'est par la route reliant Tuléar à Morombe et par une faille bien identifiée sur les images satellitaires, au sud par la rivière Befandriana et à l'ouest par une seconde faille s'étirant sur toute la côte sud-ouest.

Le premier objectif de l'étude était d'identifier les différents horizons constituant l'éocène supérieur et de proposer un schéma structural à l'échelle de la région. Le second objectif était de proposer un modèle d'écoulement souterrain, dans la périphérie du lac Ihotry, fondé sur les observations géophysiques : identification des aquifères, mise en évidence de paléo-chenaux et, éventuellement, d'un exutoire vidange-souterraine du lac dont l'eau est particulièrement chargée en saison sèche.

Aspect géologique et hydrogéologique de la région d'Ihotry : bassin de Befandriana

Le Bassin du lac Ihotry fait partie de la plaine côtière sédimentaire du sud-ouest de Madagascar (43°30' E et 44°24' E ; 21°36' S et 22°24' S) (**figure 2**). Il est constitué par deux ensembles morphologiques :

- le plateau oriental aux reliefs adoucis au SE et très vifs au NE ;

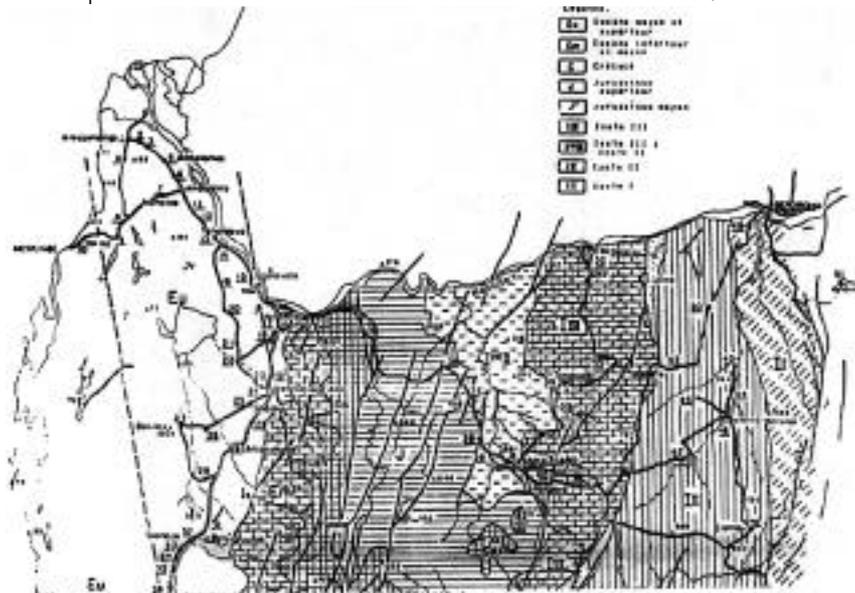


Figure 2 - Carte géologique de la région

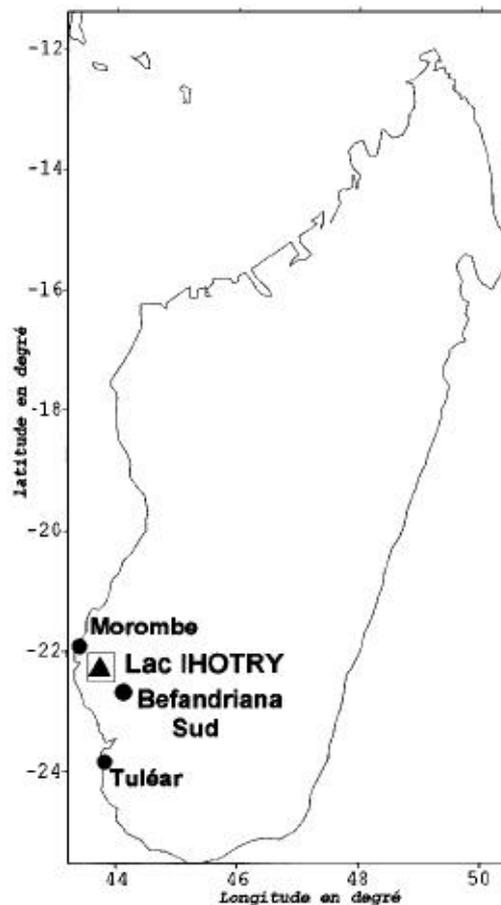


Figure 1 - Carte de localisation

- la plaine côtière, qui passe d'une altitude de plus de 200 m au sud à 50 m au niveau du lac Ihotry et du fleuve Mangoky.

❖ **Le plateau oriental**

➔ **Litho-structure**

Des formations marines éocènes à calcaires compacts, récifaux et détritiques constituent le plateau calcaire karstifié de Mikoboka à l'est. Le toit et le mur de ces formations sont des ensembles calcaro-argileux, des calcaires crayeux fins à marneux peu perméables et peu fracturés. Les fractures sont bien définies et nombreuses. Les accidents tectoniques sont caractérisés par :

- un soulèvement et un basculement vers le sud guidés par des failles normales (E-W, NNW-SSE) ;
- des failles de direction N-S et NW-SE (faille de Befandriana) ;
- des fractures de direction E-W et NE-SW.

➔ **Ressources en eaux**

Sur le plateau karstique, les réseaux hydrographiques s'organisent en trame plus ou moins serrée présentant des tracés linéaires sans direction précise, bien que quelques drains semblent mieux organisés. Les drainages principaux suivent les directions NE-SW, NW-SE à E-W. Ce plateau fait partie du grand système Mahafaly. Il renferme une réserve importante d'eau mise en évidence par forages (Salomon J.N., 1987). L'alimentation des aquifères se fait par :

- l'impluvium local en saison de pluies, amplifié par le passage des dépressions tropicales ;
- les pertes en rivières ;
- l'intercommunication entre les nappes inférieures et supérieures (crétacé gréseux, jurassique calcaire, éocène gréseux).

❖ **La plaine alluviale**

➔ **Litho-structure**

On observe au niveau de la plaine occidentale des dépôts de calcaires miocènes, à grains fins, très purs, des sables roux, des carapaces sableuses, des carapaces calcaires et des îlots de formations dunaires et basaltiques (anté-éocène et post-éocène). Les accidents tectoniques sont caractérisés par :

- un basculement vers le lac au nord ;
- des failles normales de direction E-W à NW-SE de faible ampleur, Befandriana-Talatavalo (Rapport JICA, 1991) ;
- des affleurements calcaires morcelés par plusieurs directions de fractures dont certaines sont colmatées (Bevoay) ;
- des affleurements calcaires aux environs (Ankarandoha : 21°53' S, 43°45' E) et au bord du lac ;

- des fractures ouvertes affectant la couche sus-jacente du calcaire éocène supérieur (talus RN9 : 21°48'30", 43°51'30") ;
- des barrières rocheuses formant des drains ou des écrans (amont source Milaraha) ;
- des affleurements basaltiques fracturés (Songary, Marovato, Ampanonga...) ;
- des pertes en rivières qui peuvent alimenter le lac (Befandriana, Andranankanga...) à l'étiage.

➔ *Ressources en eaux*

Les données disponibles (logs stratigraphiques, puits, sondages et analyses physico-chimiques des eaux) montrent qu'il y a au moins quatre types d'aquifère au niveau de la plaine alluviale :

- l'aquifère des calcaires karstiques (éocène moyen), semi-captif à captif sous la couverture, caractérisé par des émergences et des sources artésiennes (Mandevy, Andranonapelakely, Andranonapelabe...) ;
- l'aquifère des calcaires, des calcaires gréseux et des grès hétérogènes (éocène supérieur) fracturés, identifié par la source de débordement d'Ankamotsy ;
- l'aquifère des sables roux, caractérisé par l'affleurement des nappes dans les dépressions fermées (Marihy) ;
- l'aquifère des dunes, identifié par la présence des sources d'eau douce (Ihotry, Andohasakoa...).

Au niveau de la plaine alluviale, les zones humides à caractère saisonnier sont nombreuses (lacs, marais, dépressions fermées...). Hors saison des pluies, les écoulements de surface sont peu importants. En saison sèche, les écoulements venant du plateau calcaire se perdent dans le lit des rivières. L'alimentation des nappes se fait par :

- l'impluvium local ;
- l'intercommunication entre les différentes nappes ;
- les pertes en rivières (Bevato, Ankilimifafa...) ;
- des pertes sans doute importantes au niveau du lac Ihotry (endoréique, non saturé).

||| Méthodes géophysiques mises en oeuvre

❖ *La méthode TDEM*

C'est une méthode électromagnétique qui utilise une bobine d'émission dans laquelle circule un courant. Pendant l'émission de ce courant, un champ électromagnétique statique s'établit dans le sous-sol. Lors de la coupure brusque de courant, la force électromotrice induite dans le sous-sol produit des courants analogues aux courants de Foucault. Ceux-ci se propagent à travers le terrain et leur amplitude décroît avec le temps, produisant en surface un champ magnétique décroissant, qui est mesuré par la bobine réceptrice. L'analyse de la décroissance de ce champ pendant le temps où le champ primaire est coupé permet d'obtenir une courbe de la résistivité apparente en fonction du temps.

Sur la région, 29 sondages ont été réalisés (**figure 3**), en majorité sur le layon de direction est-ouest implanté par les compagnies pétrolières dans les années 80. Les autres se répartissent sur deux autres profils, de direction NNW-SSE et N. L'appareil utilisé est un PROTEM 47 de Geonics spécialement conçu pour

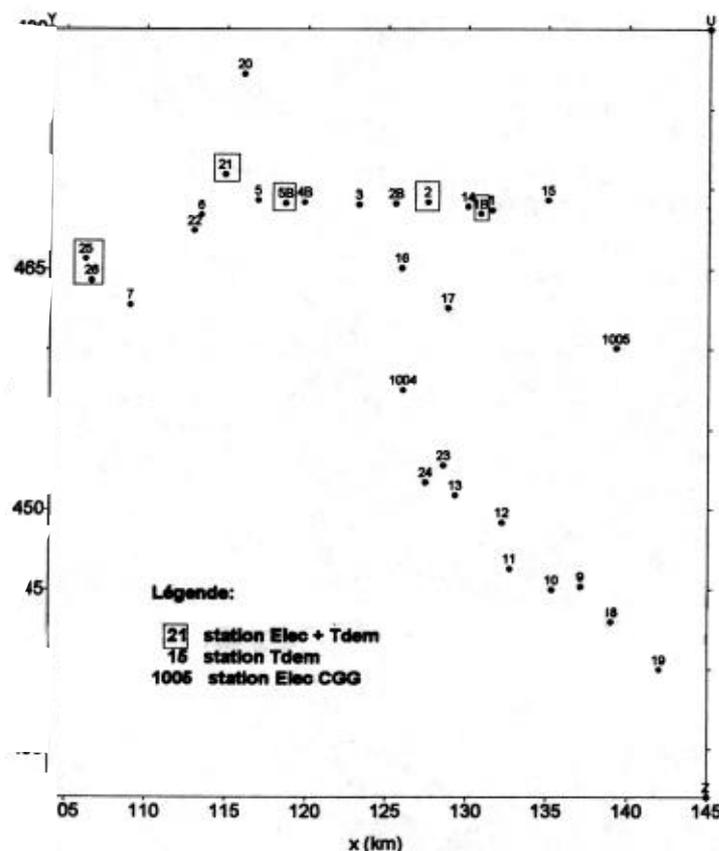


Figure 3 - Emplacement des stations

❖ La méthode électrique

Il s'agit d'une méthode potentielle donnant accès à la résistivité électrique des terrains. Elle est bien appropriée pour différencier les niveaux caractérisés par des grès et des calcaires d'assez fortes résistivités (80-6 030 . m), des marnes argileuses ou sableuses, des argilites ou des grès silteux ou boueux à faibles résistivités (3-35 . m). Elle convient aux faibles profondeurs d'investigation exigées par les études des eaux souterraines et caractéristiques hydrogéologiques recherchées sur le terrain.

A l'aide d'un résistivimètre ABEM SAS300, 7 sondages électriques ont été effectués. Leur emplacement est indiqué sur la **figure 3**. La valeur maximale de AB/2 choisie a été de 300 m, ce qui a permis une investigation verticale du sous-sol variant de la surface jusqu'à une centaine de mètres de profondeur.

||| Traitement des données et modélisation

Les modélisations ont été réalisées à l'aide du logiciel TEMIXGL d'Interpex en ce qui concerne les données TDEM et à l'aide du logiciel de J. Tabbagh pour l'électrique. Il s'agit d'une interprétation interactive utilisant un modèle géoélectrique 1D (milieu stratifié horizontalement) et aboutissant à l'établissement de modèles comprenant plusieurs terrains dont la résistivité et l'épaisseur sont déterminées (**figure 4**).

La corrélation de ces sondages peut être effectuée en particulier à l'aide de l'horizon conducteur (niveau 3). Le modèle définitif retenu tient compte de la lithostratigraphie locale établie à partir des reconnaissances sur le terrain et des coupes de sondage tirées d'études géophysique et hydrogéologique antérieures effectuées dans la région.

la subsurface. Il permet de mesurer le champ magnétique induit selon des canaux compris entre 0,007 et 7 ms et selon 3 cadences : 237, 62,5 et 25 Hz. Le dispositif de sondage centré a été choisi. Il permet une investigation à la verticale de la bobine de réception. En déployant une boucle carrée de 60 x 60 m, 75 x 75 m et notamment 100 x 100 m garantissant une pénétration maximale pour cet appareillage.

Afin d'améliorer la qualité des résultats, 3 séries de mesure par cadence ont été réalisées et moyennées.

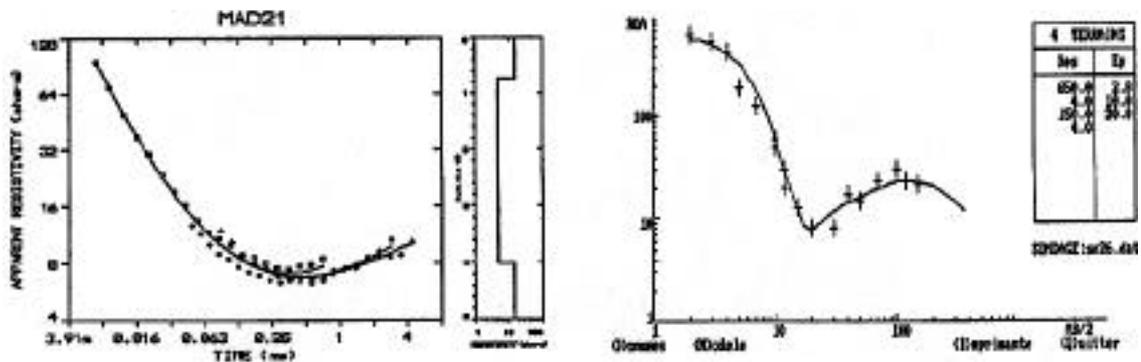


Figure 4 - Exemples de courbes modélisées de sondages TDEM et électrique

Le profil géoélectrique pris comme exemple peut être divisé en trois parties (figure 5) :

- une partie orientale constituée par 5 sondages qui donnent le modèle suivant (de haut en bas) :
 - des terrains superficiels de résistivité variable (300-450 . m) et d'épaisseur comprise entre 0,5 et 1 m (niveau 1)
 - un horizon peu conducteur (9-31 . m) et d'épaisseur assez constante de 8 à 12 m (niveau 2)
 - un niveau conducteur (4,8-10 . m) de puissance comprise entre 16 et 22 m (niveau 3)
 - une assise plus résistante (11,7-14,5 . m) constituant le niveau 4
- une partie centrale où l'on retrouve à peu près les mêmes formations. La seule différence repose sur les valeurs de résistivité du niveau 2 qui sont beaucoup plus élevées (500-1 700 . m). Le niveau 4 n'a pas été localisé par les sondages.

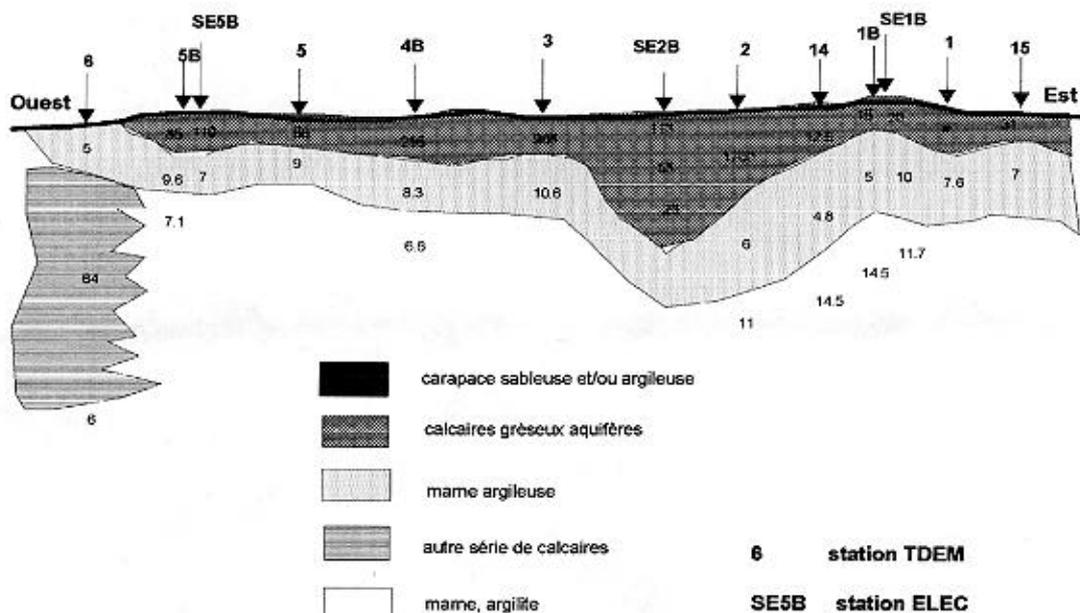


Figure 5 - Coupe géoélectrique le long du profil Pétrolier

- *une partie occidentale* caractérisée par sensiblement les mêmes formations que précédemment. L'assise constituant le niveau 4 est, par contre, nettement plus conductrice (6,6-7,1 . m). La station 6, à l'extrême ouest du profil, commence par le niveau 3 qui affleure à ce niveau, puis apparaît une autre formation calcaire résistante (64 . m) de 50 m de puissance et, en dessous, on retrouve l'assise conductrice (5,6 . m).

L'interprétation géologique fait intervenir sous la carapace superficielle sableuse ou argileuse, 3 terrains montrant des résistivités tout à fait compatibles avec la nature lithologique des 3 unités suivantes :

- calcaire gréseux et grès (niveau 1) constituant l'aquifère. Notons que, dans la partie orientale, on observe, sur plus de 4 km de long, des îlots d'affleurements relativement altérés avec des graviers de dimension décimétrique, d'où les faibles valeurs de résistivité enregistrées à ce niveau. Des affleurements calcaires apparaissent aussi près du Lac Ihotry ;
- un niveau constitué de marnes argileuses (niveau 3) ;
- une assise conductrice caractérisé par des argilites dans la partie orientale et par des marnes dans la partie occidentale.

Conclusion

Les résultats acquis par cette prospection géophysique montrent la possibilité d'effectuer un suivi de niveaux lithologiques aquifères ou non en terrains sédimentaires aussi complexes que ceux de la région du Lac Ihotry et de préciser l'épaisseur des formations ainsi que leur hétérogénéité lithologique.

La géométrie (basculement des formations vers le lac Ihotry), les conditions de mélange des eaux (souterraines/de surface) et le fonctionnement hydraulique des réservoirs contrôlés par l'existence de fracturations (post-éocène à l'actuel) se dessinent à travers l'interprétation des 3 profils géophysiques combinée aux données hydrologiques, hydrogéologiques, géochimiques et géologiques effectuées par l'ORSTOM dans cette région depuis plus de trois ans.

Les renseignements tirés de cette étude constituent, de ce fait, des éléments intéressants et précieux pour l'hydrologue, l'hydrogéologue et le géologue dans leurs essais de modélisation du bassin du lac Ihotry.



*Reconnaissance des structures anthropiques
(sites urbains, industriels...)*



Photo de Michel Dabas

Fouilles archéologiques à Alexandrie (Egypte)

*E*xemples d'utilisation des ondes de surface pour la reconnaissance d'objets du génie civil

Odile Abraham¹, Didier Blanchard², Grégoire Hévin¹

¹ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, route de Bouaye, B.P. 19, 44340 Bouguenais, France

² Université de Nantes, Faculté des Sciences et des Techniques, 2 rue de la Houssinière, 44072 Nantes cedex 03, France

Abstract

The determination of shear wave velocities in the upper layers of the ground meets needs of seismologists and engineers in soil mechanics. For instance, the shear wave velocity plays a major role in the assessment of seismic risk of particular sites. It also intervenes in the calculus of the shear modulus of the upper layers of the ground most needed for the study of the mechanical behaviour of soils under various loadings.

Methods relying on surface waves to determine shear wave velocities are an interesting alternative to cross hole methods often used in the field. These surface methods do not need bore holes and the propagation medium is excited with classical sources. The present knowledge of Earth Physics in this domain and the developments in computers and electronics make it possible to develop testing methods based on surface waves for civil engineering purposes.

In this paper the present state of the art of the Section Reconnaissance et Géophysique of the Laboratoire des Ponts et Chaussées is presented.

Introduction

L'utilisation des ondes de surface pour la reconnaissance des objets du génie civil n'est pas nouvelle. Les premières expériences avec des ondes de surface dans le génie civil furent principalement entreprises sur les chaussées avec des pots vibrants. Par exemple, dans les années 60 en France, le vibreur Goodman permettait la mesure de courbes de dispersion de l'onde de surface sur les chaussées (BL, 1968). L'exploitation des mesures consistait alors à comparer les courbes de dispersion mesurées à des courbes de dispersion théoriques. La lenteur des mesures et l'exploitation empirique des courbes de dispersion freinèrent l'essor de ces méthodes.

Dans les années 80, une nouvelle méthode nommée SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) vit le jour aux Etats Unis pour la reconnaissance des chaussées (Heisey et al., 1982 ; Nazarian S., et Stokoe I.K.H., 1985, 1986). Les progrès technologiques combinés à des modèles analytiques performants conduisirent à l'utilisation de sources impulsives et à l'inversion des courbes de dispersion. A l'heure actuelle, sources entretenues commandées par ordinateur (Matthews et al., 1996) et sources impulsives sont utilisées.

Depuis lors, le champ d'application de ces méthodes s'est étendu aux sols et aux structures. Après un rappel des principales propriétés des ondes de surface, nous présentons un cas d'application sur les sols et un cas d'application sur une dalle de béton.

Caractéristiques principales des ondes de Rayleigh

Dans un demi espace homogène et isotrope, 67% de l'énergie d'une source vibrant verticalement se propage en une onde de surface dite de Rayleigh, 26% en une onde de cisaillement (S) et 7% en une onde de compression (P) (Miller et Pursey, 1955). A la surface du sol, l'amortissement géométrique de l'onde de surface est en $1/r$ et celui des ondes de volume, S et P en $1/r^2$ où r est la distance à la source (Aki et Richards, 1980). Cet aspect énergétique montre que les ondes de surface vont être relativement faciles à générer et à mesurer.

L'amplitude des ondes de surface décroît exponentiellement avec la profondeur. Elles sont donc adaptées à l'étude des couches superficielles. D'autre part, la profondeur de pénétration des ondes de surface diminue avec la longueur d'onde et ne dépasse pas quelques longueurs d'onde. Si un milieu est par exemple stratifié, la vitesse de phase V_R des ondes de surface sera fonction de la fréquence f . C'est ce phénomène, appelé dispersion, qui est mis à profit dans les méthodes de reconnaissance.

Dans un modèle stratifié, la vitesse de phase des ondes de Rayleigh dépend de la vitesse des ondes S et des ondes P, de la densité et de la hauteur de chacune des couches. La vitesse des ondes S, V_s , est le paramètre le plus sensible.

Mesure de la courbe de dispersion

En pratique, dans la méthode SASW, la courbe de dispersion est obtenue à l'aide d'une source et de deux récepteurs (géophones ou accéléromètres). L'écartement des récepteurs, d , et leur éloignement de la source, L , dépendent des longueurs d'ondes considérées

(figure 1).

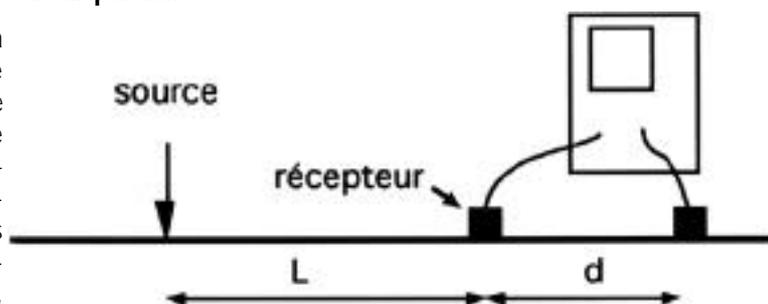


Figure 1 - Dispositif de base

Tokimatsu *et al* (1991) recommandent de suivre la règle suivante : $L \geq 4 \lambda$ et $d \geq 16 \lambda$

Si la source est un pot vibrant, le déphasage entre les deux récepteurs est déterminé pour chaque fréquence successivement. Si la source est impulsionnelle, la phase de l'interspectre des signaux est utilisée.

La vitesse de phase de l'onde de Rayleigh est reliée à $V_R(f)$ par l'expression $V_R(f) = \sqrt{\frac{2d}{\pi f}}$

Différentes valeurs de L et d sont couvertes soit en conservant la même position de la source, soit en gardant le point milieu des deux récepteurs, commun à toutes les mesures.

Le principal défaut de ce dispositif expérimental est de négliger l'influence des modes supérieurs. Il est possible d'y remédier en utilisant les algorithmes de traitement du signal classiquement utilisés en Physique du Globe (Herrmann, 1986).

Le Laboratoire des Ponts et Chaussées a été impliqué dans le développement des méthodes de reconnaissance basées sur les ondes de surface dès les années soixante (BL, 1968 ; Caprioli, 1991) pour l'auscultation des chaussées. Depuis quelques années d'autres domaines d'applications sont envisagés. L'objectif est d'adapter et de transférer le savoir faire des Physiciens du Globe à l'échelle de la dizaine de mètres pour les sols et de la dizaine de centimètres pour les structures.

Application à la reconnaissance des sols

C'est en partie parce que l'inversion des courbes de dispersion est possible, que les ondes de surface, libérées du carcan de l'interprétation empirique, connaissent un nouvel essor.

L'inversion des courbes de dispersion est d'autant mieux conditionnée que le maximum d'information a priori est disponible. Par exemple, les épaisseurs des couches et les vitesses des ondes P obtenues par sismique réfraction peuvent être incorporées au modèle initial. La sismique réfraction permet aussi de vérifier si l'hypothèse de tabularité utilisée lors de l'inversion est valide. Un système multicapteurs, qui permet la résolution des premiers modes, est de plus tout à fait compatible avec celui nécessaire à la sismique réfraction. L'exemple que nous donnons ci-après (**figure 2**) correspond à ce cas de figure. La courbe de dispersion obtenue par SASW est inversée à l'aide du logiciel de Herrmann (1986).

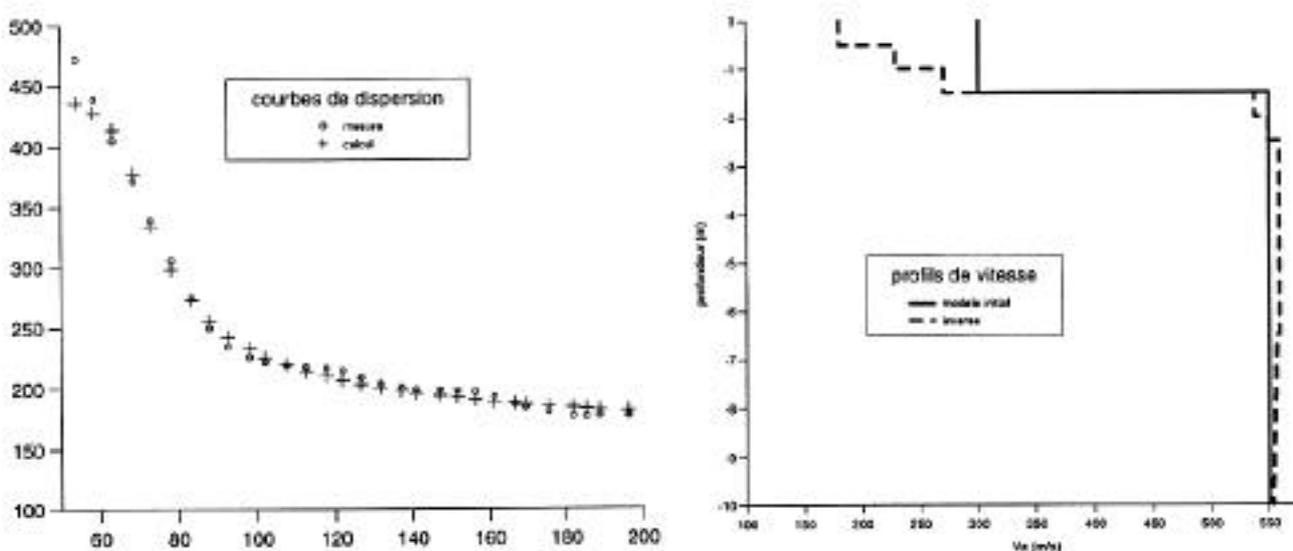


Figure 2 - Courbe de dispersion et inversion

Application à la reconnaissance des structures

Le vieillissement du parc des ouvrages d'art et le souci d'optimiser les coûts de maintenance tout en maintenant un haut niveau de sécurité font du Contrôle Non Destructif des ouvrages d'art un domaine de recherche d'actualité. Les ondes de surface peuvent être avantageusement utilisées pour leur auscultation. Par exemple, l'épaisseur endommagée de la surface d'un béton et ses caractéristiques mécaniques peuvent être étudiées en procédant comme pour l'auscultation des couches superficielles des sols à l'aide des courbes de dispersion de l'onde de surface. En 1997, le LCPC construira différentes dalles d'essais présentant de tels défauts.

La profondeur de pénétration, variable suivant la longueur d'onde des ondes de surface, peut aussi être mise à profit pour évaluer la profondeur d'une fissure débouchant en surface (Hévin et al., 1997). Une application similaire sur les sols consisterait à concevoir des tranchées pour isoler des régions de vibrations induites par exemple par des véhicules (Le Houedec et Picard, 1989; Aviles et Sanchez-Sesma, 1988). Dans cette application, le défaut débouchant agit comme un filtre passe bas sur les ondes de surfaces. Ce phénomène est illustré à partir de signaux synthétiques (figure 3).

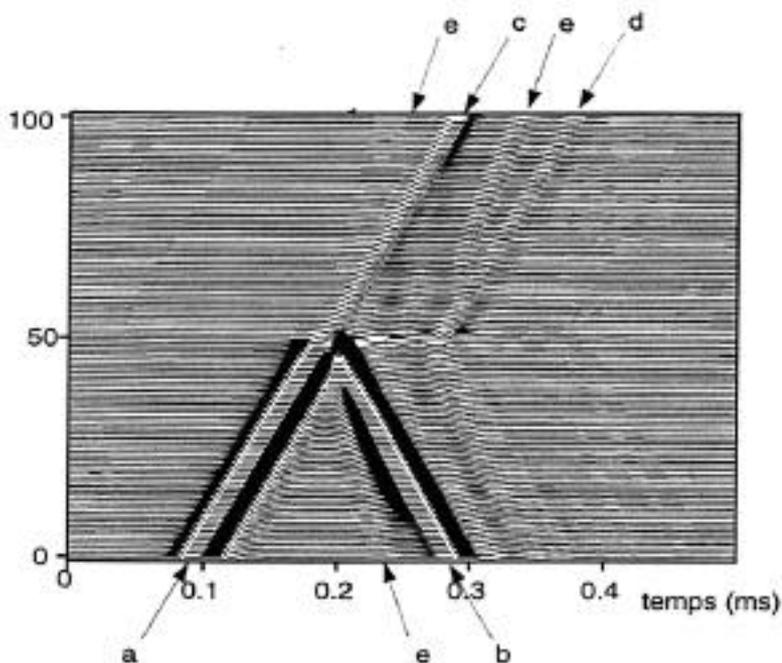


Figure 3 - Sismogrammes synthétiques d'une onde de Rayleigh incidente sur une fissure débouchante positionnée au niveau de la station 50.

a : onde de Rayleigh (R) incidente (pulse de Ricker), b : onde R réfléchie, c : onde R directement transmise, d : onde R transmise avec un décalage en temps, e : onde de volume provenant de la conversion de mode des ondes R.

Bibliographie

Aviles J., Sanchez-Sesma, F.-J., 1988. *Foundation isolation from vibrations using piles as barriers*. Journal of Engineering Mechanics, Vol.114, n°111, pp. 1854-1871.

Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology - Theory and practice*. 2 volumes, W.H. Freeman and Company.

Bulletin de liaison des laboratoires routiers - spécial J, juillet 1968. *Utilisation du vibreur Goodman en auscultation des chaussées*. LCPC - 58, bd Lefèbvre, 75015 Paris (France), 187 p.

Caprioli, P., 1991. *Auscultation structurale des sols et des chaussées routières à partir de la propagation d'ondes mécaniques totalement et partiellement guidées*. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg I.

Hévin G., Abraham O., Pedersen H., Campillo M, 1997. *Characterisation of surface cracks with Rayleigh waves : a numerical model*. Int. Conf. NDT-CE 97, Liverpool (UK).

Hesey J.S., Stokoe I.K.H., Hudsin W.R., Meyer A.H., 1982. *Determination of in situ shear waves velocities from spectral analysis of surface waves*. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin (USA), 277 p.

Herrmann R.B., 1986. *Computer Program in Seismology*. Saint Louis University (USA).

Le Houedec D., Picard J., 1989. *Analyse de la réduction de la propagation des vibrations dans le sol au moyen de tranchées ou d'écrans*. Colloque National AFPS, 18-20 Avril 1989, §IV, pp. 1-8.

Nazarian S., Stokoe I.K.H., 1985. *In situ détermination of elastic moduli of pavements systems by spectral analysis of surface waves method : practical aspect*. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin (USA), 161 p.

Nazarian S., Stokoe, I.K.H. 1986. *In situ détermination of elastic moduli of pavements systems by spectral analysis of surface waves method : theoretical aspect*. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 114 p.

Matthews M.C., Hope V.S., Clayton C.R.I., 1996. *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*. Proc. Instn Ci. Engrs Geotech. Engng, Vol.119, pp. 84-95.

Miller G.F., Pursey H., 1955. *On the partition of energy between elastic waves in a semi infinite solid*. Procceding of the Royal Society, London, Serie A, Vol.233, pp. 55-69.

Tokimatsu K., Kuwayama S., Tamura S., Miyadera Y., 1991. *V_s détermination front steady state Rayleigh wave method*. Soils and Foundations, Vol.31, N°2, pp. 153-163.

*P*rospection électrique pour l'étude de glissement de terrain dans la région volcanique du Pichincha (Equateur)

Marie-Hélène Ardisson^{1,2,3}, Yves Albouy¹, Vincent Risser², Xu Shi Zhe⁴

¹ ORSTOM, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France

² ORSTOM, A.P. 1711, 6596 Quito, Equateur

³ Laboratoire de Géophysique d'Orléans, 30 avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans, France

⁴ Institute of Geology and Geophysics, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003, Pop. Rep. of China

Abstract

The aim of this work was to evaluate the landslides risks on the volcano El Pichincha in Ecuador, in estimating the thickness of the conductive layer that may slide.

The method used were electrical Schlumberger soundings. The main problem encountered during the interpretation was the topographic effect

A correction had been used that revealed the real apparent resistivity curve and the anisotropy of the site.

Introduction

Dans le cadre d'un projet équatorien SISHILAD, lancé par L'EMAAP-QUITO, l'entreprise d'eau potable de la ville de Quito, des prospections géophysiques ont été réalisées sur les flancs du volcan El Pichincha .

Cette note présente les principaux résultats obtenus en sondages électriques Schlumberger qui contribuent à la compréhension de la nature des terrains et de leur répartition spatiale.

La méthode utilisée pour la prospection est classique mais son utilisation en région montagneuse est difficile, des traitements de correction topographique étant nécessaires dans certains cas.

Cadre géologique et limites du terrain

L'étude a été faite entre 2 900 m et 4 100 m d'altitude, partant de zones habitées qui reposent sur d'épaisses couches de cendres jusqu'aux crêtes. Des études pédologiques ont montré la présence de deux fines couches de pierres ponces blanches (20 cm d'épaisseur en moyenne).

Les données géologiques de base étant peu nombreuses, des compléments ont été apportés par l'observation directe sur le terrain. De nombreuses voies d'eau, dites acéquiás, découpent le paysage. Elles limitent ainsi les lieux de sondages possibles. En effet, il est difficile d'étendre des câbles de plus de 100 m de long sans rencontrer de cours d'eau, or, 100 m est la longueur minimale nécessaire en AB/2 pour obtenir une courbe de résistivité apparente significative. Il a fallu parfois étendre les lignes dans le sens de la pente. D'autre part, d'anciens glissements sont recouverts par la végétation. Il est souvent difficile de se rendre compte de cette situation lorsque l'on se trouve sur le terrain. L'on peut, malencontreusement, effectuer un sondage sur des terrains de nature différente qui semblent a priori identiques : le terrain glissé et le terrain en place. De très fortes hétérogénéités latérales peuvent apparaître dans ce cas : ces glissements superficiels sont fréquents et peuvent s'étendre sur 150 m de long.

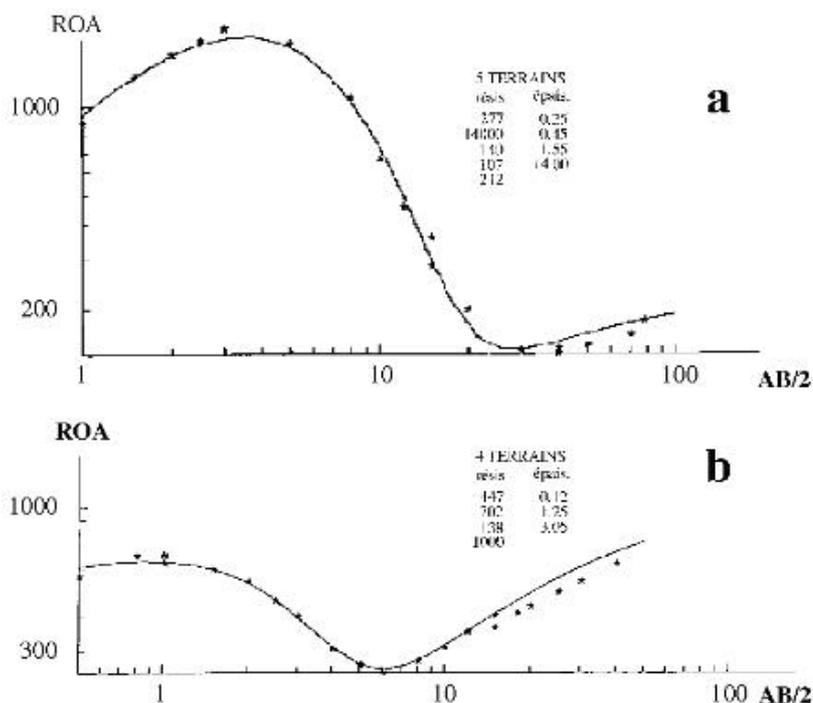


Figure 1 - Deux modèles interprétatifs 4 ou 5 terrains et les courbes correspondantes en trait plein. Les valeurs mesurées sont figurées par des points

L'eau de pluie qui s'infiltre se retrouve dans le rio. Mesurer la conductivité de l'eau du rio permet d'imposer une limite maximale à la conductivité du terrain

Au fond des vallées, la résistivité de l'eau du rio est de 60 m. Cette valeur augmente en altitude, l'eau y étant plus pure.

Interprétation

Les courbes de résistivité obtenues sont de type quatre ou cinq terrains (**figures 1a et 1b**).

En imposant les deux couches de pierres ponces très résistantes lors de l'interprétation, on obtient un deuxième terrain très résistant, à plus de 10 000 Ohm.m (**figure 1a**).

Des glissements ont été observés dans les zones médianes : les secteurs où l'on a trouvé une épaisseur de terrain conducteur plus importante qu'ailleurs. Nous avons observé sur un glissement récent que l'instabilité du

terrain était due à une couche de sable oxydé d'origine inconnue, où les traces de circulation de fluides sont nettement visibles. Cette couche se trouve à environ 2 m de profondeur, elle est épaisse de 2,50 m. Un sondage a été fait au-dessus de ce glissement (**figure 1b**) et a permis d'obtenir la résistivité du terrain qui provoque le risque : environ 140. L'interprétation unidimensionnelle a été réalisée avec un programme du CNRS de Garchy (J. Tabbagh) et un programme russe IPI-1D (V. Shevnin). Une interprétation à 2 dimensions a été tentée mais l'éloignement des sondages rend cette approche difficile.

Il a été néanmoins possible de comparer les sondages des différentes zones et de voir aussi l'évolution du terrain conducteur, des crêtes aux zones basses. Les résistivités sont plus élevées sur les crêtes et beaucoup plus faibles dans les zones médianes.

Dans les zones basses, les couches conductrices sont plus épaisses : c'est la Kongawa, une couche de cendres compactées qui retient l'eau. Les habitations sont construites sur cette terre très stable et malgré son importante conductivité, les risques dans cette zone sont minimes. Seules les zones médianes présentent des caractéristiques propices aux risques de glissement, c'est-à-dire que l'instabilité du terrain est due aux pierres ponceuses et aux sables, lieux d'une importante circulation des fluides.

La topographie

Les problèmes dus à la topographie sont connus en prospection géophysique, souvent mentionnés, rarement pris en compte numériquement. Bien que la plupart des sondages aient été effectués parallèlement aux lignes de niveau, l'extension des lignes à 100 m en AB/2 ne peut qu'induire certaines erreurs dues à la topographie. Les dernières résistivités apparentes qui augmentent ou diminuent brutalement en fin de courbes peuvent être dues respectivement à une bosse ou un creux topographique en fin des lignes. Les dernières données sont alors peu fiables. Une correction topographique est nécessaire, ceci impliquant une connaissance exacte de la géométrie du profil. Ainsi, deux sondages ont été corrigés par un programme de correction topographique, développé par l'un de nous (Xu Shi Zhe). L'un des sondages, Antenne 2, a été mené perpendiculairement au sens d'une coulée, et l'autre, Antenne 3, le long de la coulée (**figure 2**). Une faible longueur en AB/2 du sondage perpendiculaire est insuffisante pour comparer deux sondages en croix car les différences apparaissent pour des AB/2 assez grands. Néanmoins, sur les sondages en croix effectués, il est possible de voir les effets dus à la topographie et de calculer une résistivité apparente due à la topographie, ρ_{top} . La résistivité corrigée de la topographie est ρ_{cor} avec $\rho_{cor} = \rho_{obs} / \rho_{top}$

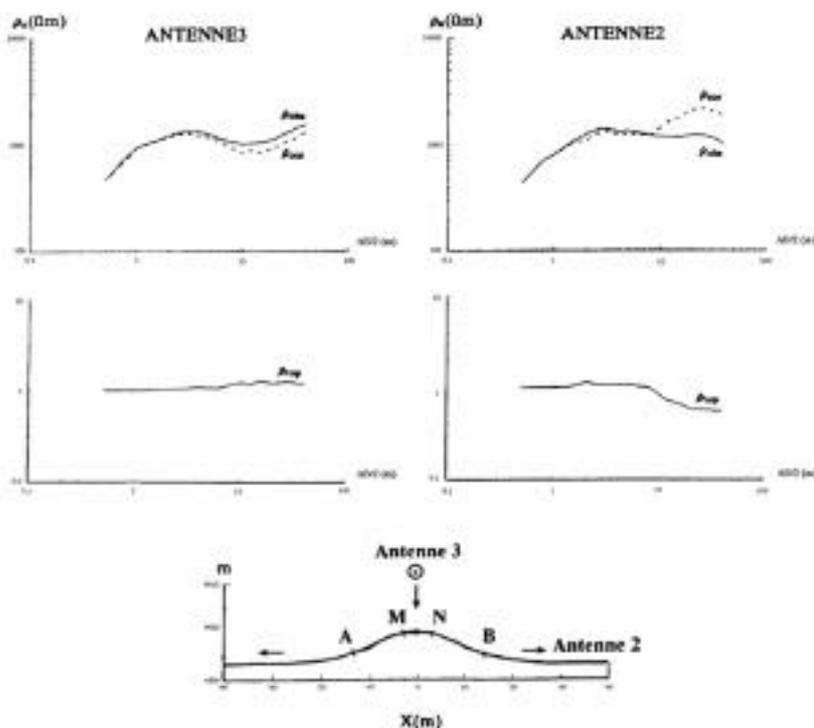


Figure 2 - Effet de la topographie, représentée au bas, soit parallèlement à l'axe : antenne 3 ; soit perpendiculairement : antenne 2



Figure 3 - Photographie de la section topographique

ρ_{obs} étant la résistivité apparente mesurée. Le sondage Antenne2, perpendiculaire à la coulée, présente, avant correction, une faible chute des résistivités à partir de $AB/2=20$. Le sondage parallèle à la coulée, Antenne 3, montre une courbe de résistivité apparente qui croît pour des $AB/2$ élevés. La correction topographique est considérable sur Antenne 2 pour les $AB/2$ supérieurs à 10 m, et se traduit par une forte remontée des résistivités apparentes. La courbe de résistivité corrigée reste différente de la courbe de mesure le long de la cou-

lée, ce qui ne nous surprend pas étant donnée la forte anisotropie que l'on peut attendre suivant le sens de la coulée et suivant sa perpendiculaire.

Conclusion

Bien que la méthode de prospection soit simple, il est souvent nécessaire de corriger les données mesurées de l'effet topographique, et donc de mesurer, à mieux que le mètre, les différences d'altitude sur un sondage. Les sondages en croix menés pour étudier l'anisotropie d'un terrain peuvent être utilisés à titre de comparaison dans un terrain à fort relief.

Les problèmes de topographie ont été évités tant que possible durant cette étude, en orientant les sondages électriques parallèlement aux courbes. Aussi, les résultats obtenus quant à la détection des terrains à risques restent fiables. On peut confirmer la fragilité des terrains des zones médianes. Le risque pour la population reste faible étant donné l'éloignement des régions habitées par rapport au volume susceptible de glisser.

Rcherche de potentiels sableux en milieu alluvionnaire remanié Prospection électromagnétique de subsurface EM31

Viviane Borne, Thierry Marguet¹

Calligée - Atlanpole, 1 rue de la Noe, B.P. 82118, 44321 Nantes cedex 3, France

Abstract

Successive dredgings of the Loire channel have produced a large volume of sediments which have been decanted on dyked lands. The Port Autonome de Nantes Saint Nazaire asked Calligée to look for sand zones and characterize them, in order to use it again as backfilling material. The electromagnetic mapping method (EM31) seems to be acceptable in this particular context, with a perfect correlation between the conductivity and the thickness of sand. The maps of isoconductivity could have been reinterpreted into isothickness, by calibrating enregistred values with bore-holes.

Les dragages successifs du chenal de la Loire ont produit un volume considérable de sédiments de nature variée, qui ont été déposés en bord de Loire sur des secteurs endigués.

Afin de valoriser la fraction grossière de ces dépôts comme matériaux de remblais, le Port Autonome de Nantes Saint Nazaire (P.A.N.S.N.) a demandé à la société Calligée de réaliser des investigations visant à localiser et caractériser les pôles sableux exploitables.

Le polyphasage des différentes périodes de dépôt et la multiplicité des points de rejets a développé sur les 350 hectares de surfaces réceptrices un véritable mille-feuilles lithologique avec de fortes hétérogénéités latérales et verticales, associées à des figures sédimentaires (granoclassement, chenaux...).

La méthodologie à mettre en oeuvre devait donc répondre à plusieurs critères :

- disposer d'une méthode de reconnaissance légère (zones par endroit non stabilisées),
- limiter la profondeur d'investigation à la subsurface (épaisseur moyenne des dépôts compactés : 4 m),
- reproductibilité des valeurs (impossibilité de couvrir toute la zone de dépôt en "instantané"),
- stabilité des valeurs enregistrées en fonction des cycles tidaux,
- aptitude à différencier les zones vasardes des sites sableux dans un contexte conducteur (nappe subaffleurante).

Le choix de la méthode s'est porté sur le conductivimètre EM-31 de GEONICS. L'appareil s'est révélé très performant pour répondre aux objectifs de l'étude, avec une excellente corrélation entre les conductivités et l'épaisseur des sables.

L'appareil est portable par une seule personne. Son mode d'acquisition automatique en continu couplé avec une centrale d'acquisition permet de couvrir rapidement de grandes surfaces. La profondeur d'investigation en mode dipôles verticaux (HCP), est, selon le constructeur, de 6 m.

La reproductibilité des valeurs sur le site est exceptionnelle avec quasiment 100% de corrélation entre 2 campagnes espacées de 4 mois (**figure 1**).

La fiabilité des mesures est parfaite. La variation journalière sur un cycle de marées à fort coefficient (< à 4 mS/m) est négligeable devant les contrastes existant au sein des sédiments (entre 10 et 350 mS/m⁻¹).

Etant donné les rapides variations latérales de faciès et le mode d'acquisition en continu des mesures, la bonne représentativité géographique des valeurs enregistrées passait par une solide phase préalable de repérage au sol.

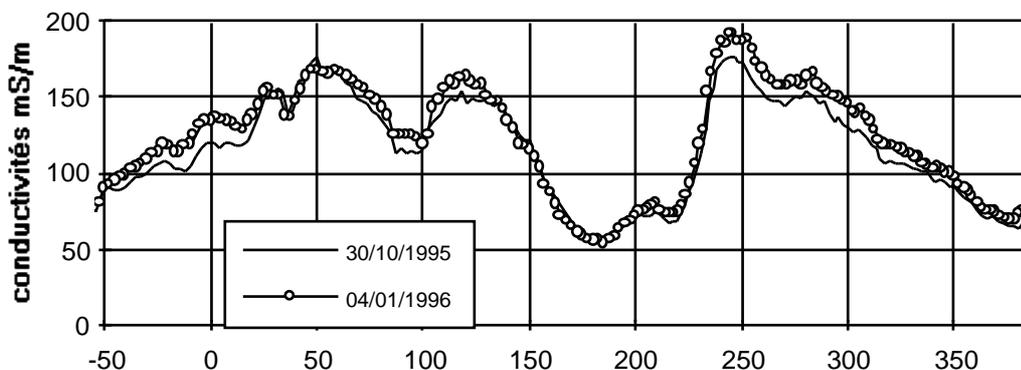


Figure 1 - Reproductibilité des mesures EM31 entre deux campagnes espacées de deux mois

Ainsi, la surface prospectée a fait l'objet d'un piquetage systématique des profils avec un repère tous les 25m. Par la suite, ces repères ont fait l'objet d'un nivellement.

Les profils géophysiques ont suivi un quadrillage 50 m x 50 m. Sur chaque profil longitudinal et transversal, la fréquence de mesure a été fixée à 2 secondes, soit statistiquement une mesure tous les 2 mètres.

Le traitement des enregistrements passe par des logiciels graphiques avec un paramétrage soigné des formules d'interpolation (krigeage) adapté à la maille de mesure. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes d'isoconductivité.

Ces cartes délimitent des zones homogènes, avec une première approche qualitative du potentiel sableux au sein de chaque zone. Elles servent de guide pour optimiser l'implantation des sondages de reconnaissance afin d'étalonner les gammes de conductivité. Au total, ce sont 369 sondages qui ont permis de valider la pertinence des cartes de conductivité. L'éventail des techniques de reconnaissance employées était varié : tarières sur chenille, pelle mécanique, pénétromètres dynamiques (type PANDA et BEVAC), tarière portable (percussion, minuteman). La densité des sondages est fonction de l'intérêt du secteur et le choix de la méthode d'observation directe tient compte de la capacité portante des matériaux en place.

De ces contrôles *in situ*, il ressort que :

- Au sein d'une même zone endiguée, la relation conductivité/épaisseur des sables est sub-linéaire, avec un très bon facteur de corrélation. Les zones conductrices (> 200-250 mS/m) sont essentiellement argilo-vaseuses alors que les gisements sableux les plus intéressants correspondent aux secteurs les plus résistants (< 50 mS/m).
- Les gammes de conductivité ne sont pas forcément transposables d'une zone endiguée à une autre. La relation conductivité/épaisseur des sables doit être actualisée sur chaque zone endiguée.
- Le croisement des cartes de conductivité et des logs lithologiques a permis de mieux comprendre la dynamique des dépôts. Une coupe type précisant l'agencement vertical des différents faciès a pu être dressée pour chaque contexte (éloignement par rapport à un point de rejet...). Ces observations directes permettent d'affiner les interprétations des variations de conductivité, c'est à dire de les considérer soit comme des variations d'épaisseur, soit comme une variation du pourcentage d'argile dans le sédiment.

Enrichies des informations quantitatives et qualitatives tirées des sondages de reconnaissance, les cartes de conductivité peuvent être retranscrites en cartes d'isoépaisseur des sables, après avoir validé les différents ratios de conversion conductivité / épaisseur de sable sur chaque zone d'étude.

Les **figures 2 et 3** illustrent la démarche exposée ci-dessus pour une zone de dépôt.

Sur la carte de conductivité (**figure 2**), les valeurs inférieures à 100 mS/m se regroupent dans trois secteurs principaux :

- Au centre de la carte, un secteur à fort intérêt potentiel puisque la courbe enveloppe de 100 mS/m est très étendue, avec un pôle central au sein duquel les conductivités chutent en dessous de 50 mS/m sur au moins 2 hectares.
- A l'Est deux digitations plus résistantes qui rappellent plutôt un remplissage de chenal.

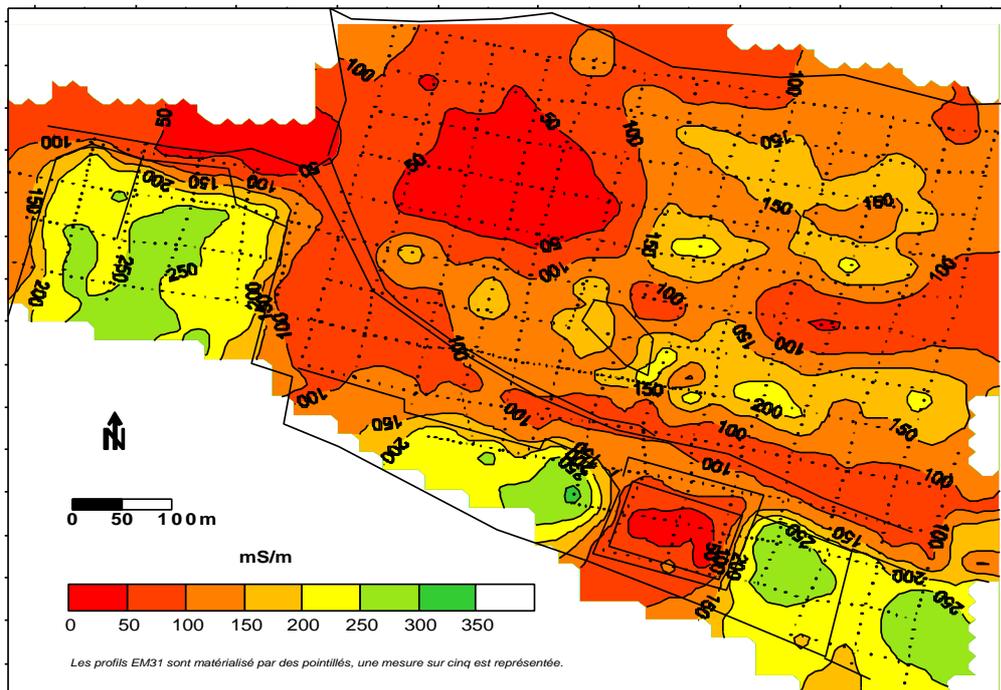


Figure 2 - Carte de conductivité - zone 3 - P.A.N.S.N.

La carte d'épaisseur des sables (**figure 3**) se corrèle parfaitement aux mesures géophysiques. Les sondages de reconnaissance ont confirmé les trois gisements potentiels mis en évidence par les conductivités. Les épaisseurs maximales de sable se localisent effectivement sur les plus faibles conductivités.

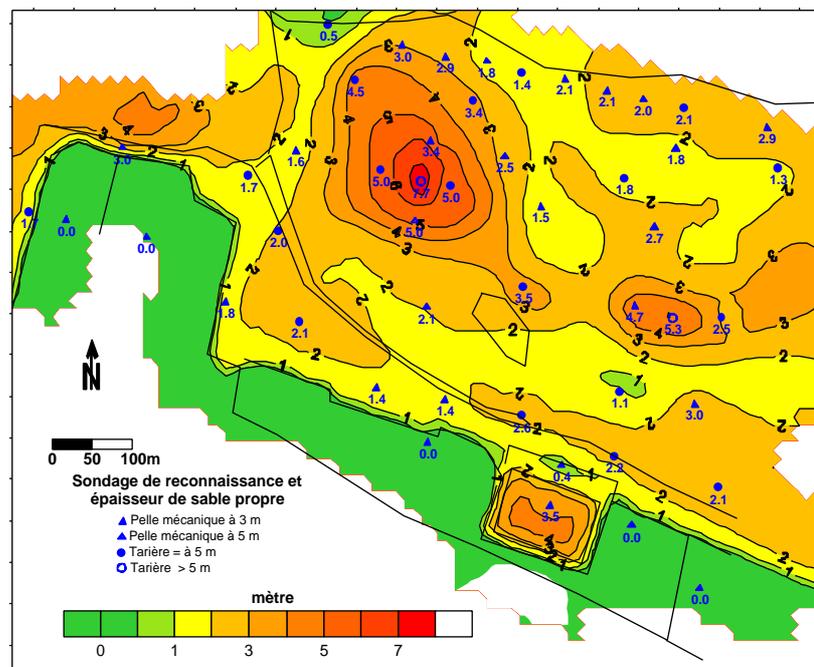


Figure 3 - Épaisseur des sables propres (m) - zone 3 - P.A.N.S.N.

La géophysique s'est révélée être un précieux outil d'aide à la compréhension des modalités de répartition spatiale des pôles sableux. Cependant, l'interprète humain doit rester vigilant pour différencier les contextes qui donneront une signature identique en conductivité mais qui ne répondent pas aux mêmes exigences de productivité.

La prospection géophysique : une aide à l'interprétation stratigraphique des "Terres Noires" archéologiques

Catherine Féchant¹, Christian David², C. Benech¹

¹ Université P. et M. Curie, Département de Géophysique Appliquée, 4 place Jussieu, case 105, 75252 Paris cedex 05, France

² Association pour les Fouilles Archéologiques Nationales (AFAN), 1 av. du Général Leclerc, 94200 Ivry-sur-Seine, France

Abstract

In the northern part of France, archaeological deposits of "dark earth" commonly rest upon relic Roman floor levels and continue upwards into overlying Medieval deposits. Because stratification cannot usually be observed, their thickness varies from 0,3 to 1 meter, and they contain very few archaeological features, the origin and significance of these sediments are difficult to explain. This is the reason why we applied on the archaeological site of the boulevard Saint-Michel car park (Paris, France), a series of geophysical methods as an help for stratigraphical interpretation of those enigmatic deposits.

We used three methods: temperature measurements by infra-red radiometer, magnetic viscosity and electrical resistivity. Measurements were achieved point by point on a vertical plan corresponding to the north side of a trench.

The map of resistivity points out a discontinuity in the trench which was not visible to the archaeologists; magnetic viscosity measurements show the absence of magnetic viscous materials.

These results will be completed by image analysis of the photography of the trench, the data of which will be correlated to resistivity. This study will be extended to other type of data

This first approach leads to the elaboration of a protocol which will be based on the simultaneous use of the different methods. For a best understanding of the nature of this deposits, we plan to complete these studies by sample analysis which will be performed in collaboration with the applied Geology laboratory of the University Paris VI.

Position du problème

La fouille archéologique en contexte urbain nécessite l'observation de la stratigraphie afin d'individualiser des couches dont l'analyse de l'agencement concourt à l'établissement d'une chronologie relative. Le mobilier contenu dans chaque couche permet ensuite le calage sur une chronologie absolue. L'examen de la morphologie de chaque unité ainsi définie, de ses constituants et des associations de mobilier archéologique aboutit normalement à une interprétation fonctionnelle reposant sur un référentiel établi au cours de l'histoire de la recherche archéologique.

Ces méthodes mises en œuvre généralement avec succès dans le cadre de l'archéologie urbaine se révèlent insuffisantes pour la compréhension de certains dépôts, notamment ceux qui s'intercalent entre les niveaux gallo-romains et médiévaux, datés faute de mieux dans l'intervalle séparant les périodes gallo-romaines et médiévales mieux reconnues sur le terrain.

Les premiers à prendre en compte ces niveaux difficiles à appréhender furent les anglais. Appelés outre-Manche "dark earth", ces dépôts ont fait l'objet d'investigations sérieuses reposant largement sur l'utilisation de la micromorphologie et son cortège de procédures analytiques (études de lames minces du sédiment pour la reconnaissance des constituants, des mécanismes d'accumulation et analyses chimiques, notamment le dosage de la matière organique). À partir d'une meilleure connaissance du contexte sédimentaire, on a appliqué dans de bonnes conditions les méthodes et techniques d'étude du contenu des sédiments (le contenu végétal, le contenu animal et le contenu archéologique en développant des méthodes spécifiques, comme l'évaluation de l'usure des artefacts). Les anglais ont pu montrer ainsi que les dépôts omniprésents de "dark earth" étaient engendrés par des mécanismes anthropiques ou naturels variés postérieurs au III^{ème} siècle de notre ère.

Au cours des fouilles parisiennes du Collège de France (1994) et du boulevard Saint-Michel (juillet 1994 à février 1995, septembre 1995 et décembre 1996 à début février 1997), nous nous sommes largement inspirés du protocole anglais. Ici, ces dépôts, que nous avons qualifiés également de "terres noires", appartiennent chronologiquement à l'Antiquité Tardive et au Haut Moyen-Age. Ils sont fréquents en archéologie urbaine de France du Nord où ils se distinguent par leur forte épaisseur, une absence de stratification évidente et leur couleur sombre.

La grande quantité de matériaux résiduels des périodes chronologiques antérieures (gallo-romaines), le manque flagrant d'organisation interne de ces dépôts et la faible quantité d'artefacts à valeur chronologique, relatifs à la période concernée, rendent ces terres noires difficiles à étudier, tout particulièrement dans le contexte de l'archéologie de sauvetage.

Pour une même période, des informations sont disponibles sur l'occupation funéraire, sur des édifices ecclésiastiques et, moins souvent, sur les structures castrales et palatiales, mais les formes du site urbain dans leur ensemble, les réseaux, les parcellaires et surtout les structures d'habitat restent méconnus.

Ces dépôts suggèrent, selon les archéologues, une paupérisation de la société urbaine, un apport pour la mise en culture marquant un changement de gestion de certaines parties de l'espace urbain, une période d'abandon d'un secteur de la ville et, éventuellement, une discontinuité de l'occupation urbaine.

La compréhension du mode d'anthropisation des terres noires du Collège de France et du boulevard Saint-Michel peut permettre de discuter de leurs significations dans le tissu urbain parisien de la fin de l'Antiquité Tardive et du Haut Moyen-Age, notamment afin de retracer l'évolution de l'organisation urbaine durant ces époques.

Le protocole que nous avons adopté jusqu'à présent repose, sur la lecture méticuleuse des coupes stratigraphiques suivie de la fouille fine de ces dépôts favorisant une étude approfondie du mobilier et, sur l'intervention de la micromorphologie, la palynologie, la malacologie et la paléo-parasitologie pour élargir le champ d'investigation.

Nous avons pu mettre en évidence le caractère d'accumulation progressive de dépôts. Ceux-ci sont aussi

le siège d'une activité biologique intense, mais ils sont particulièrement avares en informations claires sur les activités humaines qui, pour tant, contribuent probablement à leur formation.

Sur le site du boulevard Saint-Michel, il a été possible d'identifier, à la fouille, des fosses et des creusements linéaires liés sans doute à l'organisation parcellaire ou à l'habitat. Toutefois, cette structuration n'est pas assez suffisante pour permettre d'enrichir, de façon significative, nos connaissances sur l'organisation passée de ce quartier. Des doutes subsistent sur l'adéquation de nos méthodes et techniques d'investigation au problème que nous nous attachons à résoudre concernant l'habitat et les activités dans les villes du Haut Moyen-Age.

Une des difficultés majeures que nous rencontrons dans l'étude des terres noires tient au contexte de l'archéologie de sauvetage où nous évoluons. Ces dépôts ne délivrant que difficilement et avec parcimonie leur contenu informatif, ils ne sont pas considérés comme une priorité de la recherche archéologique. Nos interventions se sont déroulées, pour le moment, lors de l'opération de fouille et il serait souhaitable d'intervenir efficacement avant la prise de décision sur les orientations de la fouille archéologique, c'est à dire en amont, pendant les courtes phases d'évaluation archéologique. C'est pourquoi nous avons tenté de **développer sur le site du boulevard Saint-Michel, des méthodes d'aide à l'interprétation stratigraphique basées sur l'utilisation des outils de la géophysique**, qui conjuguent prêle mise en œuvre et production rapide d'un résultat. Allié aux observations archéologiques, celui-ci peut enrichir le dossier archéologique, et pourrait jouer en faveur d'une meilleure prise en compte des terres noires lors des fouilles archéologiques ultérieures.

||| Prospection géophysique

La prospection géophysique, menée au chantier archéologique du Boulevard Saint-Michel, avait pour premier objectif, sur une des coupes présentant des terres noires situées au-dessus des niveaux de voirie, de rechercher, si elle existe, une stratigraphie non observable à l'œil nu. Dans le but de cartographier la coupe d'étude en termes de propriétés physiques des matériaux concernés, nous avons expérimenté trois méthodes : la méthode électromagnétique, la méthode électrique et la thermographie infrarouge. Nous présentons ici des premiers résultats ainsi que quelques éléments d'interprétation.

- Des relevés de température de surface (thermographie infrarouge) ont été effectués par Abel Dorigny, INRA) : ils ont consisté en une succession de mesures ponctuelles afin de définir le protocole expérimental le mieux adapté à l'étude des terres noires.
- Pour la méthode électromagnétique, nous avons utilisé un instrument TDEM, le DECCO, (construit par Littlemore Scientific Engineering), mesurant in situ la viscosité magnétique des sols. Sur la coupe analysée au boulevard Saint-Michel, les premières mesures de viscosité ne présentaient pas de contrastes suffisants pour justifier la réalisation d'une cartographie.
- Pour la méthode électrique, une cartographie de résistivité électrique (**figure 1**) a été réalisée avec un dispositif WENNER (a=6 cm).

Cette première expérimentation a donné deux types de résultats : la méthode électrique a permis de mettre en évidence dans la coupe une discontinuité non visible à l'œil nu et la méthode électromagnétique a montré l'absence de matériaux fortement magnétiques. Il est prévu de procéder à une analyse d'image à partir de la photographie de la coupe et de corréler les résultats obtenus à ceux de la prospection électrique. Cette étude peut être généralisée aux méthodes géophysiques débouchant sur l'obtention de cartographies distinctes d'une même coupe à terres noires. Leur combinaison aura pour but de mettre en évidence des caractères utiles à l'interprétation et à la meilleure compréhension de ces sédiments.

Ainsi, cette première approche permettra à l'avenir l'élaboration d'un protocole d'intervention qui reposera sur l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes géophysiques. On peut notamment envisager, pour la méthode électrique, l'emploi d'autres dispositifs. En ce qui concerne la thermographie infrarouge, Abel

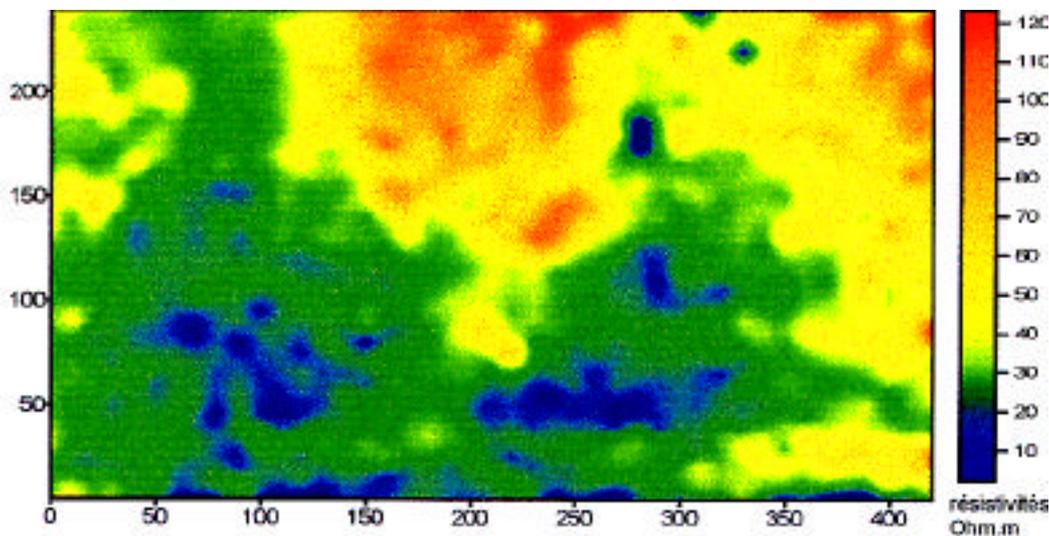


Figure 1 - Carte de résistivité apparente de la coupe étudiée

Dorigny se propose de définir les caractéristiques de la mise en œuvre de l'instrument le plus adapté à notre propos (mesures en déséquilibre thermique de la coupe, point par point et mesures de surface).

De façon à mieux éclairer la nature de ces dépôts, nous souhaitons poursuivre nos travaux entamés sur le site du boulevard Saint-Michel (exploitation de l'échantillonnage réalisé et analyse adaptée des produits des tamisages déjà effectués) et facilités par la mise œuvre d'une colla-

laboration inter-laboratoire au sein de Paris VI (Laboratoire de Géologie Appliquée¹, Département de Géologie Sédimentaire²). Cette collaboration vise, par une étude des échantillons, à une meilleure connaissance du contenu des sédiments afin d'utiliser ces nouvelles données, dans un esprit d'interdisciplinarité, pour nourrir le questionnement sur les terres noires élaboré à partir des anciens acquis et des résultats plus récents obtenus par l'expérimentation géophysique, réalisée au chantier du boulevard Saint-Michel en février 1997.

¹ Michel Meybeck, spécialisé en géochimie des dépôts fluviaux et des paléosols dans les fouilles préhistoriques et archéologiques en Ile-de-France, interviendra dans le cadre de l'établissement d'un référentiel des impacts humains (agricoles, domestiques, industriels) sur les dépôts et les paléosols. Au cours de la phase préliminaire s'étendant sur une période d'un à deux ans, M. Meybeck effectuera des analyses chimiques par absorption atomique et/ou par ICP-MS (selon moyens).

² François Baudin procède actuellement à l'analyse par pyrolyse du contenu en matière organique des échantillons prélevés pendant les fouilles, afin de quantifier le carbone organique, de caractériser son évolution thermique et son origine éventuelle (par exemple, existence de charbon de bois, appréciation de l'évolution de la matière organique...)

³ Philippe Blanc, responsable du MEB du département de géologie sédimentaire, étudie les échantillons par dissection : dissociation du sédiment et tri des constituants. Ce travail sera effectué avec la collaboration de C. David. Les observations complétées par une analyse élémentaire (diffraction aux RX, EDS - microanalyse, MEB) conduisent à une identification de phases anthropiques (reconnaissance de métaux fondus, verres silicatés, charbons, etc) permettant la mise en évidence d'activités.

Les diagraphies nucléaires appliquées au génie civil

Valéry Ferber

Groupe géotechnique, Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien, 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes, France

Abstract

For almost twenty years, the "Laboratoires des Ponts et Chaussées" have developed an electronic device for geological prospections called nuclear diagraphies. It consists of three nuclear probes providing in situ density, water content and natural gamma-ray logs of the materials. The measurements are done in bore-hole equipped with tube so that the radioactive sources can not be stuck in the hole.

The diffusion of the gamma radiation in the material allows to get its density. The slowing down of fast neutrons by hydrogen atoms is used to calculate the water content of the material. Finally, the materials can be characterized by their natural radioactivity.

All the radiations are counted by a complete acquisition chain. After then, the calculation of the first two parameters needs a calibration which is done in the "Laboratoire de l'Ouest Parisien". Finally, the moist density and the volumic water content can be calculated. This parameters can be coupled to get the dry density and the natural water content.

This method is an appropriate tool to get the state parameters, giving good informations in geological and digging studies. Moreover it is especially adapted to follow the state parameters in embankment and for the auscultations of foundation works.

Introduction

Il y a une vingtaine d'années, les Laboratoires des Ponts et Chaussées ont développé une méthode de diagraphie différée permettant d'effectuer *in situ* des mesures de paramètres d'état. Cette méthode utilisant des sources radioactives a pris le nom de diagraphies nucléaires.

Nous verrons ici les caractéristiques du matériel et de la méthode puis nous présenterons un cas d'application dans le génie civil.

Rappel du principe physique

❖ Mesure de radioactivité naturelle

L'objectif de cette sonde (RAN ou γ -ray) est d'enregistrer les variations de radioactivité naturelle des terrains en fonction de la profondeur.

L'intérêt de cette mesure est de repérer les formations par leur émission naturelle de rayonnements gamma. Le signal émis varie peu pour une même formation entre différents sondages rapprochés, ce qui permet de corréler des niveaux repères.

❖ Diagraphies gamma-gamma

Les diagraphies gamma-gamma utilisent le phénomène de diffusion Compton des rayonnements gamma par la matière (Ménard et Cariou, 1978). Le principe de cette diagraphie consiste à envoyer dans le matériau un flux de photons gamma et de mesurer les rayonnements diffusés par le matériau. Plus le matériau est dense et moins les rayonnements reçus sont nombreux (figure 1).

La sonde possède un rayon d'investigation de 18 cm environ, selon la nature du matériau et son état.

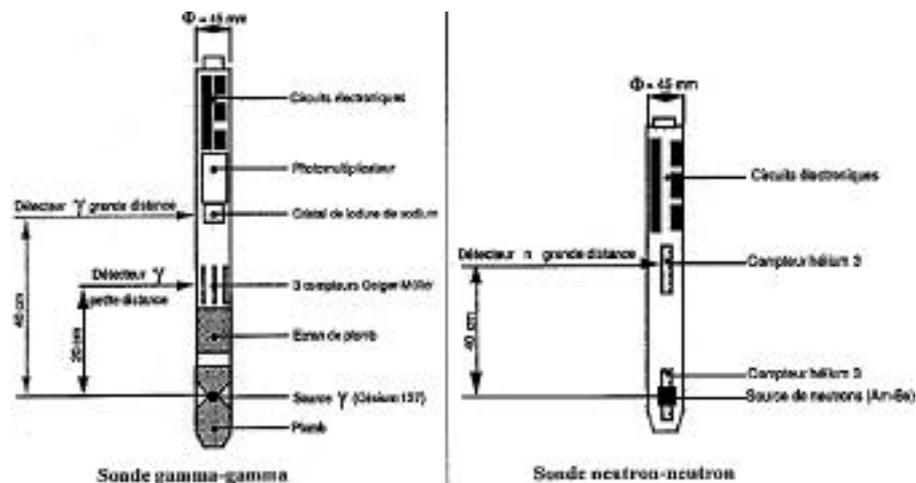


Figure 1 - Schémas de principe des sondes gamma-gamma et neutron-neutron

❖ Diagraphies neutron-neutron

Les diagraphies neutron-neutron utilisent le phénomène du ralentissement des neutrons rapides par les noyaux des atomes constitutifs du milieu dans lequel ils sont émis (Ménard et Cariou, 1978). Ce sont les noyaux d'hydrogène qui jouent un rôle prépondérant dans le domaine de ralentissement et de diffusion (figure 1).

Mise en oeuvre, limites de la méthode

❖ Mise en oeuvre des sondes

Les sondes sont mises en oeuvre à partir d'un véhicule utilitaire. Celui-ci transporte l'ensemble de la chaîne d'acquisition des mesures ainsi que le treuil de 150 m qui permet leur descente et leur remontée dans le sondage.

La chaîne d'acquisition se compose (figure 2) :

- des sondes qui contiennent les détecteurs et éventuellement les sources radioactives ;
- d'une source électrique permettant d'alimenter les sondes ;
- d'une série de cartes électroniques permettant un premier traitement du signal ;
- d'un ordinateur muni d'une carte et d'un logiciel spécialement conçus pour finaliser le traitement du signal et enregistrer les mesures.

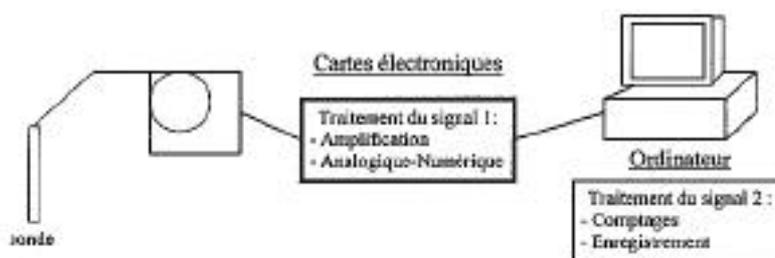


Figure 2 - Schéma de la chaîne d'acquisition des diagraphies nucléaires

❖ Etalonnage

Pour déterminer la valeur des paramètres d'état, il faut effectuer un étalonnage des sondes et de la chaîne d'acquisition. Cet étalonnage vise à s'affranchir des trois principaux paramètres influençant les mesures, autres que le paramètre d'état lui-même, à savoir :

- le **diamètre du sondage** ;
- la **nature du tubage** ;
- éventuellement la **présence d'eau** dans le sondage.

Pour cela, le Laboratoire de l'Ouest Parisien dispose de dalles, perforées en différents diamètres, dont les masses volumiques et les teneurs en eau sont connues. Des dalles sont en état sec et d'autres en humide afin de restituer au mieux les conditions de mesure. De plus, l'étalonnage se fait avec un échantillon du tubage posé dans le sondage.

A l'issue de l'étalonnage, on obtient les logs de *masse volumique humide et de teneur en eau volumique* dans le sondage ausculté. Un traitement supplémentaire permet de calculer la *masse volumique sèche et la teneur en eau pondérale*.

❖ Contraintes et limites de la mesure

La présence de sources radioactives impose de suivre des règles de sécurité strictes. En particulier, la pré-

sence d'un tubage dans tous les forages auscultés est absolument indispensable afin que la sonde ne puisse se trouver bloquée par des éboulements de matériaux dans le trou.

De plus, le rayon d'investigation étant limité, il faut un diamètre de forage inférieur à 110 mm pour que le volume de terrain ausculté soit représentatif.

Domaines d'application

Cette méthode de reconnaissance possède un certain nombre de caractéristiques qui lui ouvrent des applications particulières dans le domaine du génie civil (Baron et al., 1989). Ces caractéristiques sont :

- la *quantification des paramètres d'état des matériaux* ;
- la *reproductibilité des mesures* dans un même sondage.

Ainsi, c'est une méthode qui fait partie des méthodes de reconnaissance géologique et géotechnique. Elle permet de caractériser par des paramètres d'état (la masse volumique sèche ρ_d et la teneur en eau W_n) des massifs de sol, de réaliser des suivis de remblais et d'effectuer des auscultations d'ouvrage de fondation. Nous proposons ici un exemple tiré d'une étude effectuée par le L.R.O.P (Liaison Cergy-Roissy, étude géotechnique des déblais, dossier d'étude interne LROP).

Reconnaitances avant travaux de terrassements : quantification des paramètres d'état dans une zone de déblais

❖ Contexte

Sur le tracé de la future Liaison Cergy-Roissy (Val d'Oise), le L.R.O.P. a effectué des reconnaissances géotechniques visant notamment à définir les conditions de réemploi des matériaux extraits lors des terrassements. Il s'agissait en particulier d'étudier l'état des marno-calcaires de Saint-Ouen. Cette formation est caractérisée par une hétérogénéité verticale importante, due à la présence de bancs calcaires de 10 à 20 cm d'épaisseur. Elle repose sur les sables de Beauchamp qui sont grésifiés au sommet.

❖ Mesures

Dans le cadre de cette étude, le L.R.O.P. a effectué une comparaison des mesures de diagraphies nucléaires avec les méthodes traditionnelles. Pour cela, des forages destructifs ont été équipés de tubage afin de permettre le passage des sondes de diagraphies nucléaires. A ces sondages, étaient couplés des sondages à tarière réalisés à un mètre de distance. Des mesures de teneur en eau pondérale ont été réalisées à partir de prélèvements dans ce sondage.

❖ Résultats

La **figure 3** montre les logs de diagraphies nucléaires. Les valeurs moyennes de teneur en eau pondérale sur 1 mètre ont été reportées conjointement sur le log de la sonde neutron-neutron.

Il apparaît qu'il y a un écart fréquent entre les mesures de teneur en eau des diagraphies et les mesures effectuées en laboratoire (log de droite). Cet écart n'est pas constant et il peut être aussi bien positif que négatif. On peut noter une différence s'élevant jusqu'à 15 points sur des teneurs en eau de 20-30%.

Le log de la sonde gamma-gamma (log du milieu) met en évidence la présence des bancs calcaires plus compacts que les marnes (en grisé) et de bancs de grès dans les sables de Beauchamp (en noir).

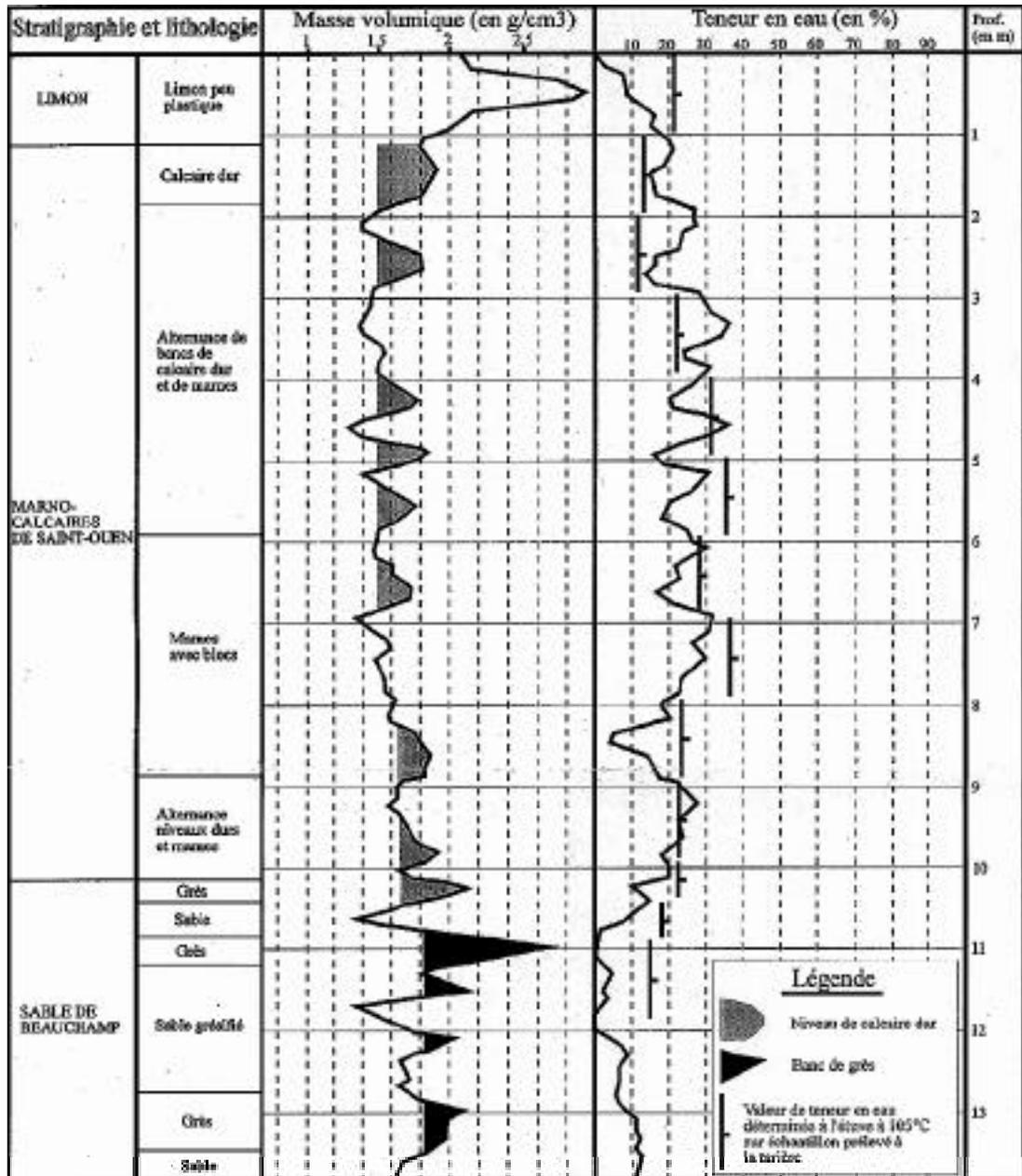


Figure 3 - Logs de masse volumique et teneur en eau et comparaison avec les mesures de teneur en eau effectuées en laboratoire

❖ Interprétation

Cet exemple permet de mettre en évidence la différence importante entre la mesure par les sondes de diagraphies nucléaires et les mesures classiques.

Dans le cas des mesures en laboratoire, l'échantillonnage sur une tarière et l'élimination des blocs trop gros entraîne une erreur sur la représentativité. La mesure par diagraphie nucléaire s'avère a priori plus précise. On peut notamment vérifier la diminution des teneurs en eau au niveau des bancs calcaires. De plus, la mise en évidence de ces bancs durs par la mesure de masse volumique apporte au géotechnicien une information importante sur la quantité de blocs, paramètre majeur en terrassement.

||| Conclusion

Les diagraphies nucléaires constituent donc un outil très précieux permettant la caractérisation des matériaux en place. Le caractère non-destructif de la méthode et les paramètres mesurés lui ouvrent des champs d'application nombreux en génie civil et plus généralement dans tous les domaines d'étude du sous-sol.

||| Bibliographie

Ménard J., Cariou J., 1978. Diagraphies de densité et de teneur en eau, sondes nucléaires de première génération, Rapp. Rech. LPC, 82, sept., 46 p.

Baron J.P., Cariou J., Thorin R., 1989. Les diagraphies nucléaires développées par les LPC, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 164 nov-dec 1989, pp 17-24.

A

pports de la modélisation dans l'interprétation des signatures radar en milieu urbain

Gilles Grandjean, Adnand Bitri, Jean-Christophe Gourry

BRGM, Direction de la Recherche, B.P. 6009, avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans, France

Abstract

BRGM and the Projet National Microtunnel funded a research project where Ground Penetrating Radar (GPR) was used to characterize the test-site of the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France). The objective of this project was to develop a method to better interpret the radar signatures by combining data processing to forward modeling, especially in the case of urban heterogeneities.

The LCPC test site is composed by 4 different medium, representative of geotechnical material, where targets, such as pipes, voids, cables, are buried. A total of 14 GPR profiles were selected to cover the site. They were recorded with 300, 500 and 900 MHz antenna frequencies in order to obtain wide ranges of penetration and resolution. To complete the study, a borehole to surface GPR device was set up to estimate the different medium velocities from tomographic inversion.

After conventional data processing, a comparison between processed sections and synthetics was carried out. The modeling method is based on wavefield extrapolation in the frequency wavenumber (f, k) domain from the solution of the 2D Maxwell's equations. The wavefield is extrapolated by a phase-shift technique using constant relative permittivity K and quality factor Q . Then it is modified by a correction term to handle lateral K and Q variations. The radar wave dispersion and attenuation, induced by relaxation processes, are taken into account by a linear-frequency dependent Q model and expressed by a complex wavenumber in the propagation equation. An example illustrates the potential of the forward modeling, especially by showing the frequency dependence of the wave velocity and attenuation.

Some typical radar signatures are finally presented and interpreted with the corresponding synthetics. Each case is discussed to understand the contribution of the modeling approach in the interpretation.

Introduction

Dans le milieu urbain, l'utilisation du géoradar à la détection d'obstacles enfouis superficiels (0-5 m) est courante tant cet outil peut s'avérer performant dans ce domaine. Cependant, il y a des cas où les limites de son utilisation sont atteintes, par exemple lorsque l'encaissant devient trop argileux -forte atténuation, que l'obstacle à détecter n'offre pas de contraste avec l'encaissant -faible impédance diélectrique- ou que la taille de l'objet est trop petite par rapport à la longueur d'onde du signal -faible résolution. Pour appréhender ces problèmes, des sections synthétiques peuvent être calculées numériquement afin de comprendre les mécanismes physiques liés à la propagation -atténuation de l'encaissant, géométrie des réflexions, taux de diffraction- dans les conditions de l'acquisition. L'intérêt de la modélisation est de consolider l'interprétation des sections géoradar par des simulations 2D restituant au mieux les phénomènes physiques observés.

En utilisant l'algorithme décrit par Bitri et Grandjean (soumis à Geophysical Prospecting), des sections synthétiques ont été calculées pour chaque signature radar provenant des cibles du site test, ceci pour des fréquences d'antenne de 900, 500 et 300 MHz. Les modèles, qui produisent les synthétiques les plus proches des radargrammes observés, donnent donc une répartition, la plus probable, des paramètres diélectriques du sous-sol -la permittivité K et le facteur de qualité Q. Après une présentation de la méthode de modélisation, les cas les plus représentatifs du site test du LCPC seront décrits et discutés.

Modèle de propagation radar en 2D

L'algorithme de modélisation (Bitri et Grandjean, soumis à Geophysical Prospecting) est basé sur l'équation de propagation du champ électrique \mathbf{E} en milieu homogène, dérivée des équations de Maxwell, et exprimée dans le domaine de Fourier :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{E}(k_x, z) + k_x \mathbf{E}(k_x, z) = 0 \text{ avec } k_z^2 = (k^2 - k_x^2)$$

où k_x et k_z sont les nombres d'onde complexes selon les axes x horizontal et z vertical ; ω est la pulsation (rad/s). Cette équation admet classiquement comme solution (Hulin, 1993) :

$$\mathbf{E}(k_x, z) = \mathbf{E}(k_x, z=0) e^{-k^* z} e^{-ik'z}$$

Ce type de solution, déjà rencontré en modélisation sismique (Gazdag, 1978 ; Claerbout, 1985), constitue la base de l'algorithme de modélisation du champ \mathbf{E} par *phase-shift*. Pour prendre en compte les hétérogénéités latérales, un terme de correction est appliqué à chaque extrapolation du champ selon z :

$$\exp[i(k_m - k_{xz}) z]$$

où k_m est le nombre d'onde moyen et k_{xz} est le nombre d'onde réel calculé à partir des propriétés du milieu à l'emplacement (x,z) selon la relation :

$$k_{xz} = \frac{\omega}{V_{xz}} + i \alpha_{xz}(\omega)$$

où la vitesse de l'onde V_{xz} et le facteur d'atténuation α_{xz} sont calculés à partir de la permittivité relative K et le facteur de qualité Q (Bano, 1996) :

$$V(\omega) = V_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{\frac{1-n}{2}}$$

$$v(\omega) = \frac{c}{\sqrt{\epsilon(\omega)}} \tan \left[\frac{\pi}{4} (1 - n) \right]$$

$$\text{où } n = 2 \tan^{-1}(Q)$$

Données et modèles du site test

La confrontation des profils radar acquis sur le site test avec les modèles synthétiques apporte 2 types d'information: elle permet de comprendre les phénomènes de propagation donnant naissance à la signature particulière d'un objet enfoui ; elle apporte en plus une information quantitative puisque les paramètres de la propagation sont reliés aux paramètres physiques -la permittivité relative K et le facteur de qualité Q- contenus dans les modèles.

Le premier type d'information est mis en évidence sur la **figure 1**. Il est facile de constater qu'un tuyau de diamètre 4 cm rempli d'air ne produit qu'une hyperbole à 900 MHz, alors qu'il produit 2 hyperboles s'il est rempli d'eau. Ce phénomène s'explique par la relative faible vitesse de l'onde radar dans l'eau (0,03 m/ns) comparé à l'air (0,3 m/ns), ce qui retarde suffisamment la diffraction provenant de la base du tuyau rempli d'eau pour pouvoir la dissocier de celle provenant du sommet. Dans le cas du tuyau rempli d'air les 2 hyperboles sont présentes mais confondues.

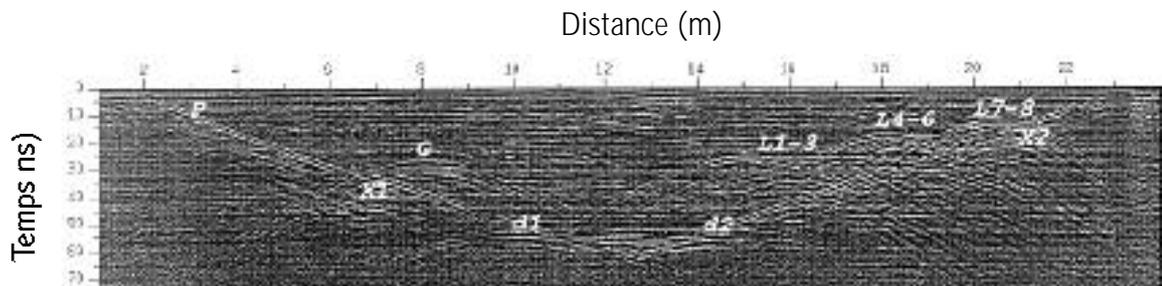


Figure 1 - Section temps représentant la signature des différentes cibles rencontrées le long du profil : P=plan incliné de la fosse ; G=tuyau de diamètre 0,5m (air) ; 3 séries de 3 tuyaux en métal (L1-4-7), en PVC+eau (L2-5-8) et PVC+air (L3-6); d1-d2 : drains de la fosse

Le deuxième type d'information provient de l'interprétation plus quantitative des sections radar puisque le milieu modélisé (**figure 2**) est caractérisé par des valeurs physiques (K, Q). Ces valeurs peuvent être comparées à des données de référence au sein d'une base de données pour identifier chaque matériau.

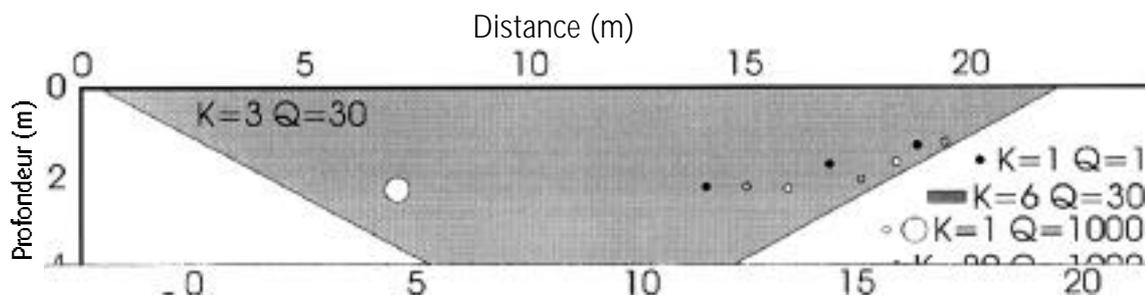


Figure 2 - Présentation du modèle. Chaque cible est caractérisée par sa permittivité K et son facteur de qualité Q

Cependant, le modèle produit reste quelquefois dépendant des artefacts numériques où des faiblesses de l'algorithme. Par exemple sur la **figure 3**, l'hyperbole X pourrait être interprétée, comme étant du signal, mais provient en fait d'interférences constructives entre 2 sources de bruit numérique. La principale faiblesse de l'algorithme présenté est de ne pas générer de multiples.

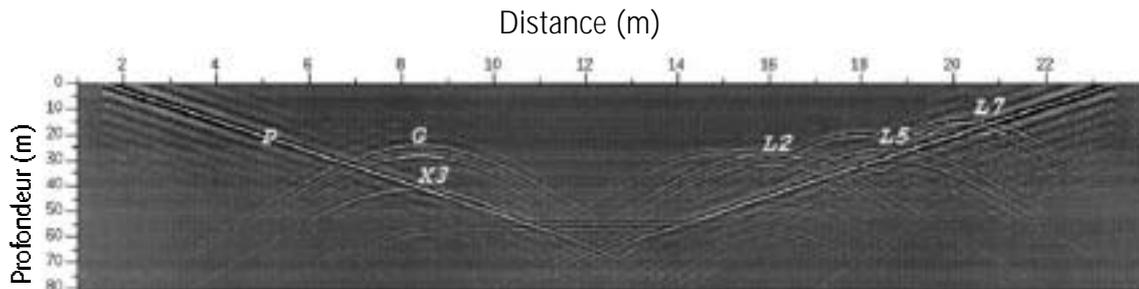


Figure 3 - Section synthétique montrant la signature de chaque cible calculée à partir du modèle de la figure 2. Noter la double hyperbole du tuyau-eau (L2), le bruit numérique associé au plan incliné (P) et l'hyperbole X3, artefact de modélisation dû à l'interférence constructive du bruit numérique de P et de G

Conclusion

Cette étude s'est attachée à caractériser la signature radar de chaque objet en termes de géométrie et la nature des milieux encaissants en termes de vitesse, atténuation et dispersion des ondes radar. L'acquisition des données a consisté à effectuer un profilage radar systématique en surface, en utilisant des fréquences d'antenne différentes, ainsi que des mesures en transmission d'un forage vers la surface.

L'interprétation combinée des signaux radar observés et de leur simulation sous forme de synthétiques a mis en évidence chaque signature radar qu'elle soit de type réflexion ou diffraction, ainsi que les paramètres de la propagation pour chaque type de matériau, que ce soit par l'étude en transmission ou les modélisations.

Malgré certaines faiblesses -bruit numérique, pas de génération de multiples-, les possibilités d'une telle méthode sont intéressantes et méritent d'être développées. Elle permet en effet, une fois le modèle calibré avec les observations, de connaître *a priori* par simulation la réponse d'un objet situé à une profondeur quelconque au sein d'un encaissant. Elle permet en outre d'être utilisée dans un processus d'inversion itératif, puisque le même algorithme peut être utilisé pour migrer les sections-temps en profondeur. Cet aspect constitue la prochaine étape à développer pour continuer d'améliorer l'interprétation des données radar.

Bibliographie

- Bano M., 1996. Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves. *Geophys. J. Int.*, 124, pp. 279-288.
- Bitri A. and Grandjean G.. soumis à *Geophysical Prospecting*.
- Claerbout J.F., 1985. *Imaging the Earth interior*. Blackwell sci. Pub. 398 p.
- Gazdag Z., 1978. Wave-equation migration with phase-shift method. *Geophysics*, 43, pp. 1342-1351.
- Hulin M., Hulin N., Perrin D., 1993. *Equations de Maxwell - ondes électromagnétiques*. Dunod Ed., Paris.

*D*e l'intérêt raisonné des investigations sur plusieurs paramètres en prospection archéologique

Albert Hesse

C.N.R.S., Centre de Recherches Géophysiques, Garchy, 58150 Pouilly-sur-Loire, France

Abstract

Multi-parametric surveys are often recommended and realised in archaeological prospecting. Three excellent results on highly differentiated sites and features with three different methods are presented and discussed. It results from field experience, scientific knowledge, logical arguments and economical constraints that the balance of interest between several multi-parametric surveys and one large survey with an appropriate method, selected in order to meet the specific requirements of the considered investigation, must always be carefully investigated prior to field operations.

Reconnaissance des structures anthropiques (sites urbains, industriels...)

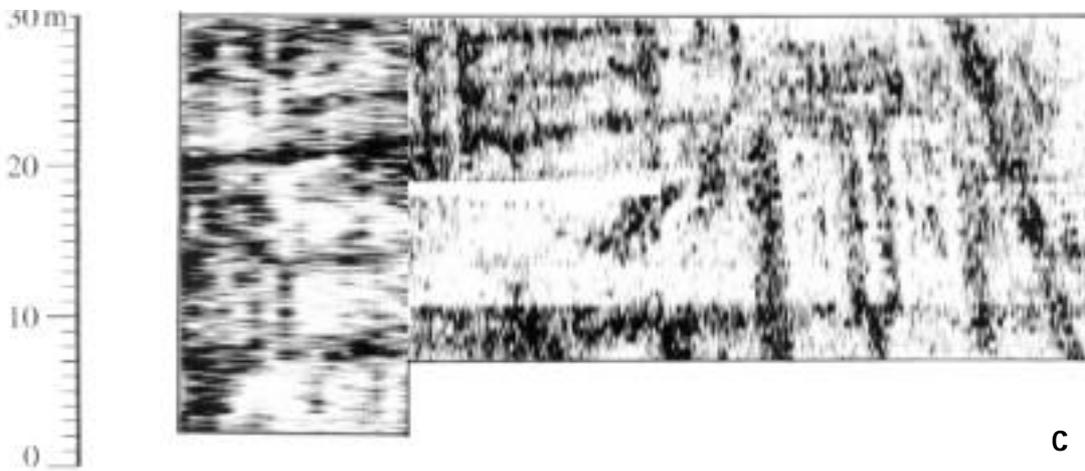
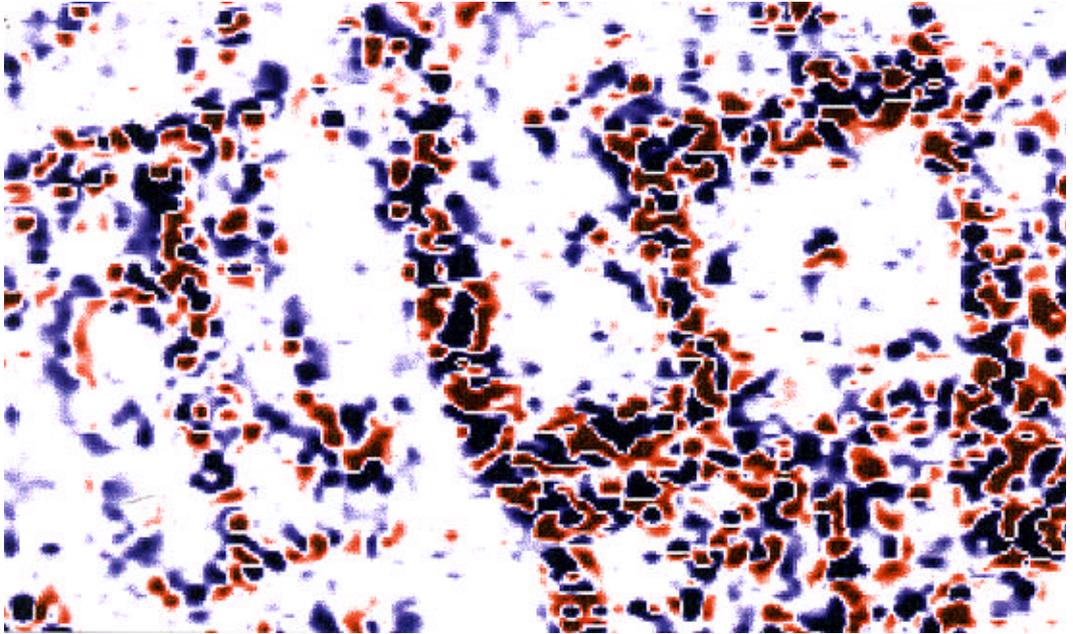
Il existe inévitablement, chez celui qui expérimente et améliore une méthode d'investigation du sous-sol, une grande tentation de faire de l'objet de ses efforts l'outil universel et sans faille qui résoudra tous les problèmes dans les meilleures conditions. Une telle ambition est régulièrement contredite par l'expérience car tout prospecteur expérimenté du sous-sol sait bien aussi, d'une part que toute détection est spécifique, d'autre part que dans certaines conditions spécifiques de gisement et de contraste, lorsqu'une méthode fonctionne, les méthodes parentes ont toutes d'assez bonnes chances de réussir.

Les trois exemples récents présentés ici sont significatifs à cet égard, en raison de leurs points communs et de leurs spécificités. Ils concernent des vestiges de constructions à murs (en désignant par ce terme toute forme d'agencement linéaire de pierres). Les maillages utilisés, bien que différents, sont tous d'une assez grande finesse et les cartes présentées sont à la même échelle. Les traitements appliqués et les modes de figuration des résultats étant très différents, ces cartes ne doivent être considérées que comme des images du contenu du sous-sol, que l'on a cherché à rendre aussi lisibles que possible dans les conditions de figuration graphique disponibles. Les caractéristiques spécifiques de chacune sont les suivantes :

- Wroxeter (Angleterre) : ville romaine ; extrait d'une grande prospection électrique automatisée en configuration bipôle (**figure a**) ; maille de mesure de 0,1 x 1 m, rééchantillonnée à 0,5 x 0,5 m. On distingue une voie, un bâtiment avec couloir central et des subdivisions, deux petits massifs devant l'entrée et une exceptionnelle colonnade en façade (premier cas d'observation en prospection). Travaux en collaboration avec l'Archaeological Field Unit de l'Université de Birmingham (Dabas *et al*, 1996).
- Loma-Alta/Zacapu (Mexique) : établissement précolombien ; extrait d'une grande prospection magnétique au gradiomètre vertical (**figure b**) ; maille de 0,5 x 1 m ; l'image montre un édifice carré avec un édicule central, encadré par un réseau de murs parallèles à ses côtés. Il s'agit d'un cas rarissime où les pierres de construction (volcaniques et de grande taille) les plus proches de la surface sont privilégiées et apparaissent comme des anomalies individualisées, en raison d'un très fort coefficient de Koeningsberger. Travaux en collaboration avec l'Instituto de Investigaciones Antropológicas de l'UNAM de Mexico (Hesse *et al*, sous presse).
- Ursulines/Saint-Pierre (Martinique) : Caserne des Ursulines détruite par l'éruption de la Montagne Pelée en 1902 ; prospection au radar-sol (tranche des 20-24 ns) avec antenne de 450 MHz (**figure c**) ; maille de 0,1 x 0,5 m ; l'image montre le détail interne (couloir central et murs) de l'aile N-E de la caserne dite "de 600 hommes", dont on ne connaissait que le plan-masse par un document de 1851, ainsi que la trace d'autres vestiges disparus ; travaux réalisés en collaboration avec le C.E.R.A. et avec le soutien du Service Régional de l'Archéologie de Martinique (Camerlynk et Hesse, 1997).

Faut-il en conclure à la spécificité des méthodes ou au contraire à leur universalité, chacune semblant capable de répondre sur des structures de forme et de situation somme toute assez comparables (vestiges construits en pierre sur plans rectangulaires et gisant sous quelques décimètres de sol) ? La réponse n'est pas simple car l'information livrée par les trois méthodes évoquées sur ces images, volontairement mises en parallèle un peu artificiel, n'est pas équivalente dans les trois cas :

- Wroxeter : une prospection magnétique antérieure avait donné des résultats excellents, mais sans le détail de la colonnade ; une prospection enregistrée "en continu" par Goodman et Nishimura, presque aussi rapide que notre prospection électrique ne semble pas avoir été très parlante, mais sa maille était deux fois moins fine que celle que nous avons utilisée, en manuel, à Saint-Pierre de Martinique.
- Loma-Alta/Zacapu : nous avons obtenu des images électriques très claires en Wenner (a = 1 m) sur de grandes surfaces de test, mais certains murs ne sont pas apparus en raison de leur configuration particulière et la lenteur de l'équipement disponible était en défaveur de



cette méthode ; le radar n'a pas été testé mais il n'y a aucun doute qu'il aurait très bien répondu sur les matériaux présents très contrastés électriquement : blocs de roche et sol fin.

- Ursulines/Saint-Pierre : une grande prospection électrique enregistrée en configuration dipôle sur la même maille qu'à Wroxeter a été faite. Un grand nombre d'anomalies a été relevé mais seul un contour, assez vague au demeurant, de la même aile de la caserne et quelques autres détails ont pu être reconnus. Il semble en contrepartie que la répartition spatiale de différents types de remblais plus ou moins résistants, compartimentés par les murs et les frontières des dénivellations anciennes, ait été assez bien mise en évidence. Quant à la prospection magnétique, elle ne pouvait même pas être envisagée en raison du caractère très fortement magnétique et diversifié de tous les matériaux en présence : roches éruptives et cinérites.

Ces trois exemples soulignent bien le caractère complexe des méthodes de détection/prospection en ce qu'elles ont de spécifique, de redondant et de complémentaire. Compte tenu du fait que toute prospection du sous-sol (l'archéologie ne fait évidemment pas exception à la règle) s'inscrit inévitablement dans un faisceau de contraintes économiques, le choix de la (ou des) méthode(s) à utiliser pour arriver au but fixé à l'opération devra impérativement prendre ce fait en considération et, en simplifiant passablement les nuances dans l'argumentation mais en tenant compte de l'ensemble de l'expérience de terrain, on peut résumer quelques règles de choix entre l'application de une ou plusieurs méthodes de la façon suivante :

Les investigations sur plusieurs paramètres (deux méthodes ou plus, selon le cas ou ce dont on peut matériellement disposer) sont hautement recommandables, voire indispensables dans les situations, non limitatives, suivantes :

- lorsqu'on n'a pas, ou très peu, de connaissance *a priori* sur la nature et/ou la configuration des structures du sous-sol que l'on recherche ; ce cas s'étend à celui où l'on a des incertitudes objectives sur l'efficacité de l'une ou de l'autre, voire de toutes les méthodes envisagées, dans l'espoir d'obtenir, éventuellement par consolidation des résultats les uns par les autres, une réponse acceptable au problème posé ;
- dans une phase exploratoire d'une opération de grande envergure en vue de sélectionner la méthode (voir *infra*) la plus efficace et du meilleur rapport qualité/coût pour résoudre le problème posé ;
- dans une phase d'expérimentation ou de validation d'une méthode nouvelle pour comparer ses résultats à ceux des méthodes qui bénéficient déjà d'une longue expérience ;
- dans le cas où l'on sait avoir à reconnaître différents types de structure ou de vestige relevant *a priori* de méthodes spécifiques différentes (notion de complémentarité stricte) ;
- dans le cas où la réponse obtenue sur plusieurs paramètres permet, en levant des indéterminations, de caractériser des matériaux différents qui sur un seul paramètre auraient donné une réponse identique et par conséquent équivoque (notion de redondance et de complémentarité partielles) ;
- ...

Il faut noter que l'appréciation judicieuse de ces situations en vue de l'établissement d'un programme d'exploration efficace relève strictement du prospecteur expérimenté sur l'ensemble des méthodes, en particulier lorsqu'il s'agit de conduire des "expériences" trop souvent entreprises avec une naïveté proche de l'irresponsabilité.

Dans la plupart des autres cas, en particulier lorsqu'on sait ce que l'on cherche et que l'on connaît ou que l'on aura pu déterminer la méthode la plus efficace pour répondre à une question spécifique clairement posée, il faut fortement affirmer, même si ce truisme paraît superflu, qu'il est du plus grand intérêt, tant

du point de vue économique que de celui de la connaissance, de passer le plus rapidement possible au relevé d'un seul paramètre en couvrant ainsi, en première approximation, une surface n fois plus grande qu'avec n méthodes. Chacun sait en effet combien il est important pour l'interprétation de disposer de très grandes couvertures dépassant largement le champ de localisation des anomalies pour rejoindre les espaces vides ou réputés tels au regard du paramètre relevé.

Deux remarques importantes s'imposent cependant dans cette conduite. Il convient d'une part de considérer comme investigations multi-paramétriques celles qui mettent en oeuvre une même méthode avec des réglages ou des configurations différentes (distances entre électrodes, antennes de radar...). Mais, d'autre part, il faut supprimer les restrictions faites aux explorations multi-paramétriques dès lors qu'il est possible dans des conditions raisonnables de coût de les mettre en oeuvre sur un même appareil (cas de la réponse simultanée en phase et en quadrature sur un slingram) ou sur des chaînes de capteurs ou d'appareils enregistrant quasi simultanément plusieurs types de données.

Bibliographie

Camerlynck C. et Hesse A., 1997. Reconnaissance électrique et radar des ruines de 1902 dans le sous-sol de Saint Pierre de Martinique, *Colloque d'Archéométrie*, Rennes, 16-19 avril 1997, résumés, p. 40

Dabas M., Hesse A., Tabbagh J., 1996. A new light device for resistivity surveying in archaeology : the Wroxeter experience, *Archaeometry Internat. Conf.*, Urbana-Champaign, 20-24 mai 1996, abstracts, p. 26.

Hesse A., Barba L., Link K., Ortiz A. (sous presse) A magnetic and electrical study of archaeological structures at Loma-Alta, Michoacan, Mexico, *Archaeological Prospection*.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent, pour le traitement des figures à J. Tabbagh (a : Wroxeter ; b : Loma-Alta/Zacapu) et à C. Camerlynck (c : Ursulines/Saint-Pierre).



*Suivi du fonctionnement et du comportement
(pollution, risque...)*

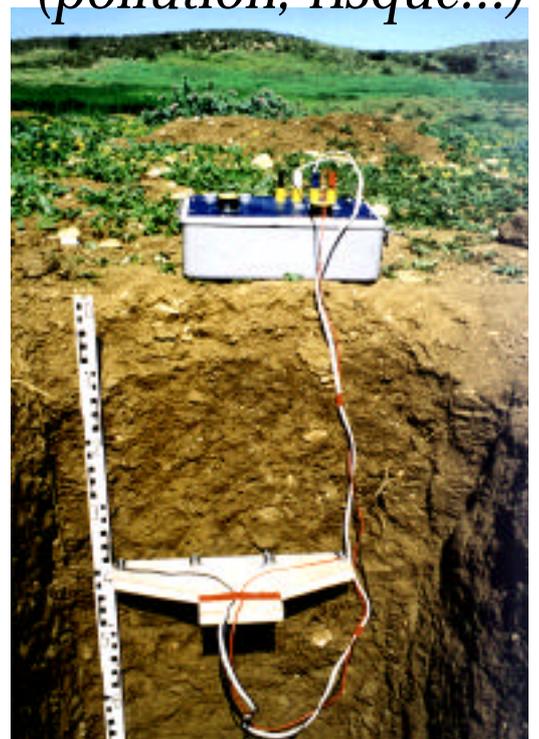


Photo de Jean-Pierre Montoroi

*Mesures de résistivité électrique dans un sol brun calcaire du bassin versant d'El Gouazine
(Tunisie centrale)*

A

pport des méthodes géophysiques à l'étude des bilans hydrique et salin d'une oasis du sud tunisien

Brahim Askri

ORSTOM, 5 impasse Chahrazed, B.P. 434, 1004 El Menzah 4, Tunis, Tunisie

Poster

Présentation

La *salinisation* des sols *irrigués* est un problème qui menace le développement des *oasis* du sud tunisien implantées en bordure des chotts et des *sebkhas*¹. La quantification des termes *des bilans d'eau et de sels* est un diagnostic pour la conservation des sols. Dans une couche de sol, l'établissement de ces bilans nécessite des mesures respectives des teneurs en eau et en sels. Les mesures de la charge piézométrique et des teneurs en sels sont nécessaires pour la quantification des bilans d'eau et de sels de la nappe phréatique. Ces mesures sont insuffisantes pour la quantification des bilans d'eau et de sels à l'échelle de l'oasis parce qu'elles sont locales. L'intégration de ces mesures à l'échelle de l'oasis doit tenir compte de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques et hydrodynamiques du sol et de nappe.

Dans ce travail, nous utilisons les méthodes géophysiques de mesures en surface (EM 38 et EM 31) pour *la spatialisation* des mesures ponctuelles de teneur en sels présents respectivement dans la couche de sol et dans la nappe phréatique, en vue de quantifier les bilans d'eau et de sels à l'échelle de *la parcelle*.

L'oasis de Segdoud située dans le sud de la Tunisie est affecté par les sels qui sont dus à un dysfonctionnement du système irrigation-drainage. Une campagne de mesures géophysiques et de mesures des caractéristiques physiques et hydrodynamiques du sol et de la nappe phréatique a été réalisée pour l'étude des bilans d'eau et de sels dans ce système². Les mesures des conductivité électromagnétique ont été effectuées respectivement par EM 38 et EM 31 le long de cinq transects. Elles ont permis de caractériser la variabilité spatiale des salinités moyennes respectives de la couche de sol et de la nappe. Il est apparu qu'au delà de 10 m pour la salinité du sol et de 30 m pour la salinité de la nappe, les mesures peuvent être considérées comme indépendantes. Sur cette base, un échantillonnage gravimétrique et de teneur en sels globale a été réalisé en avril 1995 dans une parcelle de l'oasis. Cet échantillonnage a permis de quantifier les bilans hydrique et salin dans la couche de sol et dans la nappe phréatique.

¹ Lac d'eau salée, généralement sec en été dans le climat aride et semi-aride de la Tunisie.

² Ce travail s'effectue dans le cadre d'une thèse en hydrologie (Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis-ORSTOM Tunis)

A

pplication de la mesure des potentiels électriques de polarisation spontanée (PS) à la reconnaissance des formations superficielles

Maurice Aubert

Observatoire, 12 avenue des Landais, 63000 Clermont-Ferrand, France

Abstract

This paper presents a review of some applications of the Self-Potential method (SP) in the field of the sub-surface prospecting. From a theoretical point of view, there is no SP anomaly only in the case of layers characterized by constant thickness and homogeneous physical and chemical properties. On the contrary, thickness variation of the first non saturated layer, heterogeneities of resistivity or permeability, create SP anomalies. Field examples show prospectings of water-table, cavity, pipe, leaky dams. SP time variations give a good correlation with the infiltration and the evapotranspiration phenomena. Data quality is necessary to obtain interpretable anomalies often characterized by low range and spreading.

Introduction

La mesure des potentiels électriques dits de polarisation spontanée (PS) est utilisée depuis longtemps (1830 ?) en géophysique minière et pétrolière, depuis quelques dizaines d'années seulement en hydrogéologie et en génie civil. L'objet de cette note est de présenter :

- des éléments de théorie sur la génération des potentiels PS et des règles empiriques d'application ;
- un recensement plus ou moins complet des travaux en génie civil ;
- une réflexion sur son développement possible.

Éléments de théorie sur la génération PS

En théorie, une différence de potentiel apparaîtra entre deux points du sol soumis à une différence qui peut être, chimique, de concentration, de température, ou encore de pression hydrostatique. Tous ces phénomènes peuvent intervenir dans les formations superficielles, mais nous développerons surtout le dernier processus, dit d'électrofiltration, qui intéresse spécialement les milieux poreux au sein desquels se développe en général une circulation hydrique. On explique la différence de potentiel mesurée entre un point aval et un point amont de cette circulation par la présence d'une double couche électrique au contact de la paroi des canalicules capillaires formés entre les grains du milieu poreux. On retiendra la règle simple suivante : en présence d'une eau neutre ou basique, le potentiel aval est positif par rapport au potentiel amont. Une zone drainante se signalera par une anomalie négative, une remontée de zone imperméable par une anomalie positive. Le signe s'inverserait pour une eau à pH acide, mais nous n'avons pas confirmation de ce fait.

Cette règle s'applique à une circulation aussi bien en milieu saturé qu'en milieu non saturé.

En milieu saturé, théorie et expérimentation indiquent une proportionnalité entre différence de potentiel et gradient de pression hydraulique mesurés aux deux extrémités d'une colonne d'un milieu granulaire. En milieu non saturé, la distribution des équipotentielles PS a fait l'objet de quelques études in situ. Il s'en dégage une règle expérimentale indiquant que sous certaines conditions, l'amplitude PS négative (zone drainante) est proportionnelle à l'épaisseur de la zone non saturée (Aubert et Yene Atangana, 1996). Ces conditions sont :

- l'homogénéité de la résistivité du milieu ;
- un rapport important (>3) entre cette résistivité et celle du milieu inférieur.

Des effets de bord, calculables, peuvent perturber cette relation linéaire.

Toute hétérogénéité de résistivité ou de perméabilité du milieu drainant doit déformer la distribution des équipotentielles et donc se traduire en surface par une anomalie PS. Les exemples suivants montreront la validité et la limite d'investigation de la méthode dans ces deux cas d'application :

- variation d'épaisseur du milieu drainant (écoulement d'eau souterraine),
- variation latérale de résistivité et/ou de perméabilité (cavité, fissure, drain, mur).

Enfin, toute variation temporelle du flux hydrique vertical pourra également donner lieu à une variation corrélative PS que nous examinerons.

Variations d'épaisseur de la zone non saturée

La recherche des variations d'épaisseur de la zone non saturée est le thème dominant en prospection des

eaux souterraines mais peut avoir aussi des applications en génie civil. Nous avons vu plus haut que sous certaines conditions, une relation expérimentale semble établie entre variation d'épaisseur et amplitude des anomalies PS. Cette relation a été établie à partir d'une cinquantaine de sites de forages où on avait mesuré les anomalies PS. Tous ces sites sont situés dans le même contexte d'un substratum plus ou moins imperméable recouvert par des formations volcaniques.

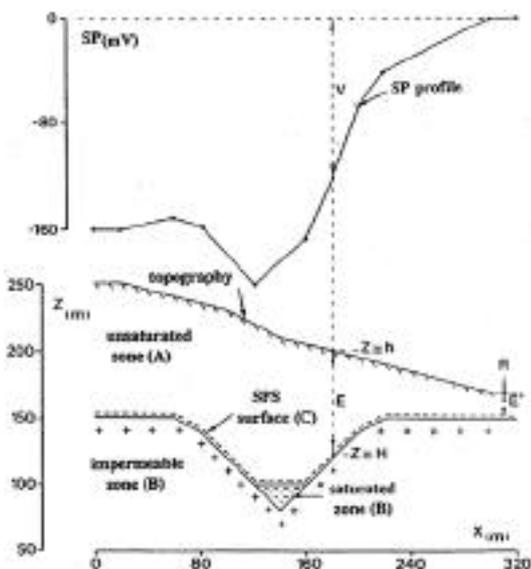


Figure 1 - Définition de la surface SPS (d'après Aubert et Yene Atangana, 1996)

Des mesures PS en fond de certains de ces forages ont confirmé cette relation linéaire qui s'écrit :

$$H_{SPS}(xy) = h(xy) - V(xy) / K - E^{\circ}$$

h étant l'altitude du lieu, V l'amplitude PS, E° l'épaisseur de la zone non saturée à l'aplomb de la station de référence des mesures où V est égal à zéro par convention, K un coefficient exprimé en mV/m et H l'altitude d'une surface géophysique dite SPS (figure 1).

Cette surface est calculée à partir, d'une part des données h et V, d'autre part des valeurs attribuées aux constantes E° et K. Elle représente l'interface entre le premier terrain non saturé et un second terrain comprenant à la fois la zone saturée, quand elle existe, et le substratum imperméable. Les constantes E° et K sont entièrement déterminées si on connaît H en au moins deux stations, à défaut elles seront estimées.

La figure 2 montre un exemple de validation de ce type de calcul. La surface SPS est ici calculée avec un nombre surabondant de données. Elle correspond, soit au niveau piézométrique, soit au toit de la formation imperméable. On notera un léger décalage entre la surface SPS et l'interface réelle, dû dans ce cas à la dissymétrie de la vallée. Un calcul plus complexe, basé sur la distribution des charges électriques, négatives en surface, positives en profondeur, pourrait donner un meilleur accord entre données PS et interface réelle.

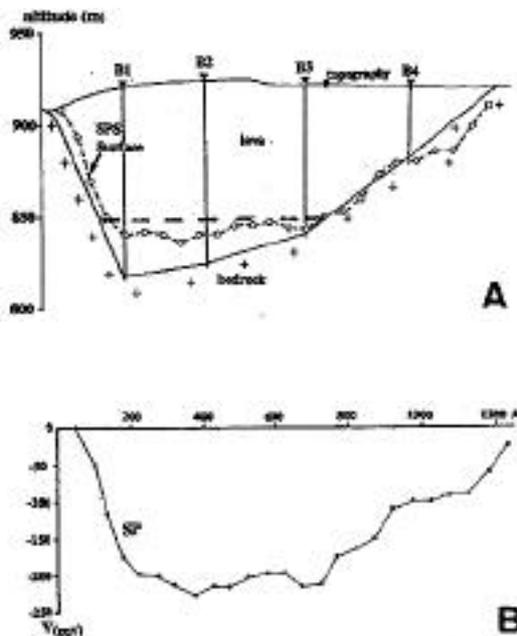


Figure 2 - Reconnaissance d'une variation d'épaisseur du milieu non saturé (d'après Aubert et Yene Atangana, 1996)

Hétérogénéités au sein du terrain non saturé

La prospection des hétérogénéités de résistivité au sein du milieu non saturé est au centre des problèmes posés en génie civil. Parmi les objets pour lesquels nous avons quelques résultats, on peut citer : les cavités, les poches de milieu drainant, les câbles et conduites, les fossés et murs.

Certains de ces objets créent une anomalie PS facile à interpréter. Ainsi, une poche de sable et un fossé donneront une anomalie négative tandis qu'un mur enterré dans un encaissant plus poreux et un sous-

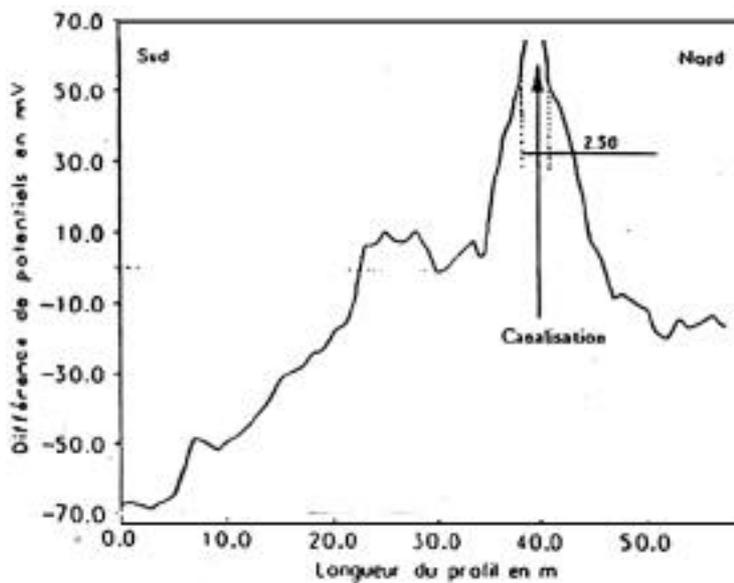


Figure 3 - Recherche de conduite enterrée (d'après Massebeuf, 1995)

solage de chemin ou de route créeront une anomalie positive. Un câble enterré dans une tranchée ne sera pas directement la source d'une anomalie et sera signalé par le signal dû à la tranchée. Le cas des canalisations est plus complexe.

L'anomalie est en général positive mais pas toujours. La **figure 3** montre l'anomalie créée par une conduite en acier de 22 cm de diamètre enterrée à environ 1,80 m sur un chemin empierré avec du basalte concassé. L'anomalie mesurée est créée ici essentiellement par le chemin, l'anomalie due à la conduite étant plus étroite et d'amplitude limitée à 20 mV environ.

La recherche de cavités a donné lieu à quelques expériences dont l'interprétation est toujours en cours. La **figure 4** donne l'exemple d'une cavité dont le toit a une dimension comparable à sa profondeur.

Le signal a une forme en M plus ou moins accentuée, qui peut dépendre de plusieurs facteurs parmi lesquels on citera :

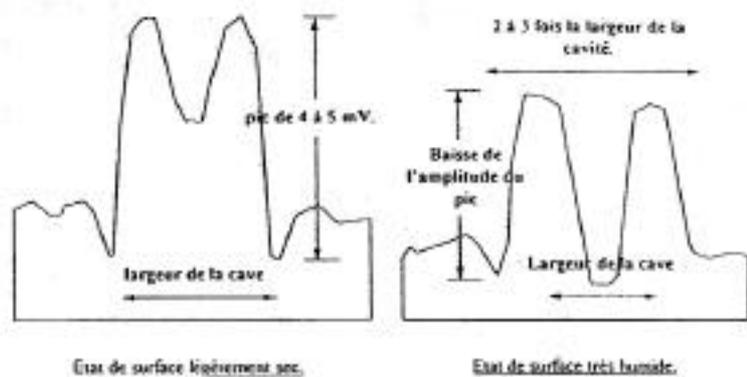


Figure 4 - Signature PS d'une cavité en fonction de l'état du sol (d'après Marin, 1996)

- l'état de fissuration de l'encaissant au dessus de la cavité, favorisant ou non une filtration particulière et créant elle-même de ce fait une anomalie ;

- L'état de la surface du sol, sec ou humide. Ce dernier point, illustré sur la **figure 5**, intervient en fait pour toute prospection PS, et particulièrement pour les signaux de faible amplitude comme c'est souvent le cas en génie civil. Un état de surface très humide crée en fait un premier terrain conducteur qui tend à atténuer l'effet des hétérogénéités plus profondes.

Des nombreuses expériences de recherches, effectuées récemment sur des cavités déjà reconnues ou non, montrent une grande diversité de signature et d'amplitude (Massebeuf, 1995 ; Marin, 1996). Dans certains cas, les résultats PS peuvent être comparés avec ceux donnés par la méthode géoradar ou la méthode électromagnétique.

Variations temporelles des signaux PS

La mesure d'une différence de potentiel PS entre deux stations peut naturellement être affectée par les variations bien connues du champ tellurique d'origine naturelle ou anthropique. Ces variations peuvent atteindre quelques dizaines de millivolts, voire plus, et sont à considérer comme des dérives nécessitant une correction éventuelle des mesures brutes.

Indépendamment de ces variations dont il faut s'affranchir, la mesure réitérée ou continue du signal PS

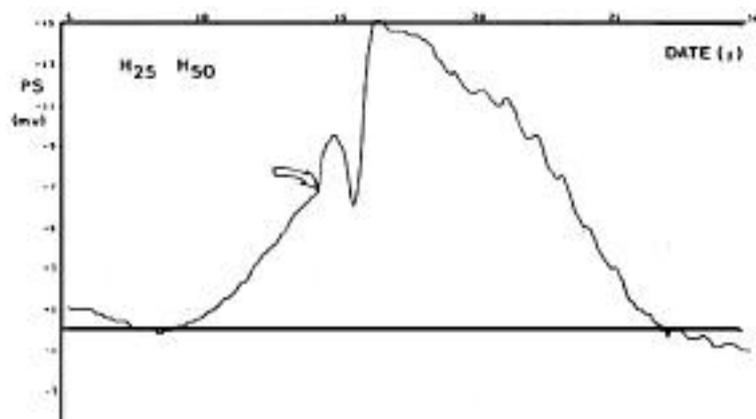


Figure 5 - Variation temporelle PS associée à un épisode pluvieux.
La flèche indique l'arrivée d'une forte pluie (d'après Lachassagne et Aubert, 1989)

entre deux stations fixes permet de suivre l'évolution des paramètres caractéristiques du terrain dans lequel sont implantés les capteurs.

La **figure 5** montre une variation PS enregistrée entre deux points situés à 25 et 50 cm de profondeur sur la même verticale.

On observe une corrélation entre la variation PS, de l'ordre de 15 mV, et la quantité d'eau pluviale

enregistrée pendant cette période de pluie qui a été précédée et suivie par deux périodes sèches. L'horizon 25 cm est atteint par le flux hydrique alors que l'horizon 50 cm ne l'est pas. L'élévation de la teneur en eau augmente le potentiel PS qui diminue relativement par ressuyage partiel, pour augmenter ensuite à la faveur du flux créé par la pluie orageuse du 14 juin, de l'ordre de 10 mm. Cette interprétation a été validée par des mesures associées de tensiométrie et d'humidité pondérale à différentes profondeurs (Lachassagne et Aubert, 1989). La mesure PS ne permet pas de connaître le flux ou sa variation d'une manière quantitative mais indique avec précision l'arrivée ou le ralentissement du front d'humectation à la profondeur du capteur.

Citons aussi les expériences de Ernston et Scherer (1986) qui ont fait des enregistrements tous les quinze jours pendant une période d'un an. Leurs résultats montrent aussi la corrélation des variations PS avec la température du sol et la pluviométrie.

Ces mesures montrent l'intérêt possible de la mesure PS, éventuellement corrélée avec d'autres paramètres donnés par piézométrie ou sonde à neutrons. Citons parmi les applications possibles le suivi des nappes et l'avertissement à l'irrigation.

||| Conclusion

L'application de la méthode PS aux problèmes de sub-surface remonte seulement à quelques dizaines d'années. Des résultats indéniables ont été obtenus et publiés, le plus souvent dans des rapports ou revues techniques peu accessibles. Mais l'utilisation de cette méthode est restée jusqu'à présent très limitée. La raison en est sans doute pour partie due à l'insuffisance des connaissances sur la génération des potentiels PS, et donc au manque de fiabilité des modèles d'interprétation proposés. Une autre raison nous semble tenir dans le fait que cette interprétation repose sur la prise en considération de nombreux paramètres et qu'on ne peut raisonner le plus souvent qu'au cas par cas. Malgré ces handicaps, l'accroissement des besoins de prospection du proche sous-sol ouvre des perspectives de développement qui passent selon nous par deux voies :

- disposer de cas de terrain parfaitement documentés pour analyser les signaux PS en fonction de tous les paramètres, connus ou soupçonnés, qui peuvent intervenir dans la création des potentiels PS ;
- entreprendre des études expérimentales pour contrôler l'influence de ces paramètres et proposer des modèles quantitatifs.

||| Bibliographie

Aubert M. and Q. Yene Atangana, 1996. SelfPotential method in hydrogeological exploration of volcanic areas, *Ground-Water*, vol.34, n°6 : 1010-1016.

Ernst K. and H.U. Scherer, 1986. Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters, *Geophysics*, vol. 51, n°10 : 1967-1977.

Lachassagne P. et M. Aubert, 1989. Etude des phénomènes de polarisation spontanée (PS) enregistrés dans un sol lors de transferts hydriques verticaux, *Hydrogéologie*, n° 1 : 7-17.

Marin O., 1996. Application de la polarisation spontanée pour la recherche de cavités souterraines, Mémoire CUST, Université Blaise Pascal.

Massebeuf P., 1995. Application de la polarisation spontanée au génie civil. Recherches d'hétérogénéités en subsurface, Mémoire CUST, Université Blaise Pascal.

C

hutes de pluie et résistivité du sol

Yves Benderitter¹, Jean-Jacques Schott²

¹ CNRS (URA 1367), Centre de Recherches Géophysiques, Garchy, 58150 Pouilly-sur-Loire, France

² Ecole et Observatoire de Physique du Globe, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France

Abstract

The relation between the electrical resistivity and the water saturation of a geological formation had been investigated by many authors. The calculation shows that a variation of the water content in a range of about 10% can produce a variation of resistivity of the same value. This estimation has been confirmed in measuring resistivities during a rainfall with an electrical dipole-dipole array ($a = 0,5$ m) displayed on an unsaturated soil. The variations of measured resistivity can exceed 10%. The resistivity takes a minimum value, the amplitude of which decreases with the investigation depth. This minimum also appears with a delay, the value of which increases with the investigation depth ; consequently, the resistivity measurements as a fonction of time are suitable to calculate a velocity of the rainfall infiltration.

Introduction

La résistivité électrique d'une roche est un paramètre très sensible qui dépend de la constitution de la roche, de sa structure et de ses caractéristiques hydriques. En prospection électrique courante, surtout si l'on s'intéresse à des profondeurs dépassant quelques mètres, on suppose que la résistivité en un point donné est stable pendant la durée très courte de la prospection. Il est cependant possible de mettre en évidence des variations de résistivité assez importantes en répétant une mesure à un endroit donné. Cela a été observé par Hesse (1965), par exemple dans le cadre de mesures appliquées à l'archéologie. Cela est aussi utilisé pour suivre les déplacements de l'eau dans le sol (traçage au sel artificiel ou naturel). La résistivité électrique d'un milieu géologique étant particulièrement sensible à la saturation en eau de ce milieu, on peut s'attendre à de fortes variations de résistivité quand on effectue des mesures répétées au dessus d'un milieu non saturé et en particulier au moment d'une chute de pluie.

Relation entre résistivité et caractéristiques d'une formation géologique

Depuis Archie (1942), plusieurs auteurs, pétroliers, physico-chimistes ou physiciens du sol, ont proposé de telles relations, toutes de nature expérimentale. Elles peuvent être mises sous la forme d'un polynôme du second degré dont la variable est la saturation en eau, les différents coefficients variant d'un auteur à l'autre suivant le cas d'application. La relation proposée par De Witte (1950) a été choisie lors d'études menées sur le bassin versant du Ringelbach (Schott et al, 1996). Elle tient compte de la présence d'argile et s'exprime de la façon suivante :

$$1/\rho_t = (\rho_w)^2 / w + \rho_w(p/\rho_w + p/\rho_{sh}) + p^2 / \rho_{sh}$$

ρ_t étant la résistivité de la formation, w la porosité, ρ_w le coefficient volumique de saturation en eau, ρ_w la résistivité de l'eau, p la teneur volumique en argile et ρ_{sh} la résistivité de l'argile.

On remarquera tout d'abord que, parmi ces cinq paramètres, seuls la saturation en eau et la résistivité de l'eau peuvent varier dans le temps à un endroit donné. Un calcul de sensibilité des paramètres a été effectué à l'aide de la relation précédente, en partant d'une situation moyenne de référence ($w = 0,5$; $\rho_w = 200 \Omega \cdot m$; $\rho_w = 0,5$; $p = 0,1$ et $\rho_{sh} = 10 \Omega \cdot m$). Les résultats sont présentés dans la **figure 1**. Les courbes relatives aux deux paramètres variant en fonction du temps sont représentées en trait plein et on peut constater l'importance des variations de la saturation en eau.

Le calcul précédent a été complété par un calcul de simulation destiné à prévoir les variations de résistivité qui seraient obtenues à partir de mesures de type dipôle-dipôle utilisant des électrodes régulièrement espacées le long d'un profil. Un tel dispositif a été retenu car il combine les avantages d'une investigation en fonction de la profondeur (sondage) et d'une investigation latérale (profilage) avec un nombre minimum d'électrodes. Ce nombre a été fixé à 10 et leur écartement à 0,5 mètre, ce qui assure une profondeur d'investigation maximum d'ordre métrique. Le calcul a été effectué en prenant comme modèle de terrain une formation de résistivité homogène égale à $250 \Omega \cdot m$, découpée en tranches horizontales de 0,05 m d'épaisseur. L'infiltration de la pluie a été simulée par le déplacement vers le bas d'une diminution de résistivité affectant successivement chaque tranche. Une diminution de résistivité de 250 à $190 \Omega \cdot m$ a été retenue en fonction du calcul de sensibilité précédent et une vitesse d'infiltration de $0,05$ m/h a été adoptée. Le calcul montre que les variations de résistivité sont mesurables. Elles sont évidemment plus marquées pour les mesures correspondant aux plus faibles profondeurs d'investigation. Pour chacune de ces profondeurs, la résistivité passe par un minimum. Ces minimums apparaissent successivement dans le temps dans l'ordre croissant des profondeurs d'investigation. Les décalages prévus sont de l'ordre de quelques heures.

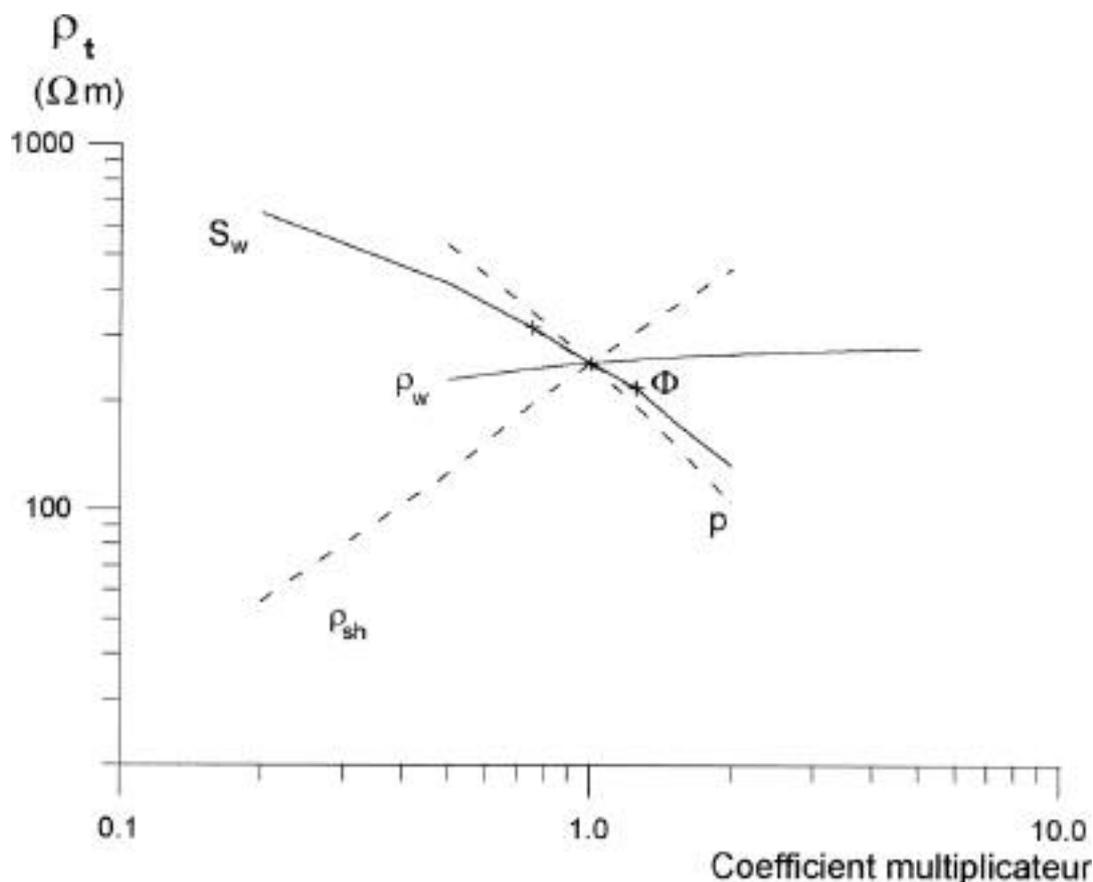


Figure 1 - Sensibilité de la résistivité aux variations des différents paramètres de terrain autour des valeurs moyennes de référence. Le calcul a été réalisé à partir de la relation proposée par De Witte (1950). Les abscisses sont graduées en valeurs correspondant au coefficient multiplicateur appliqué à chaque paramètre par rapport à sa valeur de référence (voir texte ci-dessus).

Exemples de suivi de résistivité effectués lors d'une chute de pluie

Le site de mesure situé près du Centre de Recherches Géophysiques de Garchy, comporte, en dessous d'un horizon humifère, différents niveaux marneux contenant quelquefois un peu de sable. Ces niveaux, d'une épaisseur totale d'environ 6 mètres, reposent sur une formation argileuse de 15 mètres d'épaisseur formant le substratum imperméable.

Les mesures ont été effectuées avec un résistivimètre Syscal R1 d'Iris Instruments équipé d'un dispositif multiélectrodes. Cet ensemble a été complété par une minuterie permettant de déclencher une séquence de mesure et sa mise en mémoire dans le résistivimètre lui-même, à des intervalles de temps présélectionnés. Un espacement de 1 heure entre les séquences a été choisi en fonction des résultats du calcul de simulation.

Une première vérification a été effectuée en plaçant le dispositif pour moitié sur un emplacement abrité de la pluie et pour moitié sur une zone exposée à la pluie. Huit heures et demi après la fin d'une pluie de 10 mm tombée en deux heures, on observe une baisse de résistivité dépassant les 15% dans la zone exposée. Cette forte variation peut s'expliquer par le fait que cette expérience s'est déroulée dans les premiers jours de novembre 1996, à un moment où la saturation initiale du sol était très faible.

D'autres mesures ont eu lieu les jours suivants, suite à une chute de pluie totalisant 29 mm sur plus de 16 heures. Elle a provoqué une chute de résistivité de 18% pour les mesures correspondant à la plus faible profondeur d'investigation.

D'autres mesures ont été effectuées à la fin de janvier 1997 lors d'une averse d'orage ayant délivré 8 mm d'eau en 1 heure. La diminution de résistivité est de l'ordre de 10% pour les mesures correspondant à la profondeur d'investigation la plus faible. La courbe correspondant à une profondeur d'investigation est repérée, sur la **figure 2**, par la notation "n = 1" (n indiquant le nombre d'écart interélectrodes a séparant le dipôle d'injection du dipôle de mesure).

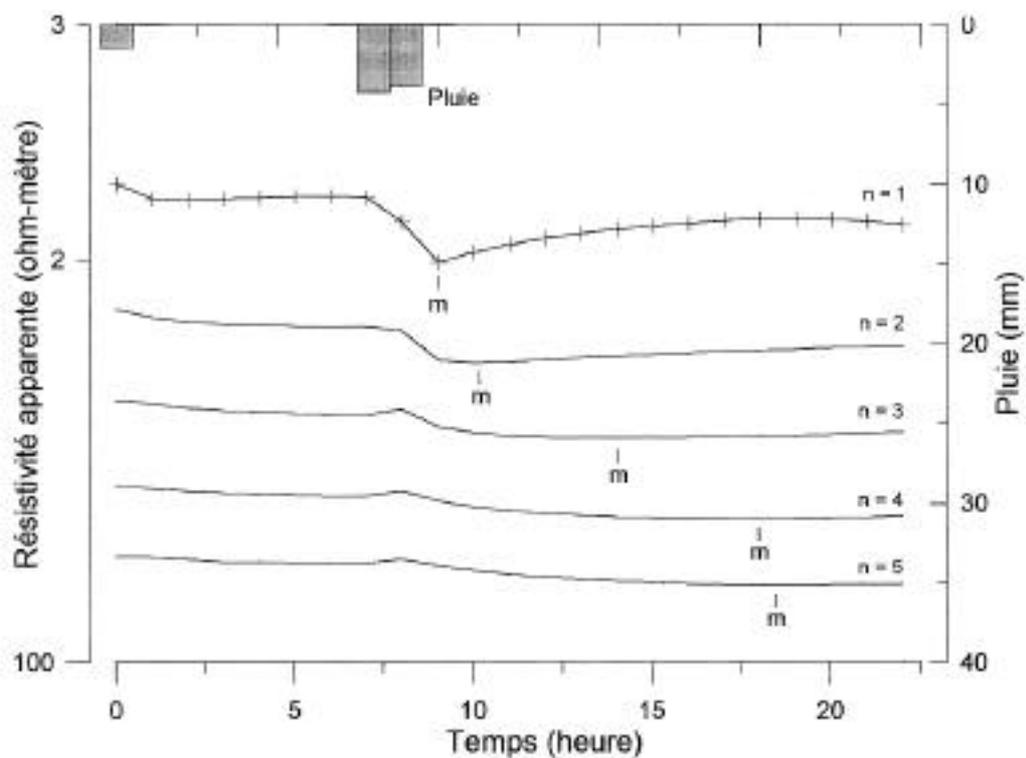


Figure 2 - Variations de résistivité en fonction du temps pour des quadripôles correspondant à différentes profondeurs d'investigation lors d'une pluie de 8 mm à la fin de janvier 1997.

On remarquera que les différentes courbes passent par un minimum m qui apparaît de plus en plus tard depuis la courbe (n = 1) jusqu'à la courbe (n = 5), c'est-à-dire dans l'ordre croissant des profondeurs d'investigation. La progression de ce retard n'est pas régulière, ce qui n'est pas étonnant étant donné la nature hétérogène des formations de surface, constatée par un forage à la tarière et soulignée par le fait que les différentes courbes sont décalées en résistivité.

Conclusion

Même s'il reste quelques points à vérifier (rôle des variations de résistivité de l'eau et des variations de température), il semble possible de remonter des variations de résistivité mesurées à une valeur de la vitesse d'infiltration de l'eau. Cette détermination par mesure géophysique aurait l'avantage de fournir une valeur intégrant un certain volume de terrain sans le perturber.

Cette étude fait partie des travaux destinés à valoriser les mesures de résistivité effectuées sur le bassin

versant du Ringelbach en vue de préciser les zones de circulation de l'eau dans le sol et de mieux interpréter les données de résistivité en termes de paramètres hydrogéologiques

Ce travail a été effectué dans le cadre du Programme de Recherche en Hydrologie de l'INSU (CNRS).

Bibliographie

Archie G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *J. Petroleum Technol. Tech. Pub.*, 5, 1422.

Hesse A., 1965. Prospections géophysiques à faible profondeur. Applications à l'archéologie. Dunod, 149 p.

Schott J.J., Benderitter Y., Ambroise B., 1996. Ground water flow in a catchment assessed using resistivity imaging. Assembly of the European Geophysical Society, La Haye, 6-10 May.

De Witte L., 1950. Relations between resistivities and fluid contents of porous rocks. *Oil Gas J.*, Aug., 24.

Le contact eau douce-eau de mer entre Dakar et Saint-Louis (Sénégal). Une étude géoélectrique

Same Diouf, Raymond Gomis, Joseph Tchani

ORSTOM, Laboratoire de Géophysique, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

Abstract

Resistivity methods were used with a vertical electrical sounding network to investigate the relationship between freshwater and saltwater along the northern coastline of Senegal, from Dakar to Saint-Louis.

The water-table aquifer lies in quaternary sands with very low piezometric heads, less than one meter near the coast. The depth of the saltwater interface, as revealed by the water resistivity using Archie's formula, is consistent with a gentle slope of the watertable towards the sea. Along the coast, different hydrogeologic conditions were found :

- in the northern section, the system is rather uniform, with a stable saltwater edge ;
- in the Cap Vert peninsula, saltwater intrusion has already begun due to pumping, and the aquifer is in a precarious condition, the saltwater edge seems to be presently blocked by a rise of the argillaceous basement.

The influence of groundwater abstraction and of evaporation in freshwater coastal lakes can clearly be seen on the electric and hydrogeologic measurements.

Introduction

Une étude géophysique par sondages électriques a été effectuée le long de la côte entre Dakar et Saint-Louis, dans le cadre du projet "Gestion des nappes des Niayas" initié par le Département de Géologie de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar en collaboration avec l'ORSTOM¹ et le CRDI².

L'objectif de ce travail a été de déterminer, le long de la côte, la morphologie de l'interface entre aquifères à eau douce et aquifères salés afin d'identifier les secteurs vulnérables à l'invasion par l'eau de mer.

Pour cette région, soumise à une forte démographie, qui est extrême dans la région du Cap-Vert, la gestion de la nappe exigerait l'instauration d'un contrôle permanent de la salinité. Le risque reste d'autant plus fort qu'au cours des trente dernières années, le module pluviométrique annuel est passé de 500 à moins de 300 millimètres dans cette région.

Les nappes des sables quaternaires

La nappe d'eau douce des sables quaternaires forme, entre Saint Louis et Dakar (figure 1) une structure hydrogéologique continue en contact avec l'océan Atlantique. La côte, rectiligne, est caractérisée par une géomorphologie invariable. La plage très plate est bordée d'un cordon dunaire pouvant atteindre quinze à vingt mètres de hauteur sur une largeur de quelques centaines de mètres.

De nombreuses dépressions interdunaires appelées "niayas" s'étendent derrière le cordon de dunes littorales.

Inondées en période pluvieuse, ces dépressions correspondent à l'affleurement de la nappe phréatique (Pereira Barreto, 1962) et il s'y développe une végétation abondante. Les niayas sont le siège d'une activité de maraîchage très importante.



Figure 1 - Carte de localisation

Résultats

Les sondages électriques ont permis de déterminer la morphologie de l'interface eau douce-eau salée. De très faibles variations de la charge hydraulique, inférieures au mètre sur la côte, ont pu être restituées par la loi de Ghyben-Hersberg en utilisant la profondeur du biseau salé, qui constitue une amplification de la pente piézométrique.

L'homogénéité lithologique des sables quaternaires a permis également l'utilisation de la loi d'Archie basée

¹ Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.

² Centre de Recherche pour le Développement International (Canada)

sur un facteur de formation stable. La qualité des eaux a pu être déduite dans certains cas ou bien les variations de la porosité sont suggérées par les écarts obtenus.

L'analyse des coupes géoélectriques obtenues a conduit à l'identification de plusieurs zones hydrogéologiquement distinctes, soit par leur structure, soit par leur dynamique.

❖ Au nord du profil de la grande côte, zone du delta du fleuve Sénégal

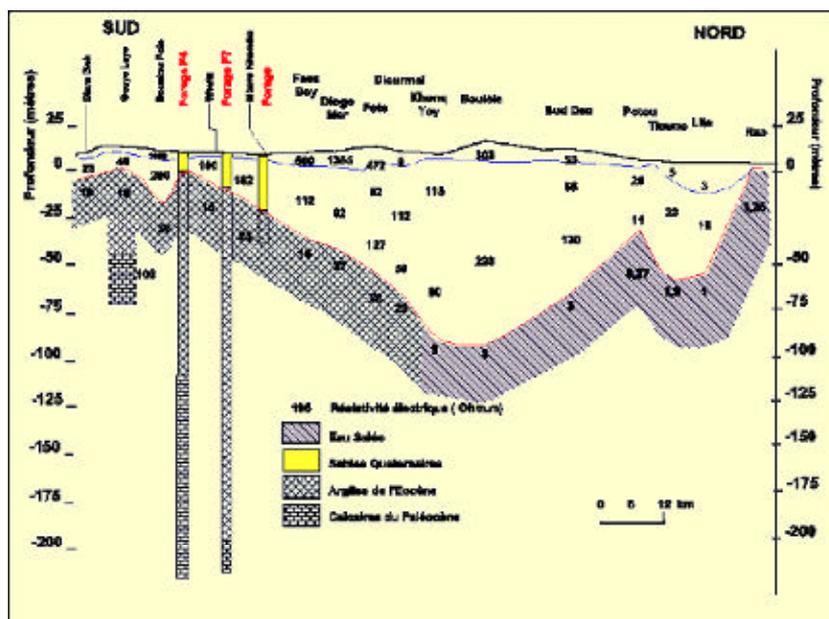


Figure 2 - Coupe géoélectrique interprétative le long de la grande côte du Sénégal (les valeurs de résistivité électrique, indiquées pour chaque site, sont en Ohm.m)

Cette zone est caractérisée par la présence de niveaux superficiels très conducteurs au-dessus d'un aquifère de sables à eau saumâtre surmontant une nappe salée à faible profondeur (figure 2). La salinité de ces eaux est due à une invasion marine par des chenaux dans lesquels l'eau salée se concentre par évaporation. En effet, l'eau de mer pénètre profondément en amont dans le fleuve durant la saison sèche.

Lors des crues, une partie de cette eau salée est refoulée dans les nombreux défluent du delta et s'y évapore.

La loi d'Archie appliquée au sondage de Lite a permis de déterminer les résistivités de l'eau d'imbibition des horizons sableux qui sont de 0,63 Ohm.m (caractéristique de l'eau de mer) et de 3,34 Ohm.m (caractéristique de l'eau saumâtre) pour une porosité efficace des sables de 30% et un coefficient de cimentation 1,3 (Meyer de Stadelhofen, 1991)

❖ Au centre du profil de la grande côte, entre Sud Dao et Fote

On a un important aquifère de sables à eau douce surmontant une nappe salée située entre 70 et 108 mètres de profondeur (figure 2). Il se développe dans une fosse subsidente qui représente l'extrémité sud orientale d'une dépression synclinale vers la côte. La mise en évidence du biseau salé entre Toro Beye et la mer (figure 3) permet une estimation de la cote piézométrique qui serait de 0,63 m à Potou, 1,5 m à Longor et 1,8 m à Toro Béye.

Suivi du fonctionnement et du comportement (pollution, risque...)

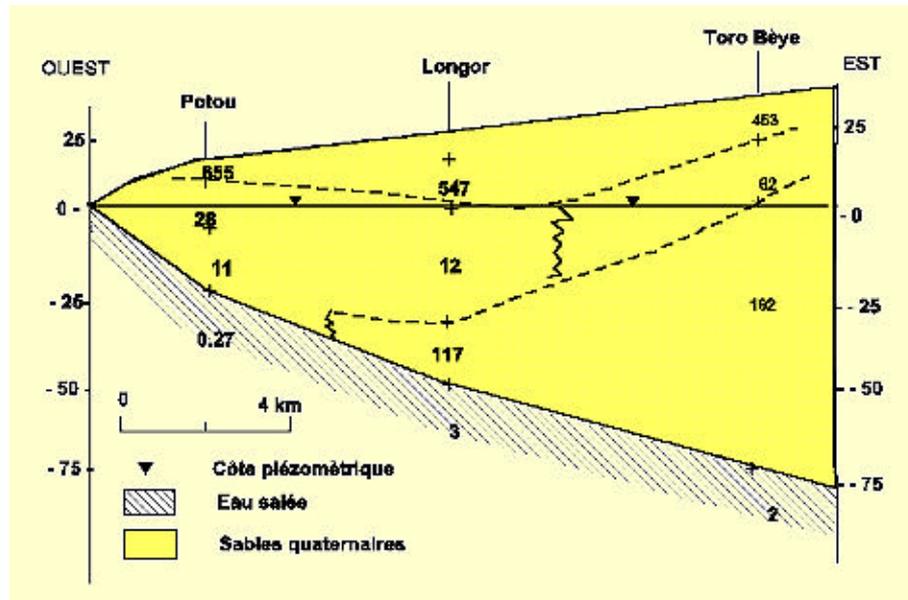


Figure 3 - Mise en évidence du biseau salé entre Tora Bèye et la mer
(les valeurs de résistivité électrique, indiquées pour chaque site, sont en Ohm.m)

❖ Au sud du profil de la grande côte

Cette zone de horst, déterminée par les failles sub-méridiennes (Martin, 1970) se caractérise par une faible épaisseur des sables, limitée par la remontée d'un substratum résistant correspondant aux argiles de l'Eocène inférieur (Fall, 1986) et progressant vers le sud (figure 2).

Cette épaisse couche d'argile de porosité cinématique nulle et de perméabilité très faible (environ 5.10^{-8} m/s) par rapport aux sables (6.10^{-2} m/s), constitue une barrière naturelle contre l'avancée du biseau salé dans ce secteur : les réserves sont relativement faibles et exploitées par puits dans ce secteur.

❖ La presqu'île du Cap-Vert

Elle est soumise à un risque de pollution marine en raison des possibilités de communication entre eau douce et eau de mer, puisque le mur des sables quaternaires s'approfondit à nouveau jusqu'à 70 m. Il existe plusieurs zones d'exhaure et un système complexe de lagunes et de lacs côtiers. Ainsi, la morphologie du biseau salé est très importante pour étudier la dynamique de la nappe. Deux cas sont analysés :

➔ Effet dû à l'exploitation à Ber Tialane

La Société Des Eaux (S.D.E), antérieurement dénommée SONEES, exploite une batterie de 5 forages dans la vallée fossile de Ber Tialane. L'exploitation du forage F5 (figure 4) ayant été abandonnée en raison d'une contamination saline, les sondages électriques ont confirmé la remontée du biseau salé jusqu'à 78 m de profondeur. Un seuil argileux, déterminé aussi par la méthode électrique, protège encore la zone d'extraction des forages F1, F2, F3 et F4, mais une remontée du biseau de 18 m pourrait être catastrophique pour cette zone.

L'étude de ce secteur a constitué un test des méthodes d'interprétation puisque l'utilisation de la loi de Ghyben-Herzberg a permis, pour ce secteur, de retrouver la pente générale de l'aquifère (2.10^{-3}), qui correspond à la valeur cartographiée. Par ailleurs, la validité de l'application de la loi d'Archie a été vérifiée en comparant les résistivités de l'eau calculées pour l'aquifère avec les conductivités des eaux mesurées avant distribution.

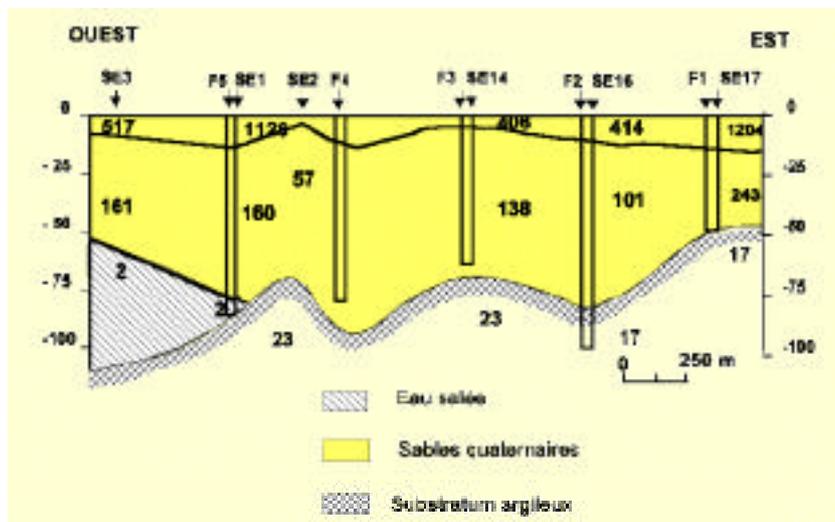


Figure 4 - Coupe géoélectrique de Ber Tialane
(les valeurs de résistivité électrique, indiquées pour chaque site, sont en Ohm.m)

→ **Le système dunaire et la grande niaye de Pikine**

Les coupes géoélectriques ont permis de caractériser les mécanismes régissant l'équilibre de la nappe des sables qui occupe le tombolo de la presqu'île du Cap-Vert.

L'aquifère à eau douce (60 Ohm.m) sous le cordon dunaire de Cambéréne (2 800 Ohm.m) forme une zone de recharge tandis que la grande niaye est caractérisée par la remontée de l'interface eau douce-eau salée (figure 5). Les niveaux piézométriques calculés pour l'ensemble des 15 sondages électriques à partir de la profondeur du niveau salé montrent clairement le rôle de drain par évaporation joué par la niaye qui présente une surface d'eau libre permanente.

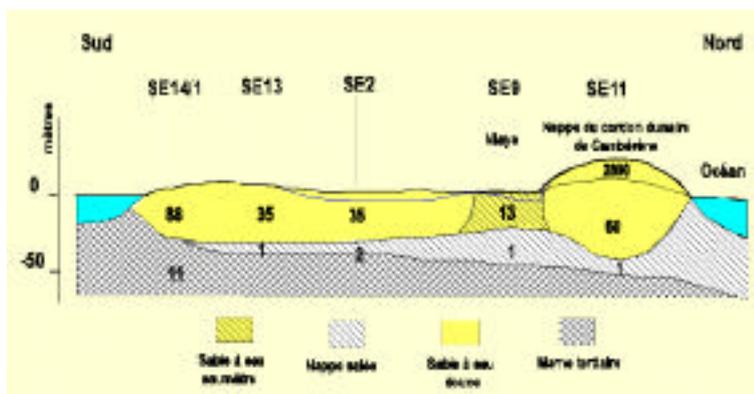


Figure 5 - Interprétation hydrogéologique de la coupe géoélectrique du tombolo de Pikine
(les valeurs de résistivité électrique, indiquées pour chaque site, sont en Ohm.m)

La loi d'Archie, appliquée à ces 15 sondages électriques, permet de calculer la résistivité électrique de l'eau de nappe. La comparaison avec les mesures de résistivité, réalisées dans les céanes (puits peu profond), a permis de différencier plusieurs zones de l'aquifère salé suggérant des variations latérales probables du taux d'argile (tableau 1).

N° sondages électriques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Résistivité calculée (eau de la nappe)	7,8	5,6	5,4	23	52,3 faible	très	5,6	26	6	23,2	23,2	23,2	5,6	23	11,63
Résistivité mesurée (céanes)	1,44	5,6	1,08	1,45	9,01		5,6	1,45	6				5,58	5,2	11,63

Tableau 1 - Résistivité (en Ohm.m) de l'eau de la nappe déduite de l'application de la loi d'Archie et mesurée dans les céanes

La zone exploitée, en communication avec la nappe de Cambérène, montre une résistivité de l'eau de la nappe exploitée stable, de l'ordre de 23 Ohm.m, correspondant ainsi à une porosité comprise entre 19% et 35%.

Conclusion

Ce type d'étude montre l'intérêt hydrogéologique de la méthode électrique qui pourrait être utilisée pour suivre l'évolution des équilibres des nappes côtières exploitées.

Bibliographie

- Fall M., 1986. Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des niayes de la grande côte du Sénégal. Thèse de 3^{ème} cycle UCAD, 182 p.
- Martin A., 1970. Les nappes de la presqu'île du Cap-Vert. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Publ. B.R.G.M, 49 p.
- Meyer de Stadelhofen C., 1991. Application de la géophysique aux recherches d'eau. Lavoisier, Paris, 183 p.
- Pereira-Baréto S., 1962. Etude pédologique des "Niayes" méridionales (entre Cayar et MBoro). Rapport Général ORSTOM.

Remerciements

Nous remercions P. Mourgues du laboratoire de Géophysique du centre ORSTOM de Dakar pour de fructueuses discussions sur l'ensemble du travail. Nous remercions aussi C.B. Gaye, responsable du 3^{ème} cycle, pour l'organisation des travaux de terrain et pour le suivi de l'étude. Nos remerciements vont à M. Dukhan pour sa participation à la mise en forme des figures.

C

artographie prédictive des propriétés mécaniques des altérites par mesure de la résistivité électrique en continu

Jean-Christophe Gourry¹, Robert Wyns², François Lebert³

¹ BRGM, Direction de la Recherche, 3 avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans, France

² BRGM, Service Géologique National, 3 avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans, France

³ BRGM, Département de Géophysique Appliquée, 3 avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans, France

Abstract

The aim of this research work is to assess the mechanical properties of alterites on basement areas. The basis of the study is the assumption that a relationship exists between the erosion thickness "dz" and the mechanical strength. Furthermore, because penetrometer measurements are very expensive for large-scale surveys, we chose a less-expensive physical parameter -electrical resistivity- for correlating mechanical strength.

A continuous electrical resistivity survey and penetrometer measurements were carried out over several tens of kilometers along characteristic weathering profiles. Three correlation sections between resistivity and hardness are identified :

- in the valley bottom where electrical resistivity and mechanical strength values are the highest and almost constant for the fresh rock,
- a zone composed of isalterites with continuous decrease of resistivity and hardness,
- a zone composed of alloterites with a slight inversion of the regression.

This study forms the first step towards applying these results to geostatistically compiling a ground hardness predictive map. An estimated confidence interval for the calculated mechanical strength is assigned to each map point.

Introduction

Les domaines des socles représentent 25% de la géologie affleurante de la France. Au cours des temps géologiques, notamment au Crétacé inférieur et au Paléocène, ces formations ont été fortement altérées et représentent par endroit plus de 50 m d'altérites. L'érosion a creusé par la suite des vallées dans ces altérites. C'est ainsi que, dans les zones schisteuses, on peut trouver à peu de distance des carrières d'extraction de granulats ou des exploitations d'argile pour des briqueteries suivant que l'on se trouve respectivement en fond de vallée (minimum d'altération) ou en haut de plateau (maximum d'altération).

Le but de nos travaux de recherche consiste à estimer les propriétés mécaniques de ces altérites superficielles afin d'en établir des cartes pouvant servir à différents corps de métier du génie civil : excavation pour des grands linéaires (routes...), enfouissement de tuyaux et câbles (gaz, électricité, communication).

Principe

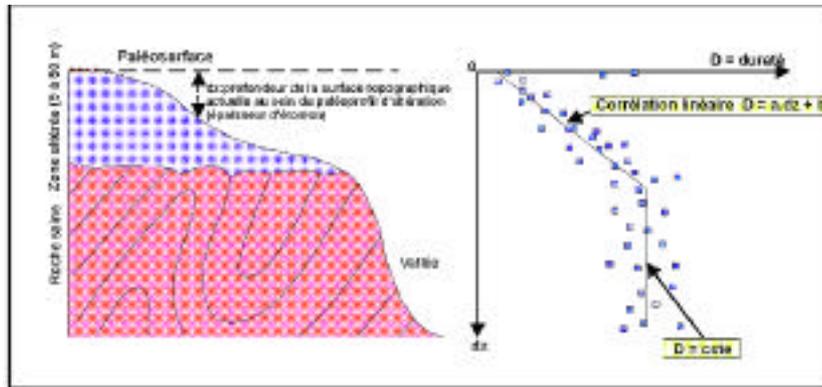


Figure 1 - Principe de la corrélation entre dz et le paramètre lié au degré d'altération

A la base de notre étude, nous supposons que l'épaisseur érodée "dz" est une caractéristique du niveau d'altération (figure 1). Cette épaisseur "dz" se calcule par soustraction de l'altitude des paléosurfaces reconstituées et du modèle numérique de terrain actuel. Nous voulons ainsi établir une corrélation entre "dz" et la

résistance mécanique des altérites, pour extrapoler géostatistiquement une carte de la résistance mécanique superficielle (figure 2). A cette carte, doit se superposer en chaque point une estimation du domaine de confiance des résistances mécaniques calculées. Or, les mesures par pénétromètre sont très coûteuses pour des levés à grande échelle. Nous allons donc chercher à corréler la résistance mécanique avec un paramètre physique moins coûteux. Nous avons choisi la résistivité électrique.

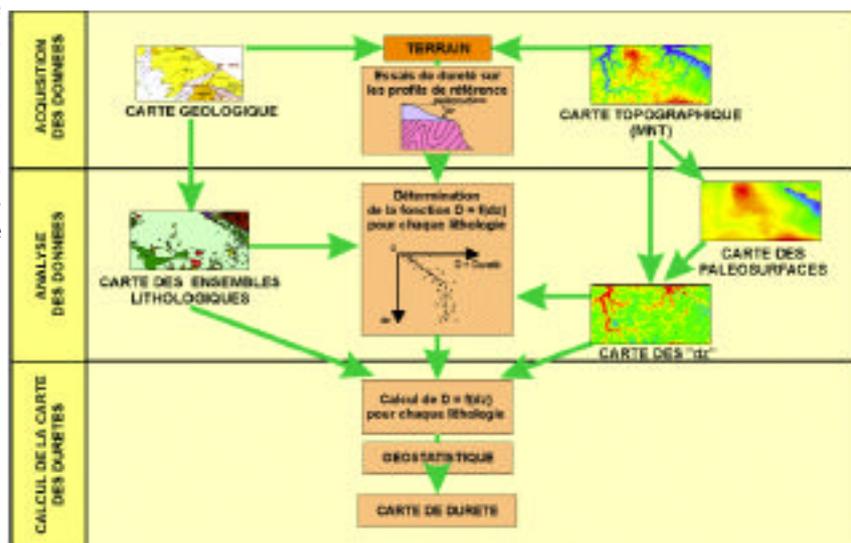


Figure 2 - Organigramme de réalisation d'une carte prédictive de dureté en domaine de socle altéré

||| Mesures de résistivité en continu et de pénétrométrie



Figure 3 - L'équipement de mesures de résistivité en continu (CORIM d'Iris Instruments).
On distingue les 6 tapis portant les électrodes capacitives

Ainsi, nous avons réalisé un levé de résistivité électrique (**figure 3**) de plusieurs dizaines de kilomètres le long de profils d'altération caractéristiques et les plus complets possibles, allant du fond de vallée (altération nulle) vers les plateaux (altération maximum).

L'équipement utilisé était constitué d'un dispositif quadripôle traîné disposant de 6 écartements de dipôle de potentiel (mesure par électrode capacitive) par rapport au dipôle de courant (injection électrostatique). Ce système permet une acquisition simultanée des 6 résistivités en continu (**figure 4**). Un calage spatial semi-automatique par GPS différentiel a permis d'obtenir une précision de quelques décimètres en x, y et z. Des mesures de résistance mécanique au pénétromètre manuel ont été réalisées le long de ces profils électriques au pas de 200 m en moyenne.

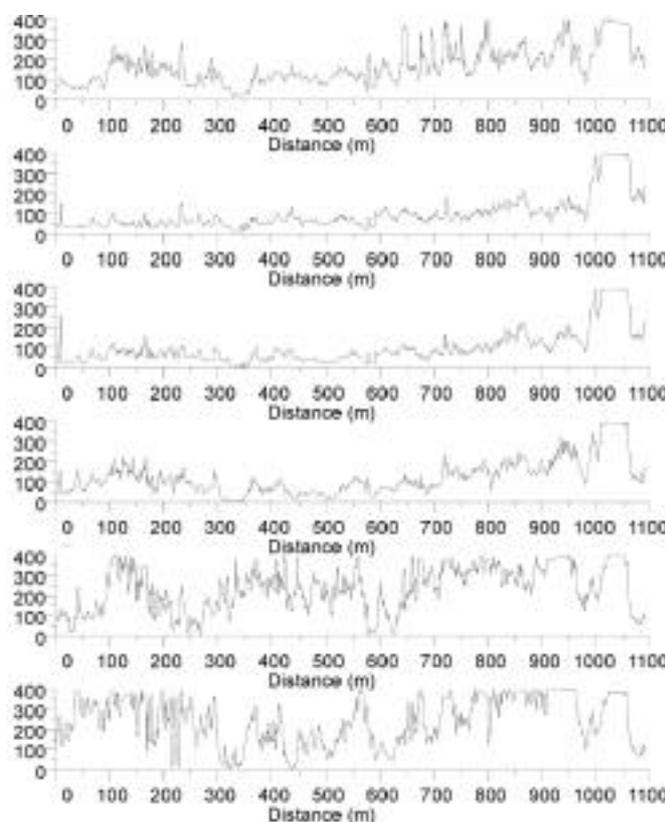


Figure 4 - Exemple de profils de résistivité en continu pour les 6 écartements du dipôle de mesure

Résultats

La courbe de correspondance entre la résistance mécanique et la résistivité électrique en fonction de l'épaisseur d'érosion montre l'existence d'une corrélation entre ces deux paramètres (**figure 5**). La résistance mécanique augmente proportionnellement à la résistivité au fur et à mesure que l'on descend dans les vallées. On distingue par ailleurs plusieurs tranches de corrélation :

➤ en fond de vallée, la résistivité électrique et la résistance mécanique sont maximales et quasi constantes, quand on se situe dans les roches saines sous les altérites.

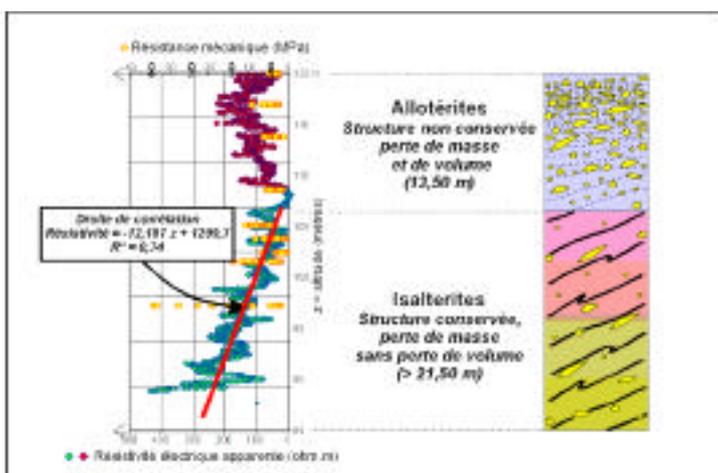


Figure 5 - Sainte Christine (Maine et Loire) - Profil de résistivité électrique et mesures au pénétromètre. (Mesures réalisées avec la participation financière du Conseil Régional des Pays de Loire)

➤ en remontant le long du profil d'altération, la résistivité et la résistance mécanique diminuent rapidement en fonction du "dz" jusqu'à atteindre un minimum constituant l'interface entre isaltérites et allotérites. Dans cette tranche, on se situe dans les isaltérites où l'altération a créé une perte de masse sans perte de volume.

➤ depuis cette interface, on enregistre une légère inversion de la pente de la droite de régression entre résistance mécanique et résistivité électrique d'une part et épaisseur d'érosion d'autre part : on se situe dans les allotérites, où on observe une perte de masse en même temps qu'une perte de volume due à un tassement des altérites. Il y a

donc une augmentation progressive de la proportion de grains de quartz dans ces roches, entraînant de ce fait une augmentation de la dureté et de la résistivité mécanique en arrivant sur le plateau.

Conclusion

Nous retrouvons la corrélation entre résistivité électrique et dureté des sols sur tous les profils réalisés. Néanmoins, les coefficients des droites de régression varient d'un profil à l'autre.

Cette étude est la première approche à l'extension de ces résultats pour constituer une carte de dureté des sols. La suite des travaux consistera à étudier la variation spatiale de la corrélation entre dureté et résistivité électrique, puis à extrapoler cette valeur de dureté à toute une carte par étude géostatistique.

Bibliographie

Wyns R., 1991. L'utilisation des paléosurfaces continentales en cartographie probabilistes. *Géologie de la France*, n°3, p. 3-9.

D

étermination précise de la salinité des sols par conductivimétrie électromagnétique

Jean-Olivier Job , José-Luis Gonzales Barrios, Miguel Rivera Gonzales

*CENID RASPA/ORSTOM, Programme de recherche sur la dynamique des sels dans la Comarca Lagunera,
A.P. 225-3, Z.I 35071, Gomez Palacio, Dgo, Mexique*

Abstract

The electromagnetic conductivimeter (EM) is a tool to estimate soil salinity. It has been first used for reconnaissance surveys and is now widespread. In our study, the EM38 (made by GEONICS) has an intercoil spacing of 1 m, allowing the measurement of soil salinity down to a depth of 2 meters. Calibration of instrument readings versus soil salinity has been done either by comparison with the four electrode probe response, or directly from the electric conductivity measurements of saturated paste extract. However, these calibrations are convenient for large surveys as long as soil porosity and soil water content are reasonably constant, so that the calibration holds. This is not the case in irrigated lands, where soil salinity distribution may be inverted or normal, without sharp boundary between soil horizons. Furthermore, soil moisture content is highly variable and its effect cannot be neglected in surveys.

In our paper we present the results of a simple calibration method which takes into account soil moisture and soil texture. Soil salinity is determined with accuracy in the low range (1-5 dS m⁻¹) with one equation, and in the high range with another one (5-35 dS m⁻¹). These equations are applied for medium textured soils with an accuracy better than 20%.

Suivi du fonctionnement et du comportement (pollution, risque...)

Introduction

La mesure de la conductivité électromagnétique (CEM) des sols est une propriété qui petit à petit s'est imposée comme une des méthodes de mesure de la salinité des sols (De Jonc et al., 1979 ; Williams et Bake, 1982 ; Job et al., 1987). En pratique, la mesure de CEM intègre un volume v de sol de quelques m^3 , variable suivant l'équipement utilisé.

Quel que soit cet équipement, il faut transformer la conductivité électromagnétique du volume v en conductivité électrique moyenne de l'extrait saturé de sol ($CE_{sat,v}$). Cette manière de faire est la seule qui permette une interprétation pédologique des mesures, la conductivité de l'extrait saturé de sol (en $dS m^{-1}$) étant la référence en la matière.

Cette transformation ne se fait pas sans problèmes. En effet, la conductivité électromagnétique d'un volume de sol donné, dépend, en plus de la teneur en sels du sol, de sa porosité, donc de sa texture, et de son état hydrique.

Le travail que nous présentons ici tente d'intégrer la texture du sol et sa teneur en eau dans les équations d'étalonnage. Cela permet une estimation plus précise de la conductivité électrique moyenne du sol, paramètre fondamental dans l'étude des bilans salins des sols et dans la gestion des périmètres irrigués des régions arides.

Dans notre étude, nous avons utilisé un conductivimètre Geonics EM-38, de distance interspire de 1 mètre, de fréquence d'excitation de 14,3 kHz, dont la profondeur de pénétration dans le sol avoisine les deux mètres.

Matériel et méthode

Notre étude porte sur des sols d'alluvions quaternaires du Centre Nord du Mexique, dans la Comarca Lagunera (état de Durango). Il s'agit d'un bassin endoréique, en climat semi-aride, dans lequel une centaine de milliers d'hectares sont irrigués. Depuis la mise en irrigation de la région dans les années cinquante, une grande partie des sels accumulés dans les parties basses du paysage ont été lessivés. La salinité originelle des sols a fortement baissé ou a été remplacée par l'alcalinisation. Nous avons donc actuellement des sols peu salés, mais souvent sodiques ou alcalins, ce qui rend le diagnostic par CEM d'autant plus difficile.

Dans une première expérimentation, l'effet de la texture et de l'humidité d'un sol de salinité constante le long du profil sur la conductivité électromagnétique a été évaluée pour trois sites expérimentaux. Tous trois ont été pris à la capacité au champ : le premier site est constitué par un sol sableux très peu salé ($0,4 dS m^{-1}$), le second par un sol sablo-limoneux peu salé ($1 dS m^{-1}$) et le troisième par un sol argileux salé ($2,9 dS m^{-1}$). Ces niveaux de salinité sont faibles, mais suffisants pour induire des baisses de production pour des cultures sensibles comme le noyer. La conductivité électromagnétique a été suivie au cours de la phase de dessèchement jusqu'à une humidité proche du point de flétrissement. Il a été vérifié que la salinité restait constante le long du profil durant toute l'expérimentation.

Dans une deuxième expérimentation, l'étalonnage proprement dit, $CEM=f(CE_{sat})$ a été fait sur vingt sept profils de sol qui ont été prélevés de 20 en 20 cm jusqu'à 200 cm. Sur les 270 échantillons ainsi récoltés, la mesure de la conductivité de l'extrait saturé et la teneur en eau pondérale ont été faites. Le pourcentage de sodium échangeable, la texture et la capacité d'échange ont été déterminés sur deux horizons (40-60 cm et 100-120 cm) pour chacun des 27 profils.

Ces deux expérimentations ont servi à établir une courbe d'étalonnage.

Enfin, le pouvoir discriminant de la conductivité électromagnétique, c'est à dire son aptitude à différencier deux volumes de sol de salinité voisine a été testé, avec une maille de mesure de 3 m, sur vingt huit

parcelles de 2 500 m² cultivées en noyers depuis une vingtaine d'années et réparties dans toute la région. Sur chacune des vingt huit parcelles, trois prélèvements d'humidité de 0 à 200 cm ont été faits.

La variable choisie pour mesurer la conductivité électromagnétique est la moyenne des mesures en mode vertical (CEV) et en mode horizontal (CEH), paramètre qui est le moins sensible aux variations de salinité en profondeur (Job, 1992). Nous noterons cette variable CVH.

Résultats

❖ Dans la gamme des teneurs en eau considérées pour les trois types de sol, les équations montrant l'effet de la teneur en eau du sol sur la variable CVH (en mS m⁻¹) sont les suivantes :

$$\text{sol sableux :} \quad \text{CVH} = 0,8 + a \quad (1)$$

$$\text{sol limono-sableux :} \quad \text{CVH} = 1,0 + b \quad (2)$$

$$\text{sols argileux :} \quad \text{CVH} = 2,2 + d \quad (3)$$

A partir de ces résultats, on peut calculer le facteur f de l'équation suivante :

$$\text{CVH}_2 = \text{CVH}_1 + f \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (4)$$

$$\text{soit } f = 3,6 - 0,04 s$$

avec s représentant le pourcentage pondéral en sable (g/100 g) du profil de sol entre 0 et 200 cm, θ_1 et θ_2 deux valeurs d'humidité pondérale (en g 100 g⁻¹) considérées à deux instants donnés.

Cette équation permet de transformer n'importe quelle mesure de CEM en mesure standard, à une teneur en eau du sol θ_1 , pour n'importe quelle texture du sol. La valeur choisie comme teneur en eau de référence est 20% pondéral, car c'est la teneur que l'on rencontre le plus fréquemment dans les sols irrigués de texture moyenne (Job, 1992).

❖ La deuxième expérimentation donne l'équation d'étalonnage proprement dite :

$$\text{CEsat}_{0-200} = 0,043 \text{ CVH}_{20} - 1,20 \quad r = 0,943 \quad n = 27 \quad (5)$$

Conclusion

La combinaison des équations (4) et (5) permet de déterminer la salinité globale des sols entre 0 et 200 cm de profondeur pour une texture et une teneur en eau du sol donné.

Bibliographie

De Jong E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.W.L., 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43 : 810-812.

Job J.O., 1992. Les sols salés de l'oasis d'El Guettar (Sud tunisien). Thèse de Doctorat, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, multigr., 151 p.

Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XXIII, 2 : 123-131.

Williams B.G., Hoey D., 1982. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Austr. J. Soil Res.*, 20 : 107-118.

A

analyse des relations entre les constituants des sols, la dynamique de la surface et les réflectances simulées ou mesurées par télédétection satellitaire.
Exemple de la vallée du fleuve Sénégal

Landing Mane¹, Pascal Boivin¹, Jean-François Richard², Claude Hammecker¹

¹ ORSTOM, Laboratoire de Pédologie, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

² ORSTOM, Le Haut des Envers, 88340 Le Girmont Val-d'Ajol, France

Abstract

The aim of this study is to analyse the relationships between the reflectance, the soil constituents and the different evolutions of soil surface. The ground level radiometrical measurements are in agreement with the satellite reflectance measurements.

Covariography has showed significative interrelation between reflectance and internal soil properties (clay content, organic matter content...) and between reflectance and superficial soil dynamics (stability, destructuration, accumulation, crusting). Simple models have been proposed for determining the clay content in soil.

The applying of these models has shown that the ground level CIMEL radiometer measurements overestimates the soil clay content in a range from 3 to 9%. On the other hand, SPOT satellite underestimates this content of 7% with radiometrical bands and of 9% with the indices.

Introduction

L'objectif de ce travail est l'analyse des interrelations entre les réflectances, les constituants internes du sol et les différentes formes d'évolution de la surface du sol. Dans cette perspective, les caractéristiques radiométriques de la surface du sol sont d'abord établies avant de vérifier les similitudes entre les réflectances mesurées au sol et celles mesurées par le satellite. Ensuite, la variabilité de ces réflectances est étudiée de manière détaillée pour savoir comment varient spatialement les caractéristiques et les indices radiométriques de la surface du sol. Enfin, la signification de ces caractéristiques radiométriques est envisagée d'un double point de vue. Dans un premier temps, l'étude des covariations spatiales avec les paramètres physico-chimiques des sols devrait permettre de répondre à une question souvent posée par les spécialistes : peut-on estimer certaines propriétés des sols grâce à la télédétection ? Dans un deuxième temps, l'étude des covariations spatiales avec les dynamiques de la surface du sol devrait permettre de répondre à une autre question importante : quelles sont les relations entre la réflectance, d'une part, et les phénomènes de fixation, de déstructuration et d'accumulation à la surface du sol, d'autre part.

Méthode d'étude

Le secteur d'étude se localise dans la vallée alluviale du fleuve Sénégal au sud de la ville de Podor (16°38' de latitude nord et 14°58' de longitude ouest).

❖ *Méthodes d'échantillonnage sur le terrain*

L'étude a été effectuée à deux échelles d'analyse (Richard, 1989) : l'échelle des géons (unités élémentaires de paysage) et l'échelle des segments de paysage (ensembles de géons).

➔ *A l'échelle des géons*

Sur une parcelle d'environ 3 km², 100 "stations", "relevés" ou, encore, points d'échantillonnage ont été répartis aléatoirement aux noeuds d'une grille à maille élémentaire de 75 m de côté, avec la contrainte de disposer de deux points au moins par maille de 300 m de côté.

➔ *A l'échelle des segments de paysage*

Suivant le même principe d'échantillonnage, 94 stations ont été étudiées à l'échelle des segments du "secteur Nianga-Podor", sur une superficie beaucoup plus grande d'environ 350 km². De cette façon, on dispose d'un échantillonnage comparable, mais plus général.

❖ *Méthodes d'échantillonnage sur l'image satellite*

Après le "recalage" de l'image Spot dans le système géographique (UTM) des cartes de la vallée, la correction des interférences atmosphériques et la transformation des luminances Spot en réflectances, le plan d'échantillonnage précédent est superposé à l'extrait de l'image satellitaire étudiée. Ensuite, la moyenne des valeurs de réflectance de 9 pixels (1 pixel central + 8 pixels périphériques), correspondant à chaque point observé sur le terrain, a été effectuée.

❖ *Les données collectées sur les points échantillonnés*

Deux types de données sont collectées sur les stations d'échantillonnage : des données de terrain (les constituants de la surface du sol et les valeurs de réflectance mesurées sur le terrain avec un radiomètre de simulation Spot : Cimel) et des données de laboratoire (les caractéristiques physiques et chimiques des sols aux points échantillonnés et, en ces points, les valeurs de réflectance extraites sur l'image satellite Spot).

❖ Les variables radiométriques

Au total, 7 variables spectrales, obtenues par les deux techniques de mesure de la réflectance (Cimel et Spot), ont été retenues. Pour la validation des modèles d'estimation de la variabilité spatiale établis à l'échelle des géons, nous avons tenu compte des données obtenues à l'échelle des segments de paysage. Ces variables sont notées de la manière suivante (**tableau 1**) :

	Échelle des géons		Échelle des segments de paysage	
	Cimel	Spot	Cimel	Spot
bande radiométrique du vert	(P1C)	(P1S)	(N1C)	(N1S)
bande radiométrique du rouge	(P2C)	(P2S)	(N2C)	(N2S)
bande radiométrique du proche infrarouge	(P3C)	(P3S)	(N3C)	(N3S)
indice de brillance	(PBC)	(PBS)	(NBC)	(NBS)
indice de couleur	(PCC)	(PCS)	(NCC)	(NCS)
indice de rougeur	(PRC)	(PRS)	(NRC)	(NRS)
indice de végétation	(PVC)	(PVS)	(NVC)	(NVS)

$$\text{Indice de brillance} = [((\text{vert})^2 + (\text{rouge})^2 + (\text{proche Inf. rouge})^2)/3]^{1/2}$$

$$\text{Indice de rougeur} = (\text{rouge})^2 / (\text{vert})^3$$

$$\text{Indice de couleur} = (\text{rouge} - \text{vert} / \text{rouge} + \text{vert})$$

$$\text{Indice de végétation} = (\text{rouge} - \text{proche infrarouge} / \text{rouge} - \text{proche infrarouge})$$

Tableau 1 - Variables spectrales obtenues par radiométrie de terrain (Cimel) et par le satellite Spot à deux échelles spatiales

||| Résultats

L'analyse des interrelations entre les facteurs d'évolution de la surface du sol et les réflectances a permis d'aborder un certain nombre de points relatifs à l'intégration des outils de télédétection dans l'étude du milieu.

➤ Les analyses statistiques des variables de réflectance ont montré de fortes corrélations entre les bandes radiométriques du visible et du proche infrarouge. Les corrélations entre ces bandes s'expliquent par l'absence ou la faiblesse de la végétation mais probablement aussi par le fait que les données Spot ont été corrigées des effets atmosphériques.

Les mesures radiométriques au sol et les réflectances mesurées par Spot sont concordantes à l'échelle des géons mais également à l'échelle des segments de paysage. La concordance entre données Cimel et données Spot autorise une vérification réciproque des informations fournies par ces deux systèmes de mesure de la réflectance et permet d'utiliser la radiométrie de terrain comme support ou aide à l'interprétation des données de télédétection satellitaire.

➤ L'analyse variographique a mis en évidence une organisation spatiale assez nette pour toutes les variables de réflectance. Cela confirme ce que l'on supposait déjà, à savoir les dépendances spatiales des pixels de télédétection. La variabilité spatiale des paramètres étudiés n'est pas aléatoire, car elle est fonction de cette organisation emboîtée des milieux. De plus, les variables sont spatialement auto-corrélées entre elles sur des distances relativement importantes. Si ces distances d'auto-corrélation spatiale rendent

bien compte de la taille moyenne des unités les plus représentatives, on peut donc admettre que les principales unités physiques du secteur étudié ont des dimensions moyennes qui dépassent la centaine de mètres dans la majorité des cas.

La covariographie a révélé des interrelations significatives, d'une part, entre les réflectances et les propriétés internes des sols (**figures 1 et 2**) et, d'autre part, entre les réflectances et les caractéristiques de surface des sols (stabilisation, déstructuration, accumulation, encroûtement).

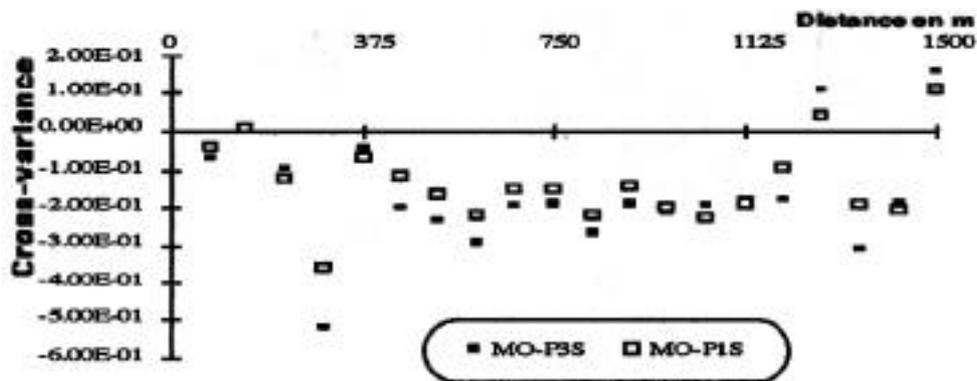


Figure 1 - Covariogramme de la matière organique et de la réflectance dans le vert du visible (MO-P1S) et le proche infrarouge Spot (MO-P3S)

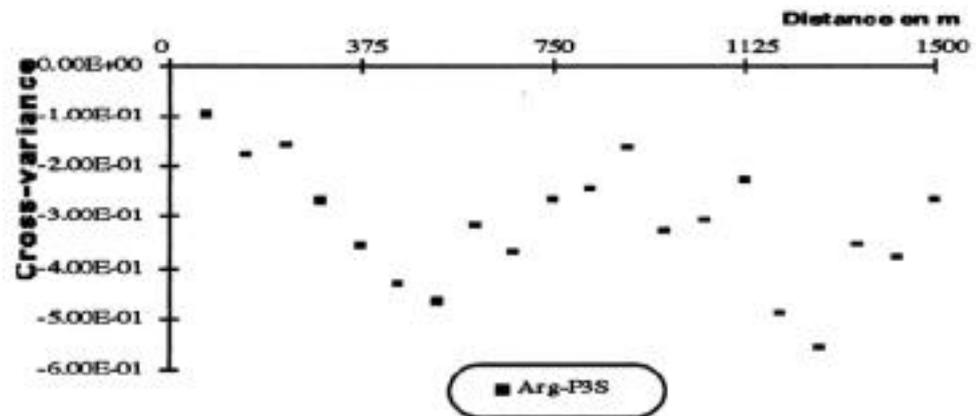


Figure 2 - Covariogramme de l'argile et de la réflectance dans le proche infrarouge Spot (Arg-P3S)

➤ Cette étude a en effet démontré que certains constituants des sols jouent un grand rôle dans la dynamique des milieux. C'est le cas de l'argile. Sa prise en compte dans le diagnostic des milieux de vallée alluviale est indispensable. Et il est donc important de pouvoir déterminer et cartographier les teneurs en argile des sols par télédétection... Une mise en correspondance entre l'argile et les réflectances a permis de trouver des modèles simples pouvant déterminer efficacement le taux d'argile dans le sol. L'application de ces modèles a montré que les réflectances mesurées au sol avec le radiomètre Cimel surestime la quantité d'argile dans le sol de 3 à 9% selon que l'on utilise les bandes radiométriques brutes (vert, rouge, proche infrarouge) pour l'estimation ou selon que les indices radiométriques (brillance, couleur, rougeur, végétation) sont employés dans la régression à variables multiples pour trouver l'équation associée au modèle. Par contre, le satellite Spot a tendance à sous-estimer l'argile contenu dans le sol, de 7% avec les bandes brutes ou de 9% avec les indices. Globalement, la combinaison des bandes radiométriques

triques du rouge et du proche infrarouge s'est avérée la "variable" la plus pertinente pour estimer le contenu des horizons de surface en argile (**figures 3 et 4**). Les écarts faibles entre les taux mesurés au laboratoire et les taux estimés par le biais des réflectances montrent que cette approche est fiable. Son application pourrait permettre d'alléger, sinon de se passer des lourdes et coûteuses analyses de laboratoire. Toutefois, pour affiner ces estimations concernant les teneurs en argile des sols, il est primordial de prendre en compte les caractéristiques de la surface de ces sols, notamment la couleur, la présence de litière et les formes du micromodèle. Ces deux derniers paramètres ont tendance à perturber les estimations...

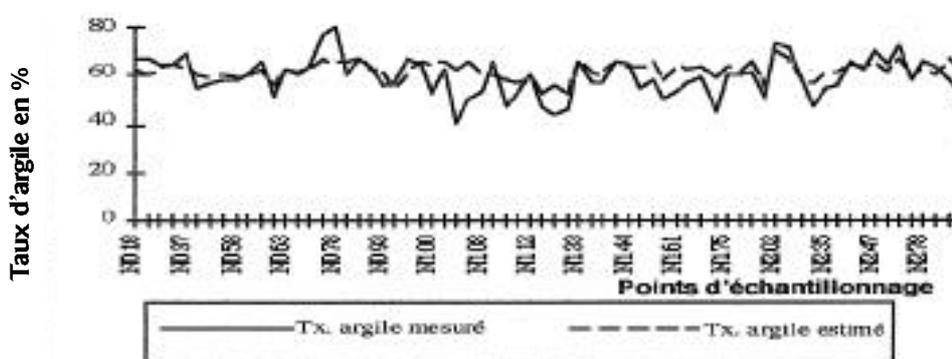


Figure 3 - Relations entre le taux d'argile mesuré au laboratoire et le taux d'argile estimé à partir des mesures de réflectance sur le terrain ($-0.28*N2C - 0.55*N3C + 85.62$)

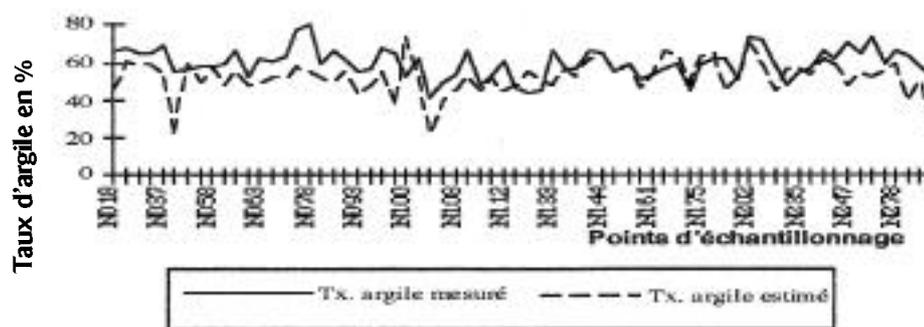


Figure 4 - Relations entre le taux d'argile mesuré au laboratoire et le taux d'argile estimé à partir des mesures de réflectance du satellite Spot ($-7.65*N2S - 6.75*N3S + 131.23$)

➤ Concernant les relations spatiales entre les réflectances de la surface du sol et la dynamique de cette surface, les résultats obtenus apparaissent très significatifs (**tableau 2**) :

	"Fixation"	"Destructuration"	Accumulation organominérale	Argile	Matière organique	Sodium	Calcium	pF4.2
vert	+	-		-	+		-	
rouge	+	-		-	+			-
proche infrarouge	+	-		-	+	-	-	-
indice brillance					+	-	-	-
indice couleur	+	-		-			+	
indice rougeur	-	+	+	+	-	+	+	+
indice végétation	-		+				-	

Tableau 2 - Relations de dépendance spatiale entre les variables structurales, physico-chimiques et de réflectance Spot (+ dépendance dans le sens de l'accroissement ; - dépendance dans le sens de l'abaissement)

➤ la "fixation" de la surface du sol par encroûtement va dans le même sens que l'accroissement de la réflectance dans le proche infrarouge, la "déstructuration" ou "déstabilisation" de la surface du sol se traduit par l'augmentation des valeurs de l'indice de rougeur, et les processus d'"accumulation organo-minérale" se manifestent par une baisse de la réflectance dans le proche infrarouge.

Conclusion

En définitive, les résultats acquis dans cette étude des relations entre support édaphique et réflectance, d'une part, et états de surface du sol et réflectance, d'autre part, permettent non seulement de comprendre l'organisation spatiale des caractéristiques de la surface du sol et des sols, mais surtout de faciliter le suivi des transformations spatio-temporelles des milieux naturels de la vallée du fleuve Sénégal à partir de la télédétection satellitaire.

Bibliographie

Richard J.F., 1989. Le paysage, un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux. IDT 72, ORSTOM, Paris, 210 p.

D

étermination de la relation résistivité électrique - teneur en eau au laboratoire. Application aux sols de Tunisie centrale

Jean-Pierre Montoroi¹, Gérard Bellier¹, Jean Larvy Delarivière²

¹ ORSTOM, Laboratoire des Formations Superficielles, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

² ORSTOM, Laboratoire de Pédologie, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

Abstract

A laboratory experiment is carried out in order to determine the relationship electrical conductivity (R) versus water content (Hp) for 13 soils sampled in a central Tunisia watershed. As water content increases, electrical resistivity decreases following an exponential law $R = a e^{b/Hp}$. The a regression parameter is correlated with the particle size distribution allowing to classify the soil samples. This parameter decreases with clay and silt content and increases with sand content.

During a field survey, soils are at different water contents and this variability must be taking in account. When the relationship R versus Hp is known, we calculate the $R_{0,2}$ value which is the electrical resistivity at a reference water content proposed as $0,20 \text{ gg}^{-1}$. If the relationship is unknown, we can measure at two given periods two couples (R, Hp), determine the a, b parameters considering an arbitrary exponential law and then obtain the $R_{0,2}$ value.

Introduction

Les méthodes électriques sont utilisées non seulement pour la prospection de formations géologiques et d'aquifères (Keller et Frischknecht, 1966 ; Mac Neill, 1980) mais également pour caractériser les sols affectés par la salinisation (Rhoades et Ingvalson, 1971 ; Vieillefon et Zante, 1981 ; El Oumri et Vieillefon, 1983 ; Montoroi, 1992).

Pour un matériau donné, la propagation du courant électrique dépend de la nature chimique des phases solides et liquides ainsi que de leur teneur respective (Gupta et Hanks, 1972 ; Rhoades et al, 1976 ; Nadler, 1982 ; Bottraud et Rhoades, 1985). L'interprétation du signal électrique reçu après injection du courant sera d'autant plus aisée que certains de ces paramètres seront considérés comme invariants.

Dans cette communication, nous développons une approche expérimentale au laboratoire pour déterminer la relation résistivité électrique-teneur en eau d'échantillons de sol. Les caractéristiques analytiques des courbes obtenues sont reliées aux caractéristiques physiques des échantillons, notamment la granulométrie, et les limites d'utilisation des méthodes électriques sur le terrain sont discutées.

Matériels et méthodes

Des échantillons de sol ont été prélevés dans la partie aval du bassin versant délimité par le lac collinaire d'El Gouazine (Albouy et al., 1995). Celui-ci est situé en Tunisie centrale entre Ain Jelloula et Ksar Lamsa à environ 50 km au nord-ouest de Kairouan (route MC 46) et à 110 km au sud-ouest de Tunis. Les échantillons ont été séchés à l'air, broyés et tamisés en deux fractions (2 mm et 200 μ m).

Un dispositif expérimental a été mis en place, sur le modèle de Rhoades et al. (1977), pour effectuer la mesure de la résistivité électrique d'un échantillon de sol au cours de sa dessiccation (**figure 1**). Celui-ci est placé dans une cellule de mesure cylindrique ouverte aux deux extrémités et fabriquée en PVC. La cellule a un diamètre de 53,4 mm et une hauteur de 5 cm, soit un volume de 111,98 cm³ et est remplie par environ 144 g de sol tamisé à 2 mm. L'échantillon est réhumecté sur une table à succion sous -10 hPa et est ensuite tassé durant 15 mn sous une pression de 10 N cm⁻². Quatre électrodes en inox sont enfoncées à mi-hauteur dans la paroi de la cellule selon le modèle Carré. Elles pénètrent l'échantillon sur une longueur de 11,2 mm. La teneur en eau pondérale est déterminée par pesée tandis que les lectures simultanées de résistance sont obtenues à l'aide d'un résistivimètre RMCA-4.

L'ensemble des échantillons a également fait l'objet d'une caractérisation minéralogique pour la fraction inférieure à 200 μ m, granulométrique et hydrophysique (ρ_f 3,0 et 4,2) pour la fraction inférieure à 2 mm.

Au moment des prélèvements sur le terrain, des mesures électriques ont été réalisées à l'aide d'un montage Wenner à faible écartement ($a = 10$ cm) et la teneur en eau pondérale des échantillons a été mesurée après dessiccation dans une étuve à 105 °C.

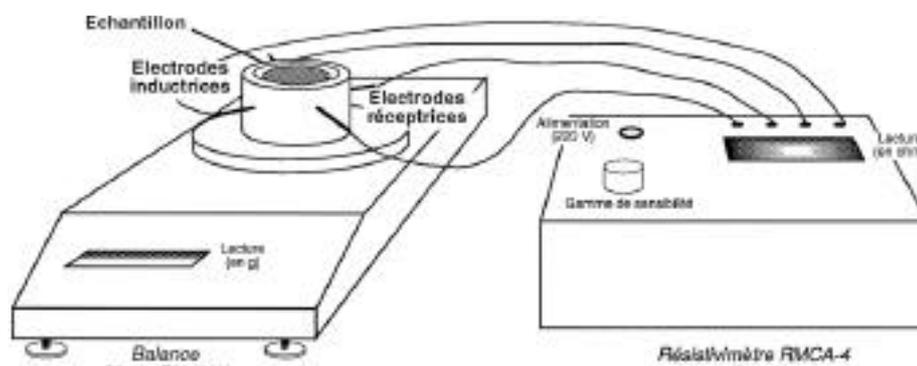


Figure 1 - Dispositif expérimental de mesure de la résistivité électrique

Résultats

❖ Les courbes résistivité électrique-humidité pondérale

Pour les échantillons de sol et le profil de sol P2, les courbes sont présentées dans la **figure 2**. Une loi exponentielle de type $R = a e^{b/H_p}$ a été calculée par régression où R représente la résistivité électrique apparente (en Ohm.m) et H_p la teneur en eau pondérale. Les caractéristiques des courbes $R = f(H_p)$ sont données dans le **tableau 1**.

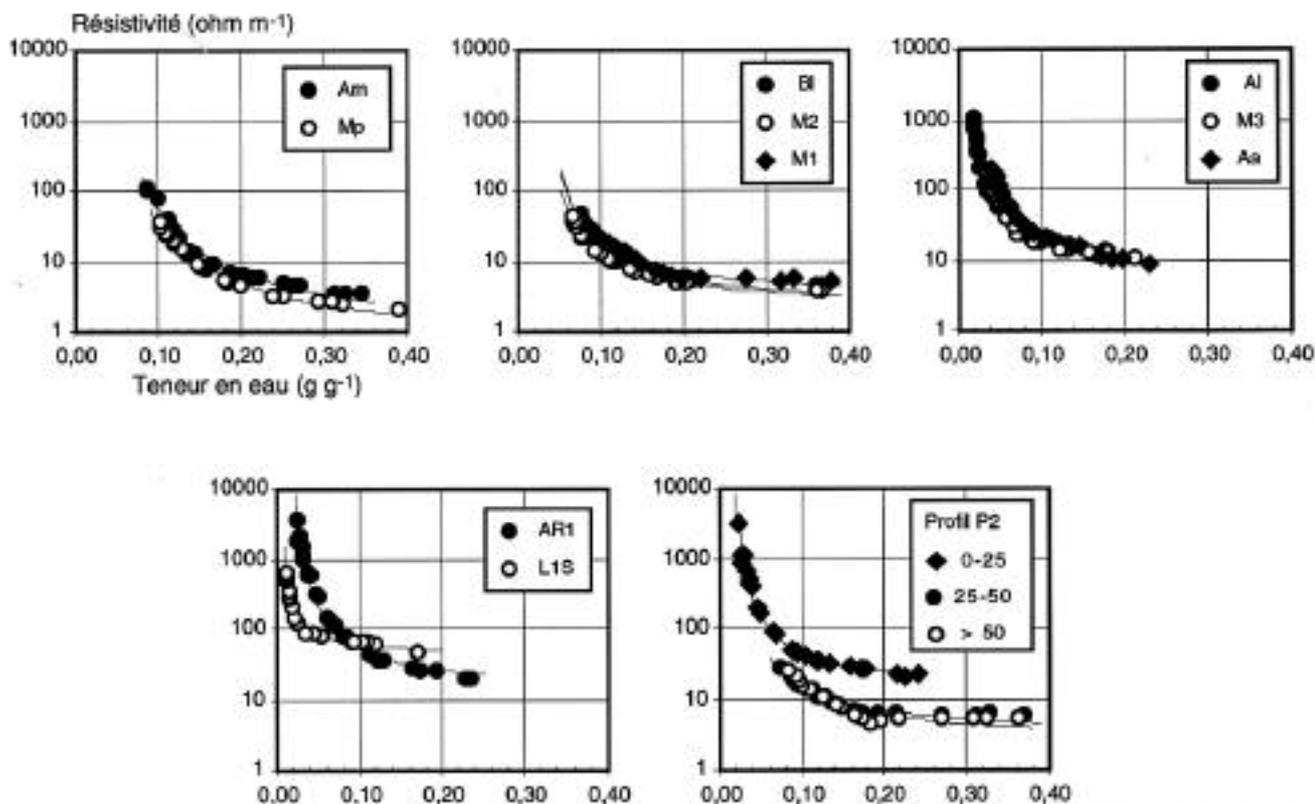


Figure 2 - Relation entre la résistivité électrique apparente (R) et la teneur en eau pondérale (H_p) pour les sols du site d'El Gouzine

Le coefficient a possède la dimension d'une résistivité électrique. Nous avons ainsi regroupé les échantillons de sol en 4 classes selon la valeur de a (**tableau 1**):

- pour $a < 1$, les sols Am et Mp sont les plus conducteurs car riches en minéraux argileux et en gypse.
- pour $1 < a < 3$, ils sont également conducteurs mais calcaires (M2, B1 et M1)
- pour $3 < a < 10$, c'est une classe intermédiaire comprenant les sols Aa, M3 et A1.
- pour $a > 10$, il s'agit de sol les plus résistants car pauvres en minéraux argileux : ils sont sableux et calcaires (AR1, L1S).

Le profil de sol P2 comprend une couche superficielle résistante ($a > 10$) reposant sur un horizon plus conducteur car plus argileux ($1 < a < 3$).

	Matériaux conducteurs (riches en minéraux 2/1 et 1/1)							Matériaux intermédiaires			Matériaux résistants (pauvres en minéraux 2/1 et 1/1)		
	Argileux gypseux		Argileux calcaires (marnes)					Aa	M3	Al	Sableux calcaires		
	Am	Mp	M2	Bl	M1	P2 ₂₅₋₅₀	P2 _{<50}				AR1	L1S	P2 ₀₋₂₅
R à saturation (en .m)	1,9	3,2	3,7	4,3	5,2	5,6	5,1	8,7	10,9	13,0	18,5	43,9	22,1
Hp à saturation (en g g ⁻¹)	0,39	0,35	0,37	0,37	0,38	0,37	0,36	0,23	0,21	0,18	0,23	0,17	0,24
R à sec (en .m)	35,0	106,5	40,3	44,9	29,5	27,5	25,1	202,6	183,1	1005,6	3594,3	611,1	3265,2
Hp à sec (en g g ⁻¹)	0,10	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02
a (en .m)	0,631	0,824	1,769	1,791	2,447	3,046	2,335	4,975	5,017	8,668	12,225	42,997	13,551
b (en g g ⁻¹)	0,399	0,416	0,202	0,234	0,212	0,154	0,187	0,148	0,127	0,088	0,146	0,030	0,120
r ²	0,993	0,984	0,988	0,983	0,953	0,928	0,893	0,997	0,991	0,995	0,922	0,990	0,997

Tableau 1 - Caractéristiques des courbes $R = a e^{b/Hp}$ pour différents matériaux du bassin versant d'El Gouzine

Il existe une relation entre le coefficient a et les principales classes granulométriques des échantillons (**figure 3 et tableau 2**). Ce coefficient diminue avec la teneur en argile (particules <2 µm) et en limons (2 µm < particules < 50 µm) et augmente avec la teneur en sables (50 µm < particules < 2 000 µm). Autrement dit, plus il est faible, plus le sol est conducteur et vice-versa.

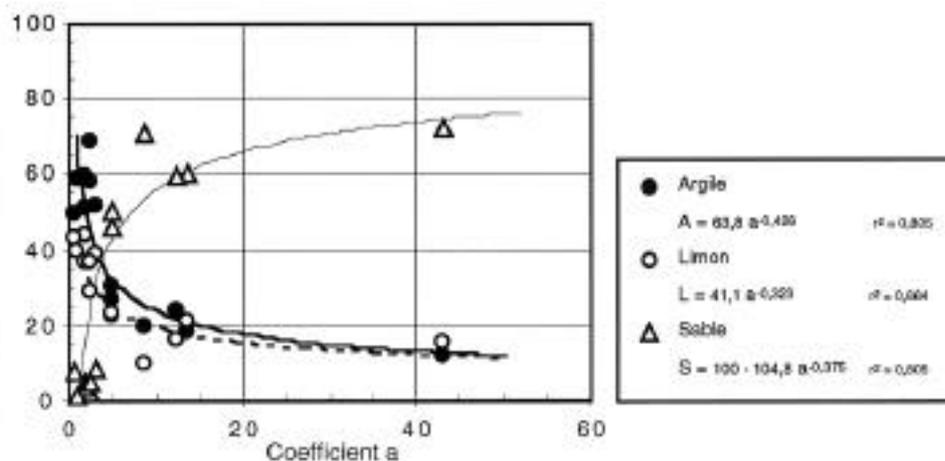


Figure 3 - Relation entre la granulométrie (en g 100g⁻¹) et le coefficient a (en .m)

	Echantillons de sol										Profil de sol		
	Am	Mp	M2	Bl	M1	Aa	M3	Al	AR1	L1S	P2 ₀₋₂₅	P2 ₂₅₋₅₀	P2 _{<50}
Argile	49,51	59,08	51,41	59,59	68,52	30,67	26,98	19,66	24,23	11,84	18,71	52,07	57,94
Limon	43,03	39,72	43,80	36,53	29,37	23,13	22,97	9,68	16,16	15,69	21,09	39,28	37,03
Sable (en g 100g ⁻¹)	7,46	1,20	4,80	3,88	2,12	46,20	50,05	70,66	59,61	72,47	60,20	8,65	5,04
pF 3,0	0,362	0,269	0,310	0,298	0,328	0,163	0,160	0,099	0,140	0,078	0,134	0,297	0,313
pF 4,2 (en g g ⁻¹)	0,251	0,193	0,210	0,208	0,227	0,106	0,101	0,057	0,090	0,037	0,084	0,204	0,216
H _p terrain (en g g ⁻¹)	0,206	-	0,177	-	0,227	-	0,081	-	-	0,025	-	-	-
R _{terrain} (en .m)	1,1	-	22,3	-	8,4	-	47,1	-	-	860	-	-	-
R _{calculée} (en .m)	4,4	-	5,6	-	6,2	-	24,1	-	-	144,7	-	-	-
R _{0,2} (en .m)	4,7	6,6	4,9	5,8	7,1	10,4	9,5	13,4	25,4	50,0	24,6	6,6	6,0

Tableau 2 - Caractéristiques physiques des sols du bassin versant d'El Gouzine (avril 1995)

❖ Comparaison entre les mesures de terrain

A partir de sondages électriques réalisés sur le terrain, les mesures de l'humidité pondérale et de la résistivité électrique d'un matériau donné peuvent être resituées sur une courbe résistivité électrique-teneur en eau. Pour les échantillons de sol Am, M2, M1, M3 et L1S, on constate que la mesure de terrain R_{terrain} à une humidité H_p est du même ordre de grandeur que la valeur calculée $R_{\text{calculée}}$ par la courbe ajustée $R=f(H_p)$, aux erreurs expérimentales près.

Au cours d'une campagne de mesures sur le terrain, on rencontre des matériaux à des états d'humidité variables. Pour comparer les valeurs de résistivités électriques mesurées, il conviendrait donc de rapporter ces valeurs à une teneur en eau pondérale de référence.

Dans cette étude, on propose la valeur de 0,20 g g⁻¹, qui est commune à l'ensemble des échantillons, et on calculera la résistivité électrique $R_{0,2}$ correspondante.

Ce calcul peut être fait de deux manières :

- si on détermine la relation $R = a e^{b/H_p}$ au laboratoire pour un sol donné, le calcul de $R_{0,2}$ est immédiat.
- sinon, il suffit d'avoir, pour un même sol pris à deux instants données, deux couples de mesures (R, H_p) et (R', H_p'). Par un calcul simple, les coefficients a et b de la relation $R = a e^{b/H_p}$ sont :

$$a = R / e^{b/H_p} = R' / e^{b/H_p'} \text{ et } b = (H_p H_p' / (H' - H)) \ln R/R'$$

et $R_{0,2}$ est alors déduit.

Un tel calcul du $R_{0,2}$ présente l'intérêt majeur de lever certaines erreurs d'interprétation des mesures de résistivités électriques sur le terrain.

Conclusion

L'étude de la relation résistivité électrique (R) - teneur en eau pondérale (Hp) montre les points suivants :

- les mesures électriques effectuées sur le terrain nécessitent la connaissance de l'état d'humidité du sol ou de la formation superficielle.
- au niveau d'un profil de sol, la mesure électrique doit correspondre à un petit volume prospecté et donc être réalisée avec un quadripôles à faible écartement ($a < 10$ cm). Pour des écartements supérieurs la variabilité spatiale de la teneur en eau est alors à considérer.
- pour comparer les résistivités électriques de deux matériaux donnés, il convient de rapporter ces mesures à une teneur en eau de référence. Ce calcul est possible lorsque l'on connaît l'expression analytique de la relation $R = f(Hp)$ qui est de type exponentielle, $R = a e^{b/Hp}$: nous proposons la valeur de référence de $0,20 \text{ g g}^{-1}$.
- sans connaître cette expression analytique, nous proposons une méthode qui permet, à partir de deux couples (R, Hp) obtenus à deux instants donnés, de calculer la résistivité à la teneur en eau de référence.

En perspective, cette démarche devra être validée avec un échantillonnage de sols plus important et la signification physique de la relation $R = f(Hp)$ sera analysée en considérant les propriétés électriques des phases solides et liquides .

Bibliographie

Albouy Y., Bellier G., Job J.O., Montoroi J.P., Arfaoui M., Gaaloul N., Gasmi M., Guigen N., Khalifa F., Lamy V., Larvy Delarivière J., Millot G., 1995. Application des méthodes géophysiques à l'étude des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/CRGR, Bondy, 50 p. et annexes.

Bottraud J.C., Rhoades J.D., 1985. Referencing water content effects on soil electrical conductivity - salinity calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J., 49 : 1579-1581.

El Oumri M., Vieillefon J., 1983. Etude expérimentale de la conductivité électrique globale des sols. Application à l'estimation de leur salinité. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XX, 2 : 91-108.

Gupta S.C., Hanks R.J., 1972. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 : 855-857.

Keller G.R., Frischknecht F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon, Tarrytown, NY.

Mac Neill J.D., 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Technical note TN-5, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.

Montoroi J.P., 1992. Le contrôle de la salinité à l'aide de capteurs électriques. Application à un périmètre irrigué de la basse vallée de la Méjerdah (Tunisie). II- La sonde quadripôle. Agron. Trop., 46, 3 : 233-240.

Nadler A., 1982. Estimating the soil water dependence of the electrical conductivity soil solution / electrical conductivity bulk soil ratio. Soil Sci. Soc. Am. J., 46 : 722-726.

Rhoades J.D., Ingvalson R.D., 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35 : 54-60.

Rhoades J.D., Raats P.A.C., Prather R.J., 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 40 : 651-655.

Rhoades J.D., Kaddah M.T., Halvorson A.D., Prather R.J., 1977. Establishing soil electrical conductivity calibrations using four-electrode cells containing undisturbed soil cores. *Soil Sci.*, 123, 3 : 137-141.

Vieillefon J., Zante P., 1981. Etude du régime hydrique et de la salure en périmètre irrigué sur sol gypseux salé. DRES-ORSTOM, Tunis, Et. Spéc. 190, 101 p.

A

analyse bayésienne par chaîne de Markov de cartographie pôle-pôle. Aspects théoriques et exemples d'application

Jean-Jacques Schott¹, Myriam Schmutz², Eric Frugier¹, Vincent Girard³

¹ Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France

² C.E.R.E.G., 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex, France

³ E.N.S.P.S., Boulevard Brandt, 67400 Illkirch, France

Abstract

Bayesian formulation of the inverse problem in electrical methods leads to the estimation of the posterior probability distribution of the unknown parameters, given a prior distribution and the set of measurements. In our method, the posterior distribution is explored with the help of an appropriate Markov chain. This is easily done in 1D modelling but is much more tedious in higher dimensional cases. As a preliminary step before true 2D or 3D bayesian analysis, we have implemented a method based upon 1D modelling. The successive soundings carried out on a given profile are inverted simultaneously, the inversions being linked together by smoothing factors which control the horizontal as well as the vertical variation of the resistivity. Thus, we obtain approximate 2D smooth models, each block of constant resistivity being characterized by a marginal posterior probability density which shows the resolution we can expect. This analysis has been applied to two very different contexts :

- in the frame of a hydrogeological study undertaken by the L.T.H.E., Grenoble, we have carried out measurements in sand and gravel formations draining groundwater ;
- the structure of a landslide located in marl formations (Barcelonnette, Alpes de Haute Provence, France) has been investigated.

Suivi du fonctionnement et du comportement (pollution, risque...)

Introduction

Nous présentons une application de l'analyse bayésienne à l'inversion de panneaux de mesures électriques pôle-pôle, dans l'approximation où le problème direct est résolu dans un cadre 1D. Rappelons que la formulation bayésienne du problème inverse s'écrit :

$$P_{pd}(\mathbf{X} = \mathbf{r} / \mathbf{Y} = \mathbf{d}) = \frac{P(\mathbf{Y} = \mathbf{d} / \mathbf{X} = \mathbf{r}) P_{ad}(\mathbf{X} = \mathbf{r})}{P(\mathbf{Y} = \mathbf{d} / \mathbf{X} = \mathbf{r}) P_{ad}(\mathbf{X} = \mathbf{r})} \quad (1)$$

où \mathbf{X} est le vecteur des paramètres, prenant ses valeurs dans un domaine de \mathbb{R}^N , \mathbf{Y} le vecteur des données, prenant ses valeurs dans un domaine de \mathbb{R}^D , P_{ad} la probabilité a priori sur \mathbf{X} , $P(\mathbf{Y} = \mathbf{d} / \mathbf{X} = \mathbf{r})$ la probabilité conditionnelle sur les observables \mathbf{Y} pour un modèle donné et $P_{pd}(\mathbf{X} = \mathbf{r} / \mathbf{Y} = \mathbf{r})$ la probabilité a posteriori sur les paramètres sachant les observables.

Dans notre cas, $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_D)^T$. X_i est une variable aléatoire discrète prenant ses valeurs dans l'ensemble $E = \{j\}$, $j = 1, 2, \dots, N_E$ et \mathbf{Y} prend des valeurs de la forme (d_1, d_2, \dots, d_D) . Avec ces notations, (1) s'écrit explicitement :

$$P_{pd}(\mathbf{X} = \mathbf{r} / \mathbf{Y} = \mathbf{d}) = \frac{P(\mathbf{Y} = \mathbf{d} / \mathbf{X} = \mathbf{r}) P_{ad}(\mathbf{X} = \mathbf{r})}{P(\mathbf{Y} = \mathbf{d} / \mathbf{X} = \mathbf{r}) P_{ad}(\mathbf{X} = \mathbf{r})} \quad (2)$$

Classiquement, la loi de probabilité des observables, pour un modèle fixé, s'écrit sous une forme gaussienne (Sen et Stoffa, 1996) :

$$P(\mathbf{Y} = \mathbf{d}_{obs} / \mathbf{X}) = C \exp - \frac{1}{2} (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{F}(\mathbf{X}))^2 \quad (3)$$

où $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ est la fonctionnelle du problème direct, permettant de calculer la résistivité apparente pour un dispositif donné. Nous utilisons la méthode du filtrage linéaire en utilisant l'algorithme proposé par Anderson (1979).

La difficulté, dans cette approche, est de calculer, sur toutes les valeurs possibles des paramètres, la somme figurant au dénominateur de la formule (2). Nous l'avons résolue par l'élaboration d'une chaîne de Markov qui possède la loi a posteriori sur \mathbf{X} comme loi d'équilibre. Par ailleurs, nous nous intéressons à des modèles à grand nombre de couches, qu'on peut considérer comme la discrétisation d'une variation continue de la résistivité avec la profondeur.

Estimation de la loi a posteriori dans le cas 1D

Si la chaîne de Markov est irréductible et ergodique, la loi d'équilibre est aussi la loi invariante, ce qui se traduit par la relation :

$$\lim_n P(\mathbf{X}_n = \mathbf{r} / \mathbf{X}_0 = \mathbf{s}) = \lim_n P_{tr}^n(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = P_{pd}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

où P_{tr} est la loi de transition de la chaîne. Nous définissons la probabilité de transition par la propriété :

$$P_i(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = P_{pd}(\mathbf{X} = \mathbf{r} / f_i(\mathbf{X}) = f_i(\mathbf{r})) \quad \text{quand } f_i(\mathbf{r}) = f_i(\mathbf{s})$$

$$P_i(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = 0 \quad \text{quand } f_i(\mathbf{r}) \neq f_i(\mathbf{s})$$

où $f_i(\mathbf{r}) = (j_i, \dots, j_{i-1}, j_{i+1}, \dots, j_N)$ correspond à une transition au cours de laquelle seule la résistivité de la couche i est susceptible de varier.

Posant $q_{k_i} = P_{pd}(\mathbf{X} = \mathbf{r} / f_i(\mathbf{X}) = f_i(\mathbf{r}))$, q_{k_i} est donné par la relation :

$$q_{k_i} = \frac{P_{pd}(\mathbf{X} = (j_i, \dots, j_{i-1}, k_i, j_{i+1}, \dots, j_N))}{P_{pd}(\mathbf{X} = (j_i, \dots, j_N))} \quad (5)$$

La comparaison des équations (2) and (5) montre que le calcul de q_{k_i} est beaucoup plus aisé que celui de P_{pd} . Les transitions de probabilité élémentaires P_i sont recomposées pour construire la probabilité de transition complète de la chaîne.

Rappelons que les modèles employés sont constitués d'un grand nombre de couches (supérieur en général au nombre de données). Dans ces conditions, et compte tenu, de plus, des lois d'équivalence et de suppression, la solution est sous-déterminée, ce qui se traduit par un comportement instable de la chaîne de Markov.

Grandis (1994), Menvielle et Roussignol (1995) ont montré que le processus pouvait être stabilisé si l'on introduit une condition a priori de lissage. L'effet de cette contrainte est de modifier la loi a priori par l'intermédiaire d'un facteur de la forme :

$$\exp\left(-\frac{d^2}{2} \left(\log \frac{k_i}{j_{i-1}} - \log \frac{j_{i+1}}{k_i}\right)^2\right) \quad (6)$$

où d est un facteur de lissage qu'il faut choisir de manière à atteindre un bon compromis entre la finesse de résolution de la courbe $w = f(z)$ et le caractère plausible des variations observées d'une couche à l'autre.

La probabilité de transition élémentaire s'écrit alors :

→ pour i différent de 1 et N

$$q_{k_i} = \frac{\exp\left(\frac{-d^2}{2}\right) \exp\left(-\left(\log \frac{k_i}{j_{i-1}} - \log \frac{j_{i+1}}{k_i}\right)^2\right)}{\exp\left(\frac{-d^2}{2}\right) \exp\left(-\left(\log \frac{k_i}{j_{i-1}}\right)^2\right) \exp\left(-\left(\log \frac{j_{i+1}}{k_i}\right)^2\right)} \quad (7a)$$

→ pour $i = 1$

$$q_{k_1} = \frac{w(k_1) \exp\left(\frac{-d^2}{2}\right) \exp\left(-\left(\log \frac{j_2}{k_1}\right)^2\right)}{w(k_1) \exp\left(\frac{-d^2}{2}\right) \exp\left(-\left(\log \frac{j_2}{k_1}\right)^2\right)} \quad (7b)$$

→ pour $i = N$

$$q_{k_N} = \frac{v(k_N) \exp\left(\frac{-d^2}{2}\right) \exp\left(-\left(\text{Log} \frac{k_N}{j_{N-1}}\right)^2\right)}{k_N \exp\left(\frac{-d^2}{2}\right) \exp\left(-\left(\text{Log} \frac{k_N}{j_{N-1}}\right)^2\right)} \quad (7c)$$

où w et v sont les vecteurs propres, à gauche et à droite respectivement, de la matrice $M(i, j) = \exp - \text{Log} \frac{i}{j}$, associés à la valeur propre maximale.

La chaîne de Markov ainsi créée permet de calculer aisément les lois marginales a posteriori des résistivités, ainsi que les lois jointes deux à deux.

Extension à une analyse à deux dimensions

L'extension à deux dimensions est très simple : il suffit d'introduire une contrainte de lissage à la fois dans le sens horizontal et dans le sens vertical. Le facteur donné par la formule (6) doit être modifié de la manière suivante :

$$\exp\left(- \text{Log} \frac{k_{i,l}}{j_{i-1,l}} - \text{Log} \frac{j_{i+1,l}}{k_{i,l}} - \text{Log} \frac{k_{i,l+1}}{j_{i-1,l}} - \text{Log} \frac{j_{i+1,l}}{k_{i,l+1}}\right)$$

où l et $l+1$ désignent 2 sondages successifs.

Le balayage est effectué, à chaque itération, sur l'ensemble des paramètres, donc des résistivités des cellules rectangulaires résultant du découpage horizontal en grand nombre de couches et du découpage vertical lié à l'espacement des points de mesure (c'est à dire, avec le dispositif pôle-pôle, à l'espacement des électrodes d'injection).

Exemples d'application

Site expérimental de la Côte-St-André (Isère)

Ce site fait l'objet d'études hydrologiques réalisées par le Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement et destinées à mettre en évidence les transferts de fluides et de solutés entre la surface du sol et la nappe phréatique située, à cet endroit, à 10 m de profondeur environ.

Le site est localisé dans la vallée de la Bièvre, qui est essentiellement un remplissage de sables et de graviers grossiers, avec des lentilles d'argile. Cette vallée est orientée E-W et bordée de dépôts morainiques.

Nous avons effectué une série de 5 profils de 104 m de longueur chacun, avec un sondage tous les 4 m, les profils étant eux-même espacés de 4 m. Les distances a entre l'électrode d'injection et l'électrode de mesure vont de 0,6 m à 68 m, et sont en progression géométrique de raison 1,6. Les mesures ont été réalisées avec le dispositif multiélectrodes de Iris Instruments comprenant 18 électrodes. Les espacements et le facteur de progression géométriques choisis permettent d'optimiser l'utilisation des électrodes.

La méthode d'analyse décrite plus haut se justifie relativement bien dans cet exemple car les variations

latérales sont faibles, quoique présentes. La méthode de discrétisation de la résistivité avec la profondeur et la nécessité du lissage ne permettent pas de situer le toit de la nappe avec précision. Néanmoins, l'estimation qu'on peut en donner est en bon accord avec les mesures fournies par les piézomètres voisins.

❖ **Glissement de terrain de Sauze (Barcelonnette, Alpes de Haute Provence)**

Le glissement de terrain est situé dans les marnes callovo-oxfordiennes de la fenêtre de Barcelonnette. L'objectif de l'étude entreprise est de déterminer la structure du glissement de terrain et la topographie du paléorelief indispensable à la compréhension des modalités du glissement.

L'interprétation des mesures électriques est plus délicate dans cet exemple, en raison des faibles valeurs de résistivité, de leur faible contraste (elles se situent, pour l'essentiel, entre 20 et 50 $\Omega \cdot m$) et de la topographie très accidentée. Nous avons ici effectué 5 profils pôle-pôle de 60 m de longueur, espacés de 4 m. Sur chaque profil, il y a 25 sondages avec des espacements a en progression arithmétique de 2,5 à 12,5 m et un pas de 2,5 m, soit 5 mesures par sondage. L'utilisation de la méthode décrite plus haut est beaucoup moins justifiée dans ce cas en raison de la topographie et de l'importance des variations latérales. De plus, l'espacement maximum adopté est insuffisant. On obtient cependant une image électrique intéressante, corrélée avec les structures observées sur le terrain et fournissant une bonne première approximation pour une modélisation plus adaptée.

||| Conclusions

La méthode d'analyse bayésienne mise en oeuvre, bien qu'utilisant la solution du problème direct dans le cadre limité du modèle 1D, fournit, par l'intermédiaire des lois marginales a posteriori sur les paramètres, une indication quantitative précieuse sur la résolution que l'on peut espérer à partir de mesures de surface, en même temps qu'une première solution pour une modélisation plus élaborée. Les exemples proposés illustrent son intérêt dans deux situations de complexité très différente. L'étape suivante consistera à adopter comme solution du problème direct, celle d'une méthode numérique véritablement 2D ou 3D. La méthode des éléments finis, en particulier, est bien adaptée à la prise en compte des effets topographiques.

||| Bibliographie

- Anderson W.L., 1979. Computer program. Numerical integration of related Hankel transforms of order 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*, 44, 1 287-1 305.
- Grandis H., 1994. Imagerie électromagnétique bayésienne par la simulation d'une chaîne de Markov. Thèse, Univ. Paris VII, 250 pp.
- Menvielle M. et Roussignol M., 1995. Imagerie électromagnétique bayésienne. C.N.F.G.G., rapport quadriennal 1991-1994, 177-190.
- Sen M.K., Stoffa P.L., 1996. Bayesian inference, Gibb's sampler and uncertainty estimation in geophysical inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 313-350.

C

ontribution de la méthode radiomagnétotellurique à la délimitation des structures hydrogéologiques en milieu hétérogène de subsurface

Pascal Turberg, Imre Müller

Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel, Suisse

Abstract

This paper presents the application of radiomagnetotellurics (RMT) to the detection of near subsurface hydrogeological structures. In particular it addresses the problem of delineating effective infiltration zones in heterogeneous geological units.

Principles, instrumentation and directions for use related to this method are briefly reviewed. Series of RMT field data collected during an ordinary case study in urbanized area illustrate the contribution of this geophysical method to classical geological mapping.

Classification of infiltration zones inferred from this surveying technique appear to be confirmed by direct geological and hydrogeological observations.

Suivi du fonctionnement et du comportement (pollution, risque...)

Introduction

La législation fédérale suisse sur la protection des eaux et sur le déversement des eaux usées oblige les communes à infiltrer les eaux pluviales et de drainage afin (a) de maintenir le cycle naturel des eaux, (b) d'améliorer l'alimentation en eau des nappes souterraines, (c) d'éviter l'augmentation des pointes de débit des cours d'eau et (d) de diminuer la charge hydraulique des stations d'épuration. Cette obligation se traduit en pratique par la réalisation d'un Plan Général d'Evacuation des Eaux (PGEE), dont l'une des tâches principales consiste à effectuer une zonation du potentiel d'infiltration des sols sur l'ensemble du territoire communal concerné.

La contribution de la méthode géophysique radiomagnétotellurique (RMT) pour la délimitation de ces zones d'infiltration, dans le cadre d'un exemple d'application en milieu urbanisé, est présentée.

Principe, instrumentation et méthode

La méthode RMT est dérivée de la méthode *very low frequency resistivity* ; elle implique l'utilisation possible de tout émetteur dans le domaine de fréquence entre 12 et 240 kHz.

Lors de la mesure, deux paramètres sont pris en compte :

- la résistivité électrique a est calculée sur la base du rapport d'impédance complexe de surface $Z = E_x/H_y$ selon :

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right| = (\mu \quad)^{1/2} \quad \text{d'où:} \quad a = \frac{1}{2 f \mu_0} \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2$$

a : résistivité apparente (Ohm.m), E : champ électrique (V/m), H : intensité du champ magnétique (A/m), μ_0 : perméabilité magnétique du vide (H/m), ω : pulsation, f : fréquence (Hz)

- le déphasage entre E_x et H_y . Pour un volume de terrain homogène, E_x est généralement considéré en avance de phase de 45° par rapport à H_y . Une diminution de la résistivité avec la profondeur se traduit par une augmentation du déphasage ($>45^\circ$) et une augmentation de la résistivité avec la profondeur par une diminution du déphasage ($<45^\circ$). Le déphasage est donc un indicateur de la structure du sous-sol.

Le système RMT utilisé se compose :

- de deux électrodes séparées par une distance de 5 mètres. Lors de la mesure, ces deux électrodes sont fichées dans le sol suivant une ligne virtuelle, parallèle à la direction de propagation du signal utilisé. Elles permettent la mesure du champ électrique E_x (en V/m).
- d'une bobine dont l'axe est horizontal et la direction perpendiculaire à celle de la propagation du signal. Cette bobine permet la mesure de l'intensité du champ magnétique H_y (en A/m).
- d'un boîtier de réception permettant le traitement du signal. La compensation du signal est effectuée auditivement jusqu'à l'obtention d'un signal nul ou minimum ; le rapport E_x/H_y alors obtenu permet l'affichage immédiat de la résistivité apparente et du déphasage.

Le mode de mesure unidirectionnel multifréquence est généralement utilisé. Ce mode de mesure est spécifique au RMT et est généralement employé avec trois émetteurs de direction identique, mais de fréquence différente (par exemple 183, 60 et 16 kHz). Ce mode de mesure en "profil de sondages" permet une cartographie à la fois extensive et détaillée. Il est utilisé dans les milieux où les variations latérales peuvent être considérées comme progressives (par exemple les terrains alluvionnaires).

Dans le cas présent, seuls les trois premiers mètres de terrain étaient ciblés. Pour cette raison, les trois fréquences utilisées à chaque station de mesure furent 234, 183 et 77,5 kHz.

Résultats

La situation de la zone d'urbanisation étudiée (commune de Cortaillod, Canton de Neuchâtel), sa nature géologique levée en surface et la situation des stations de mesure RMT sont présentées sur la **figure 1**. Globalement, la partie ouest de cette zone est composée de matériel quaternaire d'origine glaciaire et la partie est, de dépôts fluviatiles récents. L'affleurement de grès et de marnes tertiaires dans le secteur central de cette zone est notamment observé.

La distribution de la résistivité vraie moyenne (cf. la définition ci-dessous) des trois premiers mètres du sous-sol est présentée sur la **figure 2**. Elle est basée sur environ 200 points de mesure. Pour obtenir cette résistivité vraie moyenne (RVM), les valeurs mesurées ont été modélisées par inversion uni-dimensionnelle selon Fischer et al. (1981).

Lorsque l'épaisseur de la première couche calculée (E1) est supérieure ou égale à 3 mètres, la résistivité vraie moyenne RVM est considérée comme étant égale à RV1. Lorsque l'épaisseur de la première couche calculée est inférieure à 3 m, RVM est égale à $RV1 * E1 + RV2 * (3 - E1)$. Cette formulation permet de caractériser globalement la résistivité des trois premiers mètres du sous-sol.

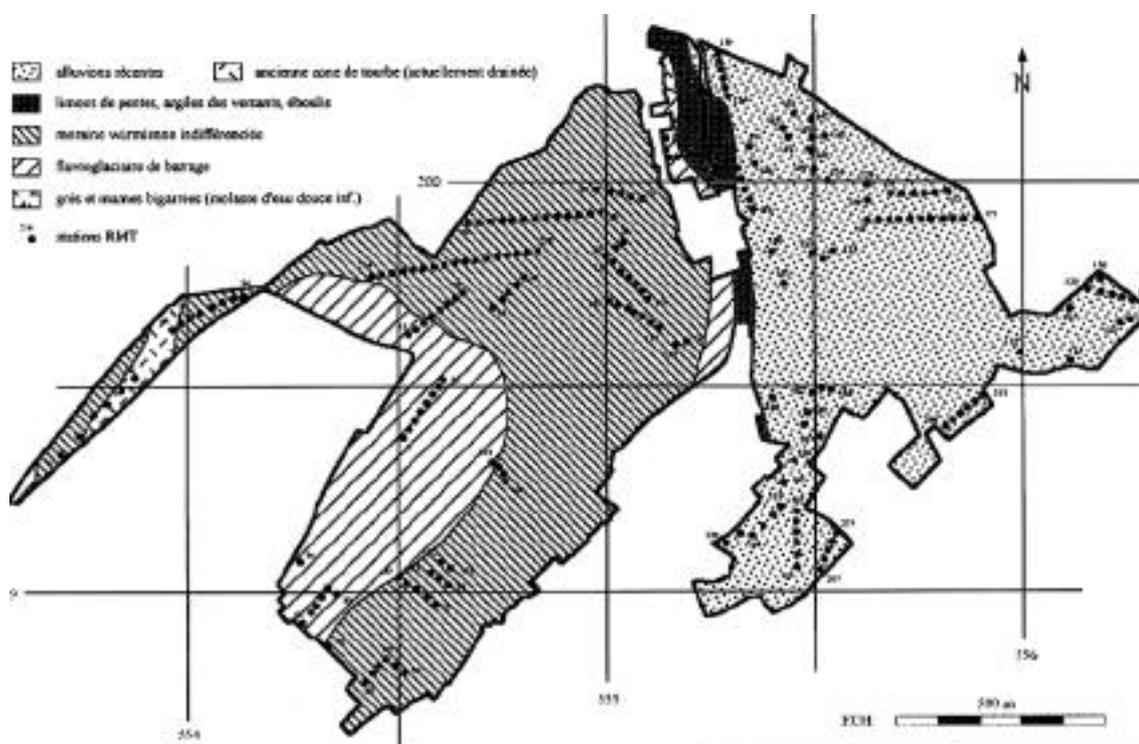


Figure 1 - Géologie de la zone d'urbanisation étudiée (selon Atl. Géol. de la Suisse, feuille 1164)

Cette distribution de résistivité vraie moyenne met en évidence un sous-sol hétérogène, mais structuré à l'échelle de la zone étudiée. Malgré l'ensemble des bruits de fond électromagnétiques affectant les mesures RMT en milieu urbanisé, deux secteurs à résistivité élevée, potentiellement favorables à l'infiltration des eaux de surface, sont observés. Le premier secteur couvre une grande partie de la zone est : il est constitué des dépôts fluviatiles sableux à sablo-graveleux déjà mentionnés à la **figure 1**. Le second secteur, dans la zone ouest, couvre une surface allongée en direction NNE-SSW : il est constitué d'un ancien chenal comblé de graviers sableux fluvioglaciaires, mais n'avait pas été reconnu par levé géologique de surface. Outre les informations extraites des **figures 1 et 2**, ces deux secteurs ont été vérifiés par forage.

La **figure 3** est principalement basée sur les résultats de la **figure 2**. Elle présente la zonation du potentiel d'infiltration. Cette zonation est basée sur une connaissance empirique de la relation locale entre la résistivité vraie et la perméabilité des formations géologiques. Les résistivités inférieures à 56 Ohm.m représentent des terrains à potentiel d'infiltration défavorable ; les résistivités comprises entre 56 et 100 Ohm.m, des terrains à potentiel d'infiltration moyennement favorable et les résistivités supérieures à 100 Ohm.m, des terrains à potentiel d'infiltration favorable à très favorable. Il faut toutefois préciser que cette

Suivi du fonctionnement et du comportement (pollution, risque...)

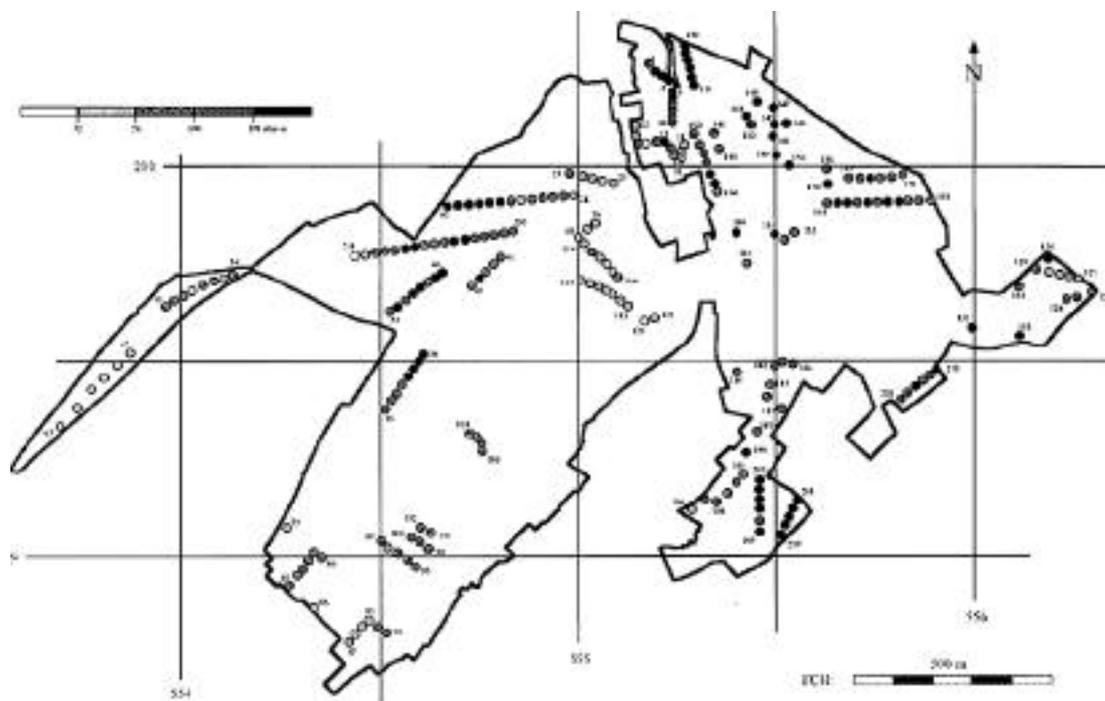


Figure 2 - Carte de la résistivité vraie moyenne des 3 premiers mètres du sous-sol

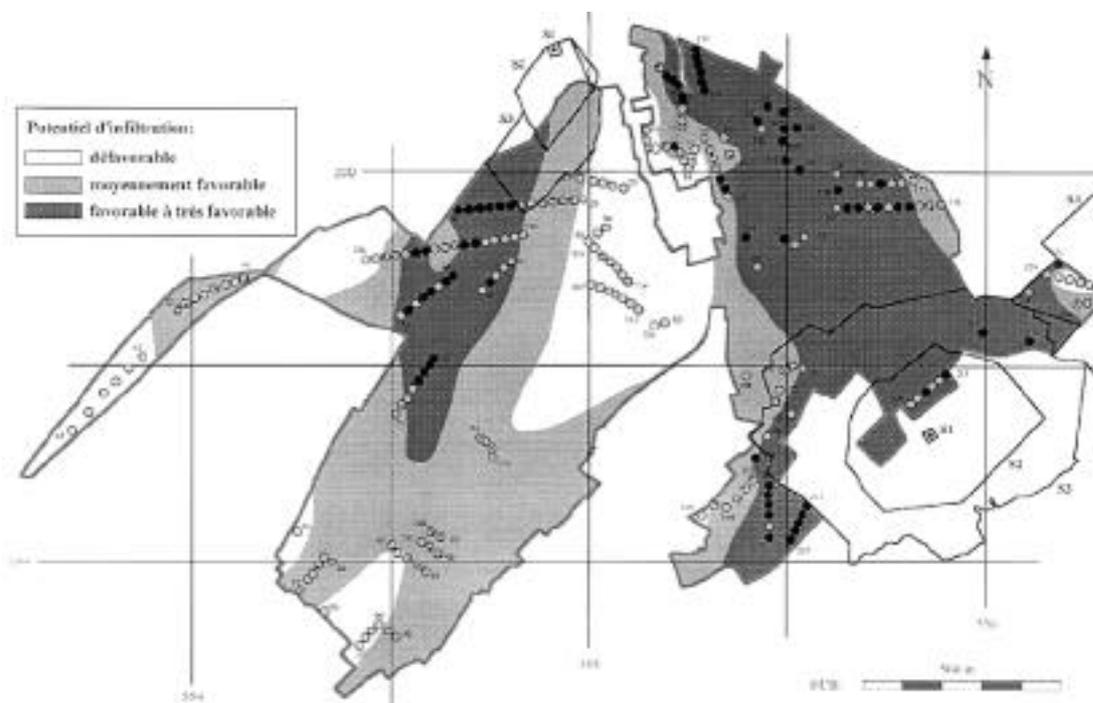


Figure 3 - Potentiel d'infiltration des 3 premiers mètres du sous-sol. Zone d'urbanisation. Commune de Cortailod.
(dérivé des résistivités de la figure 2, des informations géologiques et topographiques)

zonation a une valeur essentiellement statistique, car les valeurs de résistivité peuvent varier significativement à l'échelle locale.

Conclusion

Dans cet exemple, l'utilisation de la cartographie RMT pour la délimitation de périmètres d'infiltration fournit une image cohérente et structurée de l'hétérogénéité de subsurface. Associée aux données géologiques et hydrogéologiques classiques, cette cartographie permet d'optimiser la zonation du potentiel d'infiltration lors de la réalisation de plans généraux d'évacuation des eaux.

En particulier, il faut souligner que l'image des terrains de subsurface, obtenue par cartographie géophysique RMT, a permis de modifier significativement l'image obtenue préalablement par cartographie géologique et géomorphologique. Par extension, la modification apportée aux structures hydrogéologiques par la cartographie RMT a eu un effet direct sur la prévision des interactions entre eaux de surface et eaux souterraines.

Une analyse plus poussée sur la réalité des épaisseurs calculées par inversion RMT et une étude plus détaillée des corrélations entre la résistivité de ces couches et leur potentiel d'infiltration s'avèrent cependant nécessaires.

Bibliographie

Fischer G., Schnegg P.-A., Peguiron M., Le Quang B.V., 1981. An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme. Geophys. J. R. astr. Soc., 67 : 257-278.

Remerciements

Nous remercions la Commune de Cortaillod ainsi que le bureau d'Ingénieurs Civils Allemand Jeanneret-Schmidt à Neuchâtel pour avoir autorisé la publication de données géophysiques.

A

pport de la méthode électrique pour la reconnaissance hydrogéologique et l'étude des variabilités superficielles en zone sédimentaire subsaharienne

Anne Zanolin¹, Joseph Tchani², Laurent Barbiero³, Pascal Boivin³, Marc Descloitres⁴

¹ 27bis rue La Fontaine, 92260 Fontenay aux Roses, France

² ORSTOM, Laboratoire de Géophysique, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

³ ORSTOM, Laboratoire de Pédologie, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

⁴ Université P. et M. Curie, Département de Géophysique, 4 Place Jussieu, Case 105, 75252 Paris cedex 05, France

Abstract

The future irrigated zones of the Senegal river valley are actually accurately studied because of the risks of soil degradation. This phenomenon is increased by groundwater recharge under flooded culture, which could be understood using a dense piezometric network. In order to define the geometrical characteristics of the aquifer, a Schlumberger DC electrical survey soundings was carried out along 3 main profiles. In spite of scarce geological information, the interpretation gives precious indications on the aquifer system to locate accurately the future piezometric network and on complex lateral variations in superficial soils. This classical approach seems also to be adequate to explore and understand the main soil systems and to give a deeper image of the soils than the image given by shallow pits.

Introduction

Le développement de l'irrigation en bordure du fleuve Sénégal permet actuellement l'approvisionnement en eau des périmètres cultivés de cette vallée subsaharienne. Un processus de dégradation des sols par alcalinisation pourrait cependant être favorisé par la remise en solution de sels marins lors de la recharge de la nappe sous périmètres inondés (Boivin et al., 1995).

La zone étudiée ici se trouve au nord du Sénégal, en bordure du Ngalenka, affluent fossile du fleuve, dont la remise en eau pour l'irrigation est prévue lors de l'aménagement futur du site. Les structures morphologiques, issues des dépôts de crue et décrites par P. Michel (1973), sont cependant toujours visibles : limono-sableuses sur les bourrelets de berge ou les hautes levées, elles sont argileuses dans les cuvettes de décantation. Dans les horizons sous-jacents, on différencie les dépôts fluviatiles actuels ou sub-actuels argileux à sableux, les dépôts quaternaires constitués principalement par des sables marins et des vases lagunaires du Nouakchottien et le substratum éocène ou continental terminal argileux à marno-calcaire (Illy, 1973). Les faciès de ces dépôts fluvio-marins peuvent être très variés.

L'étude géophysique présentée ici, a pour but de définir les caractéristiques géométriques de l'aquifère quaternaire superficiel, afin de prévoir l'implantation d'un réseau piézométrique qui permettra de mieux comprendre le phénomène de recharge de la nappe. Elle teste d'autre part l'adéquation de la méthode électrique à l'étude de ce type de terrain sédimentaire sub-saharien, présentant une variabilité de faciès complexe, latéralement et verticalement.

Acquisition des données

Trois des futurs périmètres ont été sélectionnés pour l'étude géophysique car ils présentaient des structures morphologiques nettes et linéaires, parallèles aux anciennes berges du Ngalenka. Ceci permettra d'étudier les variabilités éventuelles de faciès en fonction de la morphologie et de la distance au cours d'eau. Le niveau topographique des sites est peu variable (+5 m / cote zéro IGN en bordure du Ngalenka, +3 m / cote zéro IGN dans les points bas).

A l'aide d'un résistivimètre Syscal R2, 22 sondages de type Schlumberger ont été effectués, en juillet 1996, sur 3 profils perpendiculaires aux berges du Ngalenka, avec un pas de 50 à 200 m. Les lignes, de longueur maximum AB/2 de 500 m, sont tirées parallèlement aux berges et, donc, aux grandes structures morphologiques principales, afin de limiter les variations latérales de résistivité. Des mesures de résistivité réelle ont également été réalisées pour les horizons de surface à l'aide d'un dispositif de traîné de type Wenner (écartement des électrodes de 2 à 40 cm selon le terrain), sur des affleurements accessibles dans des fosses ou, pour les terrains les plus argileux, sur des échantillons de tarière non remaniés. De nombreux sondages à la tarière ont en effet permis d'estimer les profondeurs et les faciès des horizons superficiels. Ils atteignent les 6 premiers mètres dans les terrains les plus argileux (cuvettes) et les 2-3 premiers mètres dans les terrains les plus sableux (hautes et petites levées). Les seuls piézomètres disponibles étant à sec, l'extrapolation de données piézométriques a permis d'estimer le toit de la nappe à -5,5 m / niveau IGN, c'est à dire de -9 à -11 m par rapport au sol (A. Zanolin, 1996).

Résultats

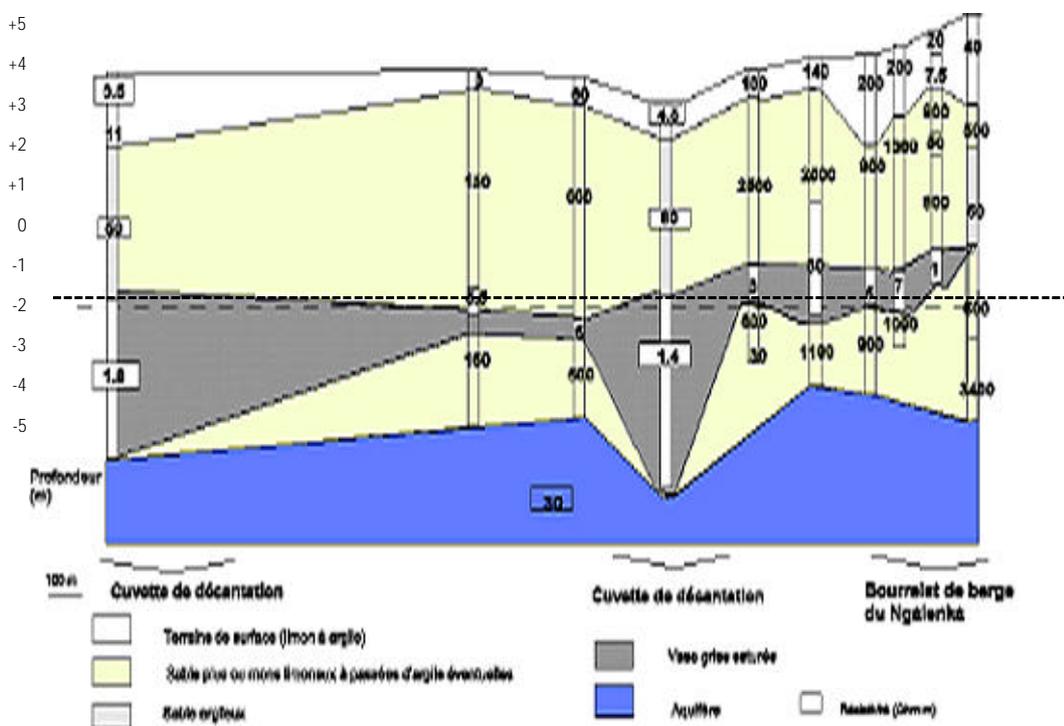
❖ *Interprétation des sondages électriques*

Malgré l'absence de forages ou de sondages profonds permettant un calage, un modèle multicouche a permis l'interprétation précise de toutes les courbes de sondage. On a supposé la relative homogénéité en résistivité et en épaisseur des horizons profonds. Les résultats des trois profils étant assez similaires, seule la coupe des terrains électriques de l'un d'eux est présentée (**figures 1 et 2**). Elle est constituée :

- d'un terrain sub-superficiel assez conducteur, de résistivité variable (3 à 200 Ohm.m) et de 0,5 à 2 m d'épaisseur ;
- d'un deuxième terrain, de 4 mètres d'épaisseur environ, qui montre une résistivité très variable (de 50 Ohm.m sous les cuvettes à 2 500 Ohm.m sous les levées) ;
- d'un troisième terrain très conducteur (1,5 à 7 Ohm.m), dont l'épaisseur varie de 1 m sous les levées à 5 m sous les cuvettes, où il présente les résistivités les plus faibles ;
- d'un quatrième terrain de résistivité relativement similaire à celle du deuxième, forte et très variable (150 à 1 100 Ohm.m), qui apparaît uniquement sur les sondages hors-cuvettes ;
- d'un cinquième terrain de résistivité 30 Ohm.m, qui prend place entre -5 et -20 m / IGN ;
- d'un sixième terrain de résistivité 2,5 Ohm.m, qui atteint de 25 à 30 m d'épaisseur ;
- et d'un dernier terrain de 20 Ohm.m, qui apparaît à un niveau topographique de - 45 m / IGN environ.

❖ **Interprétation lithologique et hydrogéologique**

Les terrains superficiels montrent une forte variabilité latérale de résistivité, cohérente avec la forte variabilité de faciès des différents horizons (**figure 1**) :



- Le premier terrain sub-superficiel correspond aux dépôts fluviatiles récents ; on retrouve le gradient granulométrique, à savoir des argiles de résistivité faible dans les cuvettes et des sables plus ou moins limoneux de résistivité plus forte sur les levées.
- Le deuxième terrain résistant correspond aux dépôts marins du Nouakchottien, constitués en majorité de sables fins. Les résistivités relativement faibles, obtenues sous les cuvettes, correspondent bien au faciès riche en argile et au plus fort taux d'humidité et/ou de sels, observés à la tarière.
- Le troisième terrain très conducteur correspond aux vases grises observées à la tarière dans les cuvettes et apparaissant dans d'autres zones de la région de Podor (Michel, 1973). Bien que non observé sous les levées, il a été nécessaire pour le calage de la plupart des courbes.
- Le niveau résistant sous-jacent dans les zones de levées correspondrait, de même que le deuxième terrain, aux dépôts marins quaternaires.

Les terrains les plus profonds sont homogènes latéralement (figure 2) :

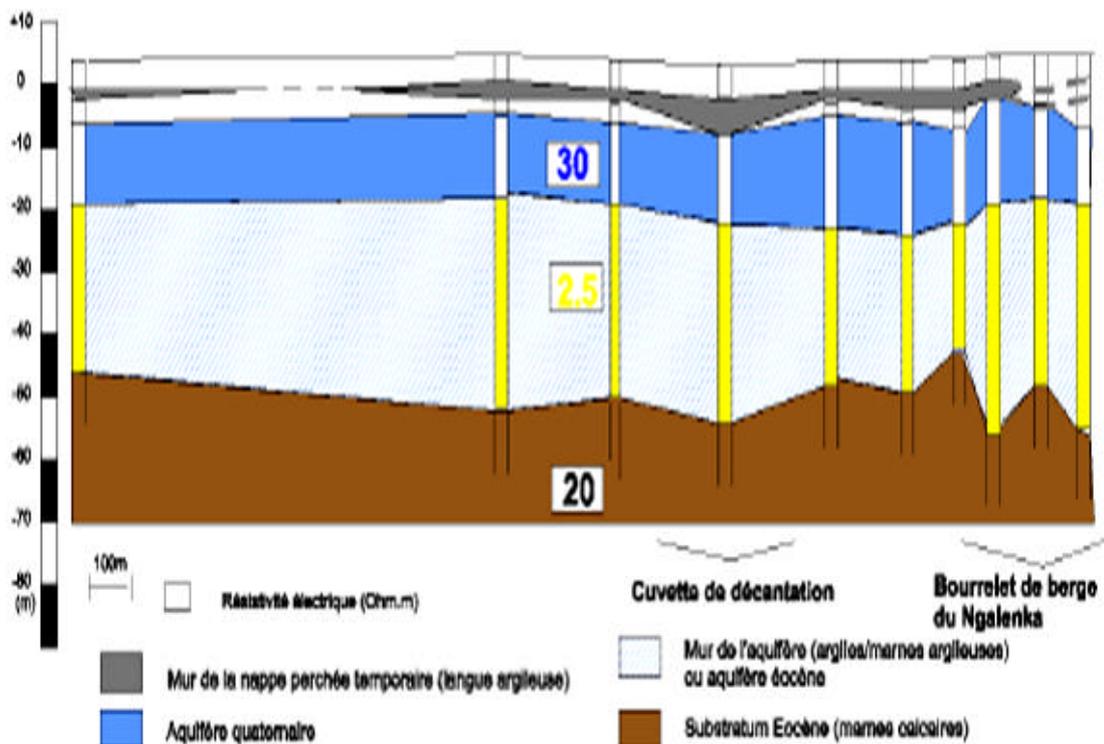


Figure 2 - Coupe et interprétation hydrogéologique des terrains électriques profonds

- Le cinquième terrain apparaît à une profondeur de -5 m / IGN environ, ce qui correspond au niveau piézométrique estimé. Il constituerait donc l'aquifère quaternaire.
- La résistivité très faible du sixième terrain, qui apparaît à -20 m / IGN, correspond à celle citée dans des études précédentes pour les marnes argileuses de l'Eocène moyen (Koussoubé, 1992 ; CGG, 1951 à 1957), que l'on rencontre à une côte de -25 m / IGN.
- La résistivité de 20 Ohm.m du dernier terrain, atteint à 45 m / IGN, correspond à la gamme de résistivité estimée dans les études antérieures pour les calcaires marneux de l'Eocène moyen ou inférieur (OMVS, 1990 ; CGG, 1951 à 1957 ; Illy, 1973) rencontrés entre 35 et 45 m / IGN sur les sondages profonds les plus proches.

Le toit de l'aquifère n'a pu être déterminé précisément par la prospection électrique. Il se situe vers -6 m / IGN. Le niveau de vases grises, dont la continuité à l'échelle de la parcelle n'est pas rigoureusement prouvée, pourrait constituer le mur d'une nappe perchée en période de crue, permettant une retenue d'eau importante dans les horizons superficiels. La dynamique de cette nappe superficielle pourrait donc être indépendante de l'aquifère sous-jacent.

Le mur de l'aquifère quaternaire se situerait sur notre site à une cote de -20 m. Sa puissance serait de 15 m environ et sa lithologie peut être assez variable. D'après sa résistivité relativement forte, il serait peu salé. Illy (1973) a cependant suggéré la possibilité de communication hydraulique entre l'aquifère quaternaire et un aquifère éocène. Les formations profondes pourraient donc constituer un compartiment aquifère relativement salé ou argileux, séparé ou non de l'aquifère sus-jacent par un horizon argileux imperméable.

Conclusion

Cette étude géophysique a permis de définir les caractéristiques géométriques de l'aquifère quaternaire. Il a été situé entre la cote -6 et -20 m / IGN environ, en basses eaux. Un niveau de vases grises pouvant constituer le mur d'une nappe perchée, en liaison ou non avec cet aquifère, a été décelé. On conseille l'implantation de piézomètres profonds crépinés de -20 m / IGN jusqu'au niveau de vases et l'implantation de piézomètres de surface crépiné à partir du niveau de vases. La lithologie du terrain sous l'aquifère doit de plus être vérifiée par un sondage carotté à plus de 25 m de profondeur (-20 m / IGN).

La prospection électrique a été effectuée sur une zone sédimentaire complexe et peu connue. Peu de données étaient disponibles sur les profondeurs et les paramètres (taux d'argile, présence de sels, présence d'eau) pouvant influencer sur les résistivités des terrains les plus profonds. En partant d'une hypothèse d'homogénéité de ces terrains, l'interprétation des sondages Schlumberger a cependant permis non seulement de préciser la géométrie de l'aquifère étudié, mais aussi de décrire assez précisément la variabilité de faciès des horizons superficiels. Ainsi, on a établi la corrélation entre la morphologie de surface et la teneur en argile des horizons compris entre 1 et 10 m de profondeur.

La méthode électrique semble donc être un outil particulièrement adapté à l'étude des formations superficielles du type de celles rencontrées dans la région étudiée. La corrélation avec les résultats obtenus par prospection électromagnétique, qui intègrent les deux premiers mètres de sol, devrait permettre une analyse fine et rapide des variabilités latérales et verticales, riches en information pour l'étude pédologique à venir.

Bibliographie

Boivin P., Dia I., Lericollais A., Poussin J.C., Santoir C., Seck S.M., 1995. Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal. Ateliers ORSTOM-ISRA à Saint Louis (Sénégal), du 19 au 21 octobre 1993. Editions de l'ORSTOM. Collection Coll. et Sém., 562 p.

C.G.G., 1951 à 1957. Bassin sénégal-mauritanien. Archives de la Direction de l'Hydraulique, Dakar.

Illy P., 1973. Etude hydrogéologique de la vallée du Fleuve Sénégal. Projet hydro-agricole du bassin du Fleuve Sénégal, RAF 65/061, 163 p. et annexes.

Koussobe Y., 1992. Application de la géophysique (électrique) à l'étude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal (Nord Guiers, Dagana, Bas-Ferlo). Mémoire de DEA, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 75 p. et annexes.

Michel P., 1973. Les bassins des Fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Tomes 1,2 et 3, Mémoires ORSTOM.

OMVS-USAID, 1990. Répertoire hydrogéologique. Document annexe. Coupes géologiques et techniques. Projet OMVS-USAID, 625-0958.

Zanolin A., 1996. Etude de site pour l'implantation d'un réseau piézométrique sur périmètres irrigués (vallée du fleuve Sénégal). Mémoires de D.E.S.S., Université Grenoble I / ORSTOM Dakar, 70 p. et annexes.

D

deuxième partie

Les exposants



Abem, France

29 rue de Paris, 35000 Rennes, France

☎ : 02 99 38 23 11 - Fax : 02 99 38 56 50 - E-mail : abem@hol.fr

Notre société est spécialisée dans **l'instrumentation géophysique.**
Notre gamme couvre l'ensemble des méthodes géophysiques modernes.

Notre activité

- ◆ Commercialisation
- ◆ Location
- ◆ Formation
- ◆ Réparation

◆ Commercialisation : les matériels

- ✓ Méthodes potentielles
- ✓ Méthode sismique
- ✓ Diagraphie
- ✓ Déviation de forages
- ✓ Logiciels d'interprétation



Nous vous proposons de découvrir ci-après nos instruments et logiciels. ➤

✓ Méthodes potentielles

Le **WADI** est l'un des VLF le plus répandu dans le monde. Très simple d'utilisation, et léger, les données acquises peuvent être ensuite transférées sur PC pour interprétation (SECTOR - EMIX VLF).

La famille des **TERRAMETER** s'est récemment agrandie avec le tout nouveau résistivimètre **TERRAMETER SAS 4000**, d'une puissance d'injection de 100 W, avec processeur intégré. Il est composé de 4 voies, qui mesurent la résistivité, l'IP, ou la PS. Associé au système de panneau électrique **LUND**, le **SAS4000** est l'un des équipements électriques les plus performants actuellement du marché.

Le système **LUND**, quant à lui, est composé de 64 électrodes, avec un intertracé de votre choix. La rapidité de mise en œuvre, la convivialité des menus sont ses principales caractéristiques. Après transfert des données, les traitements recommandés sont le **RES2DINV** de M.H.LOKE ou le **RESIX 2Di** d'INTERPEX (imagerie 2D), suivi d'une modélisation en 2D, le **RESIX IP2Di**, d'INTERPEX.

Le **RAMAC GPR**, grâce à son système de liaisons fibres optiques, permet une qualité de mesure encore inégalée. Le **RAMAC** est très léger à mettre en œuvre. Il peut être opéré par une seule personne. Même dans les endroits difficiles d'accès, le **RAMAC GPR** sera présent. Le **RAMAC GPR** comprend 6 antennes : 25 MHz, 50, 100, 200, 400 et 1 GHz. A ce jour, de nombreuses unités ont été vendues en Europe. Pour le traitement des données, nous recommandons le logiciel **GRADIX** d'INTERPEX.

Les magnétomètres **GEM** ont apporté la technique overhauser qui permet une cadence d'acquisition élevée, tout en conservant une grande résolution, ceci pour un budget économique (ex : **GSM-19GW**). La gamme **GEM** comprend également des magnétomètres plus classiques à précession de Proton et dans le haut de gamme, au Césium.

Nous représentons en France la société canadienne mondialement connue GEONICS, avec l'ensemble de ses conductivimètres (**EM31-MK2**, **EM34**, **EM38**), et TDEM (**PROTEM**, **EM61**).

✓ Méthode sismique

Le **TERRALOC MK6**, de 12 à 48 canaux, dernier d'une lignée d'enregistreurs puissants et robustes, reste un appareil de référence dans le monde de la sismique.

Nous avons choisi de travailler avec **MARK PRODUCTS** et **EMCI** pour la fourniture des géophones et des câbles (flûtes rallonges). Leur flexibilité nous permet de vous proposer une grande variété de produits à un très bon rapport qualité/prix.

Avec la **TerraSource**, nous innovons avec une source sismique puissante (2 500 Joules) et autonome. La **TerraSource** est autopropulsée et mise en œuvre par un seul opérateur.

✓ Diagraphie

Le **WELLMAC** est un équipement moderne, convivial et très léger. En effet, l'une des caractéristiques importantes du **WELLMAC** est d'être composée d'une interface de contrôle légère (3 kg), qui gère une communication numérique vers une grande variété de sondes (gamma, densité, résistivité, température, débitmètre...) pouvant être combinées. Un micro-ordinateur portable permet l'acquisition, le stockage, et le traitement des données.

✓ Déviation de forages

Le **BORETRAK** est un ensemble autonome de mesures de déviation des forages, très simple d'utilisation. Il est composé d'une sonde inclinométrique, d'un ensemble de tiges en fibre de verre pour le guidage en azimut et d'un data logger. Un logiciel permet d'afficher les résultats.

✓ Logiciels d'interprétation

Interpex

Nous proposons les logiciels **INTERPEX**, qui viennent de fêter leur 10 ans de création et d'innovation en matière de logiciels appliqués au traitement des données géophysiques (**RESIX, EMIX, GRADIX...**). Nous avons à votre disposition les logiciels de démonstration, sur disquette ou courrier électronique.

M.H. Loke

RES 2D INV (Imagerie électrique 2D, sous DOS ou WINDOWS)
RES 3D INV (Imagerie électrique en 3D, sous WINDOWS)

◆ Location : les matériels géophysiques au départ de Rennes

Système de panneau électrique	➤ LUND
Résistivimètres	➤ TERRAMETER SAS 4000, TERRAMETER SAS 300 C
Conductivimètre	➤ EM-31-MK2
VLF	➤ WADI
Sismographe	➤ TERRALOC MK6 et accessoires (flûtes, géophones...)
Radar géologique	➤ RAMAC GPR
Déviation de forages	➤ BORETRAK (80 m de profondeur)

◆ Formation

Notre rôle consiste à former nos clients à l'utilisation sur le terrain des matériels loués ou achetés, afin qu'ils optimisent au mieux leur acquisition de mesures.

◆ Réparation

Nous assurons la maintenance et SAV de nos instruments, à Rennes.

◇ Développement de produits

Avec l'aide et le concours de sociétés d'ingénierie, telles que CREATECH ou EMCI, nous mettons au point certains équipements, comme par exemple la TerraSource.

◇ Les sites Internet

ABEM AB : <http://www.abem.se>
INTERPEX : <http://www.interpex.com>
GEONICS : <http://www.geonics.com>
E-mail ABEM France : abem@hol.fr
E-mail MALA GEOSCIENCE : geoscience@malags.se
E-mail MH LOKE : mhloke@pc.jaring.my

EuroCim

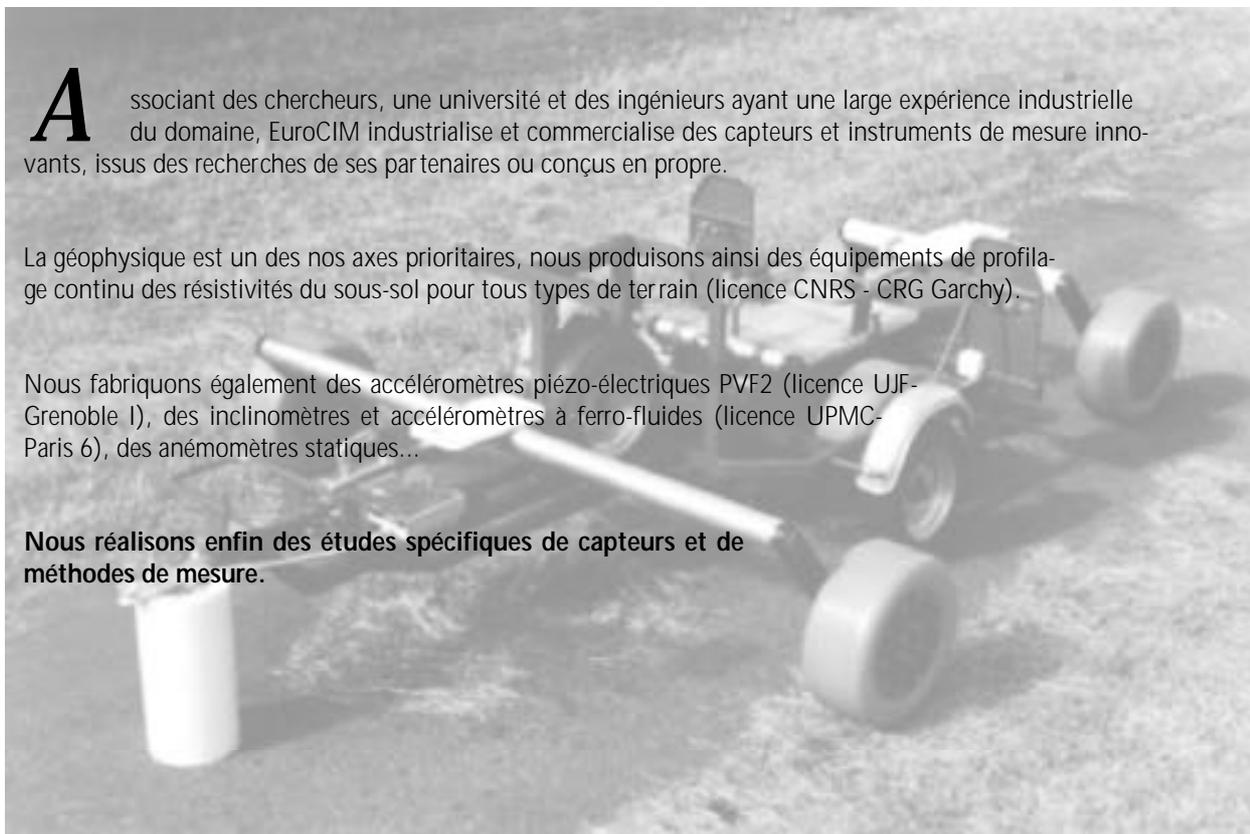
87^{ter} rue Jean Jaurès, B.P. 116, 58205 Cosne-sur-Loire cedex, France
☎ : 03 86 28 05 23 - Fax : 03 86 28 12 84

Associant des chercheurs, une université et des ingénieurs ayant une large expérience industrielle du domaine, EuroCIM industrialise et commercialise des capteurs et instruments de mesure innovants, issus des recherches de ses partenaires ou conçus en propre.

La géophysique est un des nos axes prioritaires, nous produisons ainsi des équipements de profilage continu des résistivités du sous-sol pour tous types de terrain (licence CNRS - CRG Garchy).

Nous fabriquons également des accéléromètres piézo-électriques PVF2 (licence UJF-Grenoble I), des inclinomètres et accéléromètres à ferro-fluides (licence UPMC-Paris 6), des anémomètres statiques...

Nous réalisons enfin des études spécifiques de capteurs et de méthodes de mesure.

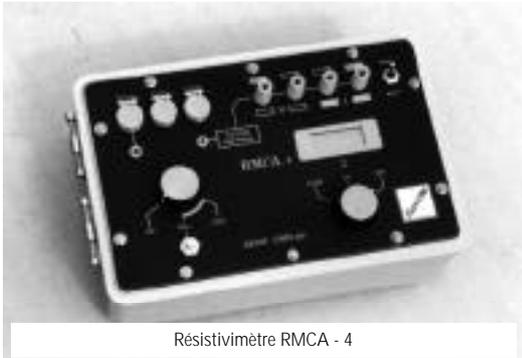


Les systèmes de mesures géophysiques

Nos systèmes de mesure en Géophysique se répartissent en deux groupes :

- ceux utilisant le principe de la mesure en électrique classique
- ceux issus de la méthode électrostatique

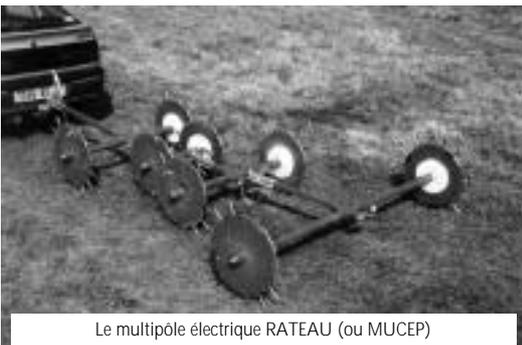
Le RMCA - 4



Le **RMCA-4** unique dans son genre, est un résistivimètre permettant une investigation jusqu'à une vingtaine de mètres de profondeur. Conçu pour les applications "faible profondeur", il permet grâce à des caractéristiques très performantes, de réaliser des profils de mesure en déplacement continu (quadripôle tracté derrière un véhicule ou tiré à la main) et trois voies de mesure simultanées.

Le RMCA-4 est associé à un quadripôle ou à un multipôle. Il existe différentes configurations géométriques selon les applications. Nous réalisons des configurations de multipôles spécifiques. Vous pouvez également utiliser le RMCA-4 avec 4 électrodes indépendantes.

Le RATEAU



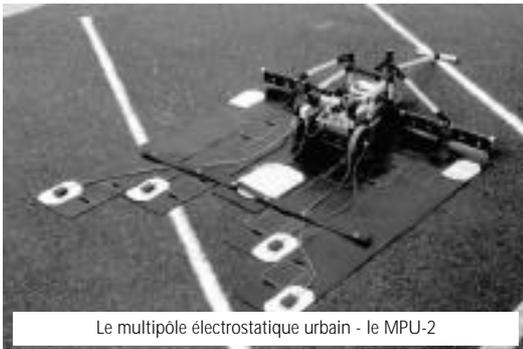
Parmi les différents multipôles, le **RATEAU** est une des possibilités d'un multipôle tracté et donnant trois profondeurs d'investigations simultanées.

Les dispositifs électrostatiques

Les différents types et configurations géométriques de pôles, qui ont donné lieu à des développements opérationnels, peuvent être classés en quatre groupes. Le premier comprend les dispositifs à pôles indépendants, qui permettent des trainsés ou des sondages sur des profondeurs décimétriques, métriques ou décamétriques.

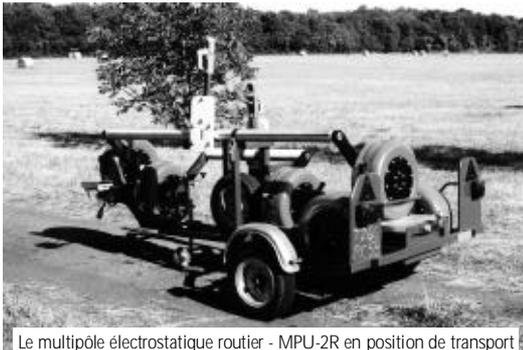
Les trois autres groupes sont destinés à des applications particulières :

- Les dispositifs d'auscultation de taille décimétrique où des pôles de petite dimension sont insérés dans un bâti qui permet de manier aisément l'ensemble de l'appareil. On les a dénommés "**SERP**".



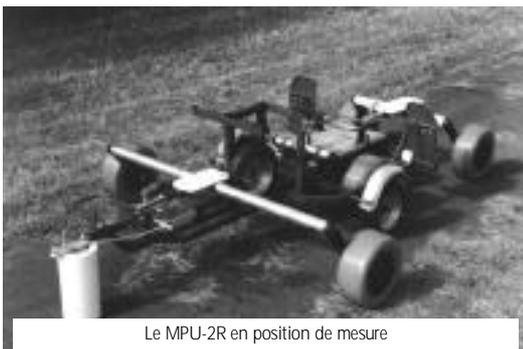
Le multipôle électrostatique urbain - le MPU-2

➤ les dispositifs de prospection peu profonde, 0-2 m, où les pôles sont positionnés sur un tapis (le **MPU-2**) ou sur un système de skis qui garantit la stabilité géométrique du dispositif pouvant être un quadripôle ou un multipôle. On a pris l'habitude de les appeler "urbains" puisque leur utilisation principale se situe en milieu urbain.



Le multipôle électrostatique routier - MPU-2R en position de transport

➤ Les dispositifs à déplacement rapide (typiquement 20 à 50 km/h) **MPR-2R** où les pôles (brevet CNRS-EuroCIM) sont placés à l'intérieur de roues, ce qui permet à la fois de les maintenir à une hauteur définie par rapport au sol et de les protéger des obstacles. Ces quadripôles ou ces multipôles sont qualifiés de "routiers" puisqu'ils sont parfaitement adaptés aux mesures sur route.



Le MPU-2R en position de mesure

Où et quand a-t-on intérêt à remplacer la méthode électrique par la méthode électrostatique ?

La caractéristique majeure de la méthode électrostatique est de pouvoir être utilisée partout, quel que soit l'état de surface du sol, à condition qu'il soit à peu près plat. La méthode électrique, pour sa part, n'est en fait utilisable que sur ce qu'on appelle en langage administratif la Surface Agricole Utile. En milieu forestier, les deux méthodes sont utilisables mais peu pratiques.

Si on veut limiter son investissement à une seule des deux méthodes, on retiendra la méthode électrostatique. Si tel n'est pas le cas, la tendance est actuellement de considérer la méthode électrique comme une méthode "rustique" et la méthode électrostatique comme une méthode "urbaine".

Les autres capteurs

Nous fabriquons et commercialisons également :

- des accéléromètres piézo-électriques
- des accéléromètres et inclinomètres à ferro-fluide
- des alarmes anti-vol pour véhicules deux roues et quatre roues
- des anémomètres statiques
- des pompes haute pression à pistons plongeurs

Géotrade

Route de Lausanne 17, 1400 Yverdon-les-Bains, Suisse
☎ : 00 41 24 425 94 94 - Fax : 00 41 24 425 54 22

Équipements pour la géophysique et la reconnaissance des sols

Géotrade S.A. est une société suisse spécialisée dans la production, la vente et la maintenance d'instrumentation géophysique et géotechnique.

Nous sommes le fabricant du résistivimètre universel à signaux cumulatifs GTR-2, un instrument de haute qualité commercialisé à un prix très abordable qui est aujourd'hui utilisé dans le monde entier. Ses applications principales sont les suivantes : hydrogéologie, études d'environnement, prospection minérale, études géotechniques etc... Cet instrument simple d'utilisation représente une alternative économique en tant que méthode de prospection géophysique. Nous fabriquons également des alimentations autonomes (200 W, 400 W) et tous les accessoires nécessaires à la réalisation d'une étude de prospection électrique.

Géotrade propose également une large variété d'instruments dans le domaine de l'exploration géophysique :

- ❖ sismographes 12 à 600 canaux, magnétomètres à césium et à protons (Geometrics)
- ❖ systèmes de diagraphie numérique : unités portables et systèmes pour profondeur jusqu'à 2 000 m, gamme complète de sondes (Mount Sopris)
- ❖ conductivimètres, systèmes électromagnétiques, VLF, gravimètres, moniteurs de vibration.

Nous commercialisons en outre une vaste gamme d'instruments pour la géotechnique, l'hydrogéologie et l'auscultation d'ouvrages, notamment tous les instruments de mesure utilisés pour la mécanique des sols ou des roches ou pour surveiller le comportement d'une construction ou d'un site : moniteurs de vibration, inclinomètres, mesure de niveaux d'eau et de pression interstitielle.

Nous pouvons assurer la mise en service de tous nos instruments.



Sismique

Sismographes d'exploration pour réfraction et réflexion 12-24-48-60 canaux. Systèmes jusqu'à 600 canaux. Géophones tous types, flûtes et enrouleurs, boîtes et lignes de tir. Sources d'énergie. Logiciels d'interprétation.

Seismic

Exploration seismographs for refraction and reflection. 12-24-48-60 channels. Systems up to 600 channels. Geophones all types, spread cables, reels blasters and cabling. Energy sources. Software packages.



Résistivité

Résistivimètres à signaux cumulatifs avec calculs automatiques et mémoire. Convertisseurs DC-DC. Câbles, électrodes, enrouleurs, alimentations et logiciels.

Resistivity

Signal enhancement resistivity meters with automatic calculations and memory. DC-DC converters. Cables, electrodes, reels, power sources and softwares.



Electromagnétisme

Conductivimètres de terrain sans contact au sol, pour investigations de surface ou en profondeur. Instruments de mesure en VLF, avec option résistivité.

Electromagnetism

Ground conductivity meters for near surface and deep investigation. VLF EM instruments, with resistivity attachment.



Radiométrie

Scintillomètres de contrôle et de prospection. Spectromètres portables, systèmes autoportés et aéroportés. Moniteurs de radiations.

Radiometrics

Portable Gamma ray scintillometers and spectrometers, vehicleborne and airborne. Radiation monitors.

Gravimétrie

Gravimètres. Micro-gravimètre.

Gravimetry

Gravity meter. Micro gravity meters.



Champ magnétique terrestre

Magnétomètres à protons, à césium. Magnétomètres pour déminage, agréés US mil. Instruments portables et stations de base. Magnétomètres de plongée. Systèmes autoportés, aéroportés et embarqués.

Earth's magnetic field

Proton and cesium magnetometers. Ordnance locator magnetometers, US mil. approved. Portable instruments and base stations. Diver-held magnetometers. Vehicle, marine and airborne systems.



Diagraphie

Appareils portables et unités légères pour profondeurs 200 à 650 m. Unités 1000 à 2000 m, autoportées. Gamme complète de sondes : PS - résistance - résistivité normale, latérale, focalisée - induction - gamma - neutron - densité - température - résistivité fluide - flowmètre - acoustique - diamètre - inclinomètre - dipmètre. Digital acoustic televiewer. Câbles de logging et fournitures pour recherche pétrolière.

Well logging

Portable and light loggers for depths 200 to 650 m. Logging units up to 2000 m, vehicle mounted. Complete range of probes : SP - resistance - normal, lateral, focused resistivity - induction - gamma-ray - neutron density - temperature - fluid resistivity - flowmeter - acoustic - caliper - inclinometer - dipmeter. Digital acoustic televiewer. Logging cables and supplies for oilfield surveys.



Inclinométrie

Inclinomètres verticaux et horizontaux, sondes mobiles ou fixes. Boîtiers de lecture et d'acquisition. Tubages inclinométriques. Electronivelles. Logiciels d'interprétation.

Inclinometer surveys

Inclinometer probes, vertical and horizontal. In-place inclinometers. Readout units for data opposite. Inclinometer casings. Tiltmeters. Software packages.



Pression interstitielle et hydrostatique

Piézomètres pneumatiques. Piézomètres à corde ou lame vibrante. Instruments de lecture pour capteurs ci-contre. Enregistreurs automatiques en forage.

Pore pressure and water level

Pneumatic piezometers. Vibrating wire or vibrating strip piezometers. Readout instruments for above transducers. Down hole data collectors.

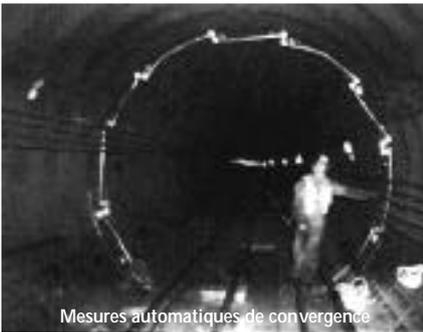


Auscultation d'ouvrages

Extensomètres mécaniques, électriques, simples, multiples. Convergencemètres. Jauges de contrainte à fixer sur structures ou à noyer dans le béton. Cellules de charge. Cellules de pression totale. Fissuromètres - Tassomètres.

Field instrumentation

Borehole extensometers, mechanical, electrical, simple, multiple. Tape extensometers. Weldable and embedment strain gauges. Load cells. Total pressure cells. Crackmeters-Settlement gauges.



Mesures automatiques de convergence

Règle-électronivelle

pour détection de mouvements horizontaux ou verticaux résultant de tassements, soulèvements ou efforts latéraux sur structures. Système automatique de mesures de convergence en tunnels.

El beam sensors

to detect horizontal or vertical movements on structures. Automatic convergence system in tunnels.



Contrôle de vibration

Moniteurs de vibrations avec capteurs triaxiaux et acoustiques.

Vibration monitoring

Vibration monitors with triaxial and sound level sensors.

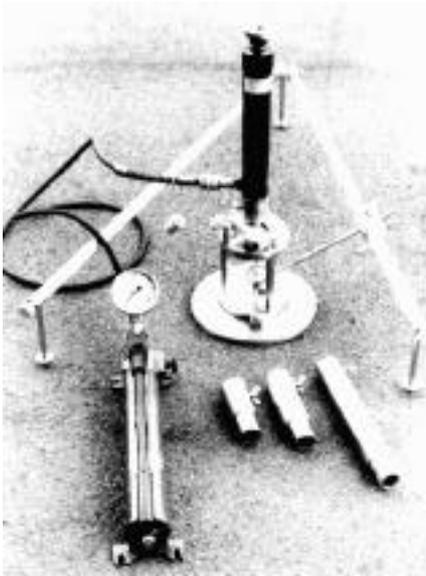


Pénétrromètres

Pénétrromètres dynamiques légers, lourds. SPT, automatique. Pénétrromètres statiques. 25 - 50 - 100 - 200 KN. Pénétrromètres CBR, de poche.

Penetrometers

Dynamic penetrometers light, heavy. SPT (automatic). Static penetrometers. 25 - 50 - 100 - 200 KN. CBR, pocket penetrometers.



Routes, bétons, bitumes

Appareils d'essai de plaque. Contrôle ultrasonique de béton pour structures telles que pieux, parois, etc. Localisation d'armatures.

Road, concrete, asphalt

Plate bearing devices. Ultrasonic tester of concrete for structures such as piles, walls, etc. Detection of reinforcing bars.

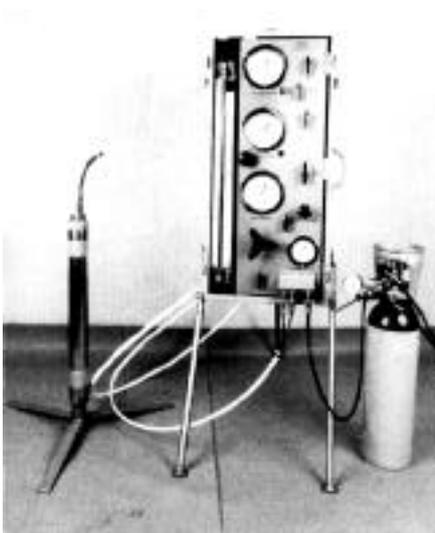


Contrôles non-destructifs

Nucléo-densimètres pour contrôle de densité et de teneur en eau des matériaux et des sols. Contrôle de compaction des revêtements bitumineux et des couches de fondation.

Non destructive surveys

Density/moisture testing instruments for compaction control of all construction materials.



Pressiomètres

Pressiomètres avec sondes mono et tricellulaires.

Pressiometer apparatus

Pressiometers with mono and tri-cellular probes.



Scissomètre

Modèles légers, lourds, enregistreurs.

Shear vane tester

Light, heavy and recording types.



Hydrologie

*Indicateurs de niveau d'eau à lecture directe, enregistreurs pour acquisition de données.
Échantillonneurs d'eau, débitmètres.*

Hydrology

*Water level indicators, direct reading, data collectors.
Water samplers, flowmeters.*



Echantillonnage, forage

Tarières à main, motorisées, échantillonneurs. Outils et fournitures de forage : taillants, carottiers divers et couronnes, tarières, tiges, tubes de revêtement. Sondeuses légères.

Sampling, drilling

Hand and motorised soil augers, sampling tubes. Drilling tools and supplies : drill bits, core barrels, core bits, augers, drill rods, casing tubes. Light drilling rigs.



Laboratoire

*Matériel, instruments et machines pour analyse, identification et essais en laboratoire de : sols - béton - bitume.
Fluides de forage : matériel de contrôle.*

Laboratory

*Equipments, instruments and machines for analysis, identification and testing for : soils - concrete - asphalt.
Mud testing equipment.*

Iris instruments

1 avenue Buffon, B.P. 6007, 45060 Orléans cedex 2, France
☎ : 02 38 63 81 00 - Fax : 02 38 63 81 82 - E-mail : irisins@ibm.net

Gamme d'équipements de reconnaissance géophysique

IRIS INSTRUMENTS conçoit, produit et commercialise des équipements de mesure destinés à la géologie appliquée : environnement, eaux souterraines, géotechnique, exploration minière.

Forte de 25 personnes, dont 10 en Recherche et Développement, IRIS INSTRUMENTS a réalisé un chiffre d'affaires de 21 MF en 1996, dont 75% des ventes à l'export.

Dans le domaine de la reconnaissance du sous-sol (géophysique), IRIS INSTRUMENTS a développé une gamme d'équipements autour des méthodes Electrique, Polarisation Provoquée, Electromagnétisme, Résonance Magnétique des Protons.

Cette gamme comprend les équipements suivants :

LES STRUCTURES DU SOUS-SOL EN IMAGES

- ÉQUIPEMENTS DE MESURE
- ACCESSOIRES DE TERRAIN
 - LOGICIELS DE GESTION
- LOCATION D'ÉQUIPEMENTS

RÉSISTIVIMÈTRES



SYSCAL JUNIOR, Résistivimètre compact



SYSCAL R1, Résistivimètre compact



SYSCAL R2, Résistivimètre standard

Des résistivimètres à courant continu (SYSCAL JUNIOR, SYSCAL R1 PLUS, SYSCAL R2), à accumulation automatique des mesures, calcul de la résistivité apparente, stockage des données dans une mémoire numérique interne. Ces équipements alimentés par des batteries internes, des batteries externes ou des groupes électrogènes ont des tensions d'injection de 400 à 800 V selon les modèles.

Un système de commutation automatique d'électrodes intelligentes en flûte ou en boîtier permet de réaliser automatiquement des séquences de mesures préprogrammées (sondages, profils...).

ÉQUIPEMENT VLF



T-VLF, Récepteur à ondes radio

Un équipement VLF, le T-VLF, doté de trois capteurs magnétiques et de deux inclinomètres pour une mesure simplifiée. Le T-VLF peut être utilisé en mode inclinaison et en mode résistivité.

PROFILAGE ÉLECTRIQUE CONTINU



CORIM, Système de profilage électrique continu

Un système de mesure de la résistivité électrique du sol par profilage continu (CORIM) par électrodes capacitives. Ce système, doté d'un tapis émetteur et de six tapis récepteurs espacés de 1 m, permet d'obtenir une image électrique du sous-sol (pseudo-coupe de résistivité apparente) en avancement continu.

RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE



NUMIS,

Equipement de résonance magnétique nucléaire

Un système de Résonance Magnétique des Protons (PMR), NUMIS, pour une détection directe de l'eau et une détermination de sa teneur dans la tranche 0-100 m. Cette méthode, qui utilise l'excitation par un champ magnétique des protons des molécules d'eau du sous-sol, permet également d'avoir une idée de la perméabilité des aquifères par une détermination qualitative de la taille moyenne de ses pores.

EQUIPEMENT PP VIP 3000 ET ELREC 6



VIP 3000, Emetteur PP de 3 kW

ELREC 6, Récepteur PP six voies

Un système de Polarisation Provoquée (Emetteur VIP, Récepteur ELREC) destiné à l'exploration minière des gisements massifs ou disséminés. Les émetteurs d'une puissance de 3, 4 ou 10 kW ont une tension d'émission de 3 000 V et sont alimentés par un groupe électrogène standard. Le récepteur ELREC 6 possède six dipôles de mesure et analyse la courbe de décroissance PP en dix fenêtres de chargeabilité.

BORIS, SYSTÈME DE MESURES



BORIS,

Système de mesures électromagnétiques en forage



Un système de mesures électromagnétiques fréquentielles surface-forage, forage-forage, BORIS. Ce système mesure les trois composantes du champ magnétique créé en forage par un émetteur situé en surface ou dans un autre forage. Il permet de détecter les structures conductrices et/ou magnétiques situées autour du forage.

BORIS complète la gamme d'équipements EM de surface à source contrôlée MELIS et à source naturelle SAMTEC 1 et SAMTEC 2.

AUTRES ÉQUIPEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES



Systeme électromagnétique à boucle d'émission (0,1 Hz - 7 500 Hz)



Résistivimètre audio MT
à scrutation automatique (1 Hz - 7 500 Hz)



Systeme tensoriel audio MT (1 Hz - 7 500 Hz)
et MT (0,01 Hz - 500 Hz)

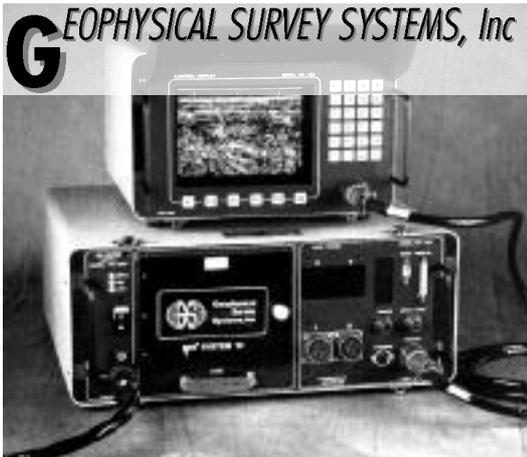
En dehors de l'instrumentation géophysique, IRIS INSTRUMENTS développe également des **centrales d'acquisition pour la surveillance de paramètres** tels que niveau d'eau, température, conductivité, humidité des sols, déplacement, pente, vibrations.

Ces centrales monovoie (MADOSOLO) ou multivoies (MADOPLUS, HYDRIS, OSIRIS) mesurent à intervalle de temps régulier les signaux issus des différents capteurs qui leur sont branchés et stockent les résultats dans leur mémoire numérique interne. Elles permettent les surveillances de site (nappe d'eau, zone polluée, site de stockage de déchets, etc) et d'ouvrage de génie civil (pont, tunnel, barrage, etc).

En plus de la conception, de la fabrication et de la vente d'instruments, IRIS INSTRUMENTS propose également des équipements en location et des formations d'opérateurs sur le terrain.

MDS *Sondage* *Matériel*

24 place Charles Fillion, 75017 Paris, France
☎ : 01 46 27 36 35 - Fax : 01 46 27 49 08



MDS ondage Matériel

GSSI

- **Radar géophysique** pour investigations des formations superficielles et des ouvrages d'art.
- Applications : Génie Civil, Géotechnique, Géologie, Environnement, Archéologie.
- Equipements :
 - ❖ SIR-2 : léger, économique, rapide de prise en main.
 - ❖ SIR-10B : multi-canaux.
 - ❖ SIR-10H : spécifique pour analyse des chaussées et pistes d'aéroport. Haut rendement.
 - ❖ Une dizaine d'antennes de surface de 16MHz à 2 GHz.
 - ❖ Antennes de forage.
 - ❖ Logiciels de traitement, simulation (WINRAD, GPRSIM, RADACT, etc).
- Leader mondial, 27 ans d'expérience, 1 500 unités en services.

Nouveau : GEM-300 : Appareil d'électromagnétisme multifréquences.

BISON INSTRUMENTS

- **Laboratoire sismique** configurable à volonté suivant applications : DOS, WINDOWS NT, PENTIUM, CARTE A/D VISION BOARD 20/20 (20 bit/20µs).
- Modèles GALILEO, SPECTRA, JUPITER (20/21/24 bits), 12 à 120 canaux.
- Sources d'énergie EWG (chute de poids accélérée).
- TDEM 2000 : électromagnétisme en "time domain". Bien adapté pour études d'environnement jusqu'à 100 mètres.

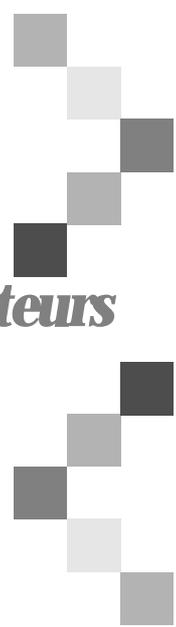
DELTA EPSILON INSTRUMENTS

- **Unité de diaggraphie** (nouveau concept d'ultra-portabilité) :
- Valises/Treuil 300 et 500 mètres (30 et 45 kg).
- Technologie de pointe : alimentations sondes et surface par batteries internes rechargeables, transmission sondes/surface par modem, PC et enregistreur thermique intégrés, acquisition sur carte mémoire PCMCIA, software interne très convivial avec un mode de calibration automatique.
- Logiciel de traitement des diaggraphies "WELLCAD" (ALT).

AGI

- **Résistivimètre** STING R1 programmé pour effectuer tous les dispositifs classiques.
- Affichage en temps réel de la résistivité apparente.
- Mesures, date, heure et géométrie du dispositif stockés automatiquement en mémoire.
- Système SWIFT : dispositif à multi-électrodes "intelligentes" pour gérer un grand nombre de données/profils nécessaires en imagerie résistive (jusqu'à 254 électrodes).

Index des auteurs



ABRAHAM Odile

LCPC
route de Bouaye
B.P. 19
44340 Bouguenais
France
☎ 02 40 84 59 18
Fax 02 40 84 59 97
E-mail : odile.abraham@lpc.fr
p. 81

ALBOUY Yves

ORSTOM
Centre de Recherche d'Ile-de-France
Laboratoire de Géodynamique Interne
32 avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex
France
☎ 01 48 02 55 55
Fax 01 48 47 30 88
E-mail : albouy@bondy.orstom.fr
p. 13, 33, 49, 65, 71, 87

ANDRIEUX Pierre

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France
☎ 01 44 27 45 91
Fax 01 44 27 45 88
E-mail : pandrieux@magma.cgg.com
p. 29

ARDISSON Marie-Hélène

Laboratoire de Géophysique d'Orléans
30 avenue de la Recherche Scientifique
45071 Orléans
France
☎ 02 38 25 52 40
Fax 02 38 25 76 50
p. 87

ASKRI Brahim

ORSTOM
5 impasse Chahrazed
B.P. 434
1004 El Menzah 4
Tunisie
☎ 216 75 00 09
Fax 216 75 02 54
E-mail : orstom@orstom-tunis.rio.org
p. 119

AUBERT Maurice

Observatoire
12 avenue des Landais
63000 Clermont Ferrand
France
☎ 04 73 40 73 76
Fax 04 73 27 33 47
E-mail : m.aubert@opgc.univ-b.p.clermont.fr
p. 121

BARBIERO Laurent

Centre ORSTOM, Pédologie
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal
☎ 221 32 34 76
Fax 221 32 43 07
E-mail : barbiero@dakar.orstom.sn
p. 173

BELLIER Gérard

ORSTOM
Centre de Recherche d'Ile-de-France
Laboratoire des Formations Superficielles
32 avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex
France
☎ 01 48 02 55 96
Fax 01 48 47 30 88
E-mail : bellier@bondy.orstom.fr
p. 17, 153

BENDERITTER Yves

CNRS
Centre de Recherches Géophysiques
Garchy
58150 Pouilly-sur-Loire
France
☎ 03 86 69 47 26
Fax 03 86 69 47 33
E-mail : crg@garchy.cnrs.fr
p. 127

BENDJOUDI Hocine

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géologie Appliquée
tour 26, Case 123
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France
☎ 01 44 27 63 26
Fax 01 44 27 51 25
E-mail :
p. 45

BENECH Christophe

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France
☎ 01 44 27 39 20
Fax 01 44 27 45 88
p. 97

BITRI Adnand

BRGM
Direction de la recherche
3 avenue Claude Guillemin
B.P. 6009
45060 Orléans cedex 02
France
☎ 02 38 64 37 38
Fax 02 38 64 33 61
E-mail : a.bitri@brgm.fr
p. 107

BLANCHARD Didier

Université de Nantes
Faculté des Sciences et des Techniques
2 rue de la Houssinière
44072 Nantes cedex 03
France

p. 81

BOIVIN Pascal

Centre ORSTOM, Pédologie
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76

Fax 221 32 43 07

E-mail : boivin@dakar.orstom.sn

p. 147, 173

BORNE Viviane

CALLIGEE - ATLANPOLE
1 Rue de la Noé
B.P. 82118
44321 Nantes cedex
France

☎ 02 30 14 33 71

Fax 02 30 14 33 72

p. 91

BOURENNANE Hocine

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 00

Fax 02 38 41 78 69

E-mail : dominique.king@orleans.inra.fr

p. 23, 53

BOUVIER Antoine

Compagnie Générale de Géophysique
1 rue Léon Migaux
91341 Massy
France

☎ 01 64 47 39 86

Fax 01 64 47 36 72

p. 29

BRUAND Ary

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 50

Fax 02 38 41 78 69

E-mail : ary.bruand@orleans.inra.fr

p. 39

CAMERLYNCK Christian

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France

☎ 01 44 27 48 23

Fax 01 44 27 45 88

E-mail : camerl@dga.jussieu.fr

p. 33

COURTEAUD Michel

Université de la Réunion
Département des Sciences de la Terre
97490 Sainte-Clotilde
France

Fax 262 93 81 66

E-mail : courteau@univ-reunion.fr

p. 13

COUTURIER Alain

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 00

Fax 02 38 41 78 69

E-mail : dominique.king@orleans.inra.fr

p. 53

CROISY Philippe

ORSTOM/Université Pierre et Marie Curie
Centre de Recherche d'Ile-de-France
Laboratoire de Géodynamique Interne
32 avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex
France

☎ 01 48 02 55 19

Fax 01 48 47 30 88

E-mail : albouy@bondy.orstom.fr

p. 29

DABAS Michel

Université P. et M. Curie/
CNRS URA 1367
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France

☎ 01 44 27 48 26

p. 33, 39, 45

DAVID Christian

AFAN
1 avenue du Général Leclerc
94200 Ivry-sur-Seine
France

☎ 01 44 27 38 95

Fax 01 44 27 45 88

E-mail : cfechant@dga.jussieu.fr

p. 97

DESCLOÎTRES Marc

ORSTOM/Université P. et M. Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France

☎ 01 44 27 48 26

Fax 01 44 27 45 88

E-mail : descloit@bondy.orstom.fr

p. 33, 173

DIOUF Same

Centre ORSTOM, Géophysique
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76

Fax 221 32 43 07

E-mail : dioufs@dakar.orstom.sn

p. 59, 133

DORIGNY Abel

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France
☎ 02 38 41 78 00
Fax 02 38 41 78 69
E-mail : dominique.king@orleans.inra.fr
p. 53

DUVAL Odile

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France
☎ 02 38 41 78 44
Fax 02 38 41 78 69
E-mail : odile.duval@orleans.inra.fr
p. 39

FECHANT Catherine

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France
☎ 01 44 27 38 95
Fax 01 44 27 45 88
E-mail : cfechant@dga.jussieu.fr
p. 97

FERBER Valéry

LROP
Groupe Géotechnique
12 rue Teisserenc de Bort
78190 Trappes
France
☎ 01 34 82 12 08
Fax 01 30 50 83 69
p. 101

FERRY Luc

LRSAE
ORSTOM/CNRE
Androhibe
B.P. 434
Antananarivo 101
Madagascar
E-mail : ferry@hydro.orstom.mg
p. 71

FRUGIER Eric

Observatoire de Physique du Globe
5 rue René Descartes
67084 Strasbourg cedex
France
☎ 03 88 41 63 95
Fax 03 88 61 67 47
p. 161

GAALLOUL Nourredine

INRGREF
rue Hédi Karray
B.P. 10
2080 Ariana
Tunisie
☎ 216 1 786 377
Fax 216 1 794 016
p. 17

GIORGI Loïc

Water Resources
Unit Royal
Commercial Centre
Rose Hill
Mauritius
Fax 230 46 57 177
p. 13

GIRARD Vincent

E.N.S.P.S.
boulevard Brandt
67400 Illkirch
France
p. 161

GOMIS Raymond

Centre ORSTOM, Géophysique
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal
☎ 221 32 34 76
Fax 221 32 43 07
p. 133

GONZALES BARRIOS José Luis

CENID-RASPA
Apartado Postal 225-3
ZI. 35071 Gomez Palacio (DGO)
Mexique
E-mail : glzjl@raspa.inifap.conacyt.mx
p. 143

GOURRY Jean Christophe

BRGM
Direction de la recherche
3 avenue Claude Guillemin
B.P. 6009
45060 Orléans cedex 02
France
☎ 02 38 64 39 68
Fax 02 38 64 33 61
E-mail : jc.gourry@brgm.fr
p. 107, 139

GRANDJEAN Gilles

BRGM
Direction de la recherche
3 avenue Claude Guillemin
B.P. 6009
45060 Orléans cedex 02
France
☎ 02 38 64 34 75
Fax 02 38 64 33 61
E-mail : g.grandjean@brgm.fr
p. 107

GROOM Doug

Geometrics
395 Java Drive
Sunnyvale Ca 94089
USA
☎ 408 734 46 16
FAX 408 745 61 31
E-mail : doug@geom.geometrics.com
p. 13

GUERIN Roger

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France
☎ 01 44 27 45 91
Fax 01 44 27 45 88
E-mail : guerin@ccr.jussieu.fr
p. 45

HAMMECKER Claude

Centre ORSTOM, Pédologie
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76
Fax 221 32 43 07

E-mail : hamecker@dakar.orstom.sn

p. 147

HESSE Albert

CNRS
Centre de Recherches Géophysiques
Garchy
58150 Pouilly-sur-Loire
France

☎ 03 86 69 47 26
Fax 03 86 69 47 33

E-mail : crg@garchy.cnrs.fr

p. 111

HEVIN Grégoire

LCPC
route de Bouaye
B.P. 19
44340 Bouguenais
France

☎ 02 40 84 59 19
Fax 02 40 84 59 97

p. 81

ISAMBERT Michel

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 00
Fax 02 38 41 78 69

E-mail : dominique.king@orleans.inra.fr

p. 23, 53

JOB Jean-Olivier

CENID-RASPA
Apartado Postal 225-3
ZI. 35071 Gomez Palacio (DGO)
Mexique

☎ 90 17 28 52 51
Fax 52 17 14 59 19

E-mail : jjob@lagnet.com.mx

p. 17, 143

JOIN Jean-Lambert

Université de la Réunion
Département des Sciences de la Terre
97490 Sainte-Clotilde
France

Fax 262 93 81 66

p. 13

KING Dominique

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 48
Fax 02 38 41 78 69

E-mail : dominique.king@orleans.inra.fr

p. 23, 53

LARVY DELARIVIERE Jean

Centre ORSTOM, Pédologie
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76
Fax 221 32 43 07

p. 153

LEBERT François

BRGM
Département de Géophysique Appliquée
3 avenue Claude Guillemin
B.P. 6009
45060 Orléans cedex 02
France

☎ 02 38 64 31 56
Fax 02 38 64 36 89

p. 139

LE PARCO Rémy

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 00
Fax 02 38 41 78 69

E-mail : dominique.king@orleans.inra.fr

p. 23

LOCHON Sylvia

SRPV
93, rue de Curambourg
45403 Fleury les Aubrais cedex
France

☎ 02 38 22 11 11
Fax 02 38 84 19 79

p. 39

MANE Landing

Centre ORSTOM, Pédologie
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 80
Fax 221 32 43 07

E-mail : stage@dakar.orstom.sn

p. 147

MARGUET Thierry

Calligee - Atlanpôle
1 rue de la Noé
B.P. 82118
44321 Nantes cedex 3
France

Fax 02 40 14 33 72

p. 91

MARTIRÉ Olivier

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105
4 Place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France

☎ 01 44 27 39 20
Fax 01 44 27 45 88

p. 49

MENVIELLE Michel

Université Paris Sud
Laboratoire de Géophysique et
Géodynamique Interne
Bat. 504
91405 Orsay cedex
France

☎ 01 69 15 67 39

p. 65

MICHOT Didier

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 48
Fax 02 38 41 78 00

p. 53

MONTOROI Jean-Pierre

ORSTOM
Centre de Recherche d'Ile-de-France
Laboratoire des Formations Superficielles
32 avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex
France

☎ 01 48 02 55 33
Fax 01 48 47 30 88

E-mail : montoroi@bondy.orstom.fr

p. 17, 153

MÜLLER Imre

Université de Neuchâtel
Centre d'Hydrogéologie
rue Emile Argand 11
Case Postale 2
CH 2007 Neuchâtel 7
Suisse

☎ 32 718 26 92
Fax 32 718 26 01

p. 167

NIANG Magatte

Centre ORSTOM, Géophysique
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76
Fax 221 32 43 07

E-mail: dioufs@dakar.orstom.sn

p. 59

PANISSOD Cédric

CNRS
Centre de Recherches Géophysiques
Garchy
58150 Pouilly-sur-Loire
France

☎ 03 86 69 47 47
Fax 03 86 69 47 33

E-mail : crg@garchy.cnrs.fr

p. 39, 53

PINET Céline

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géologie Appliquée
tour 26, Case 123
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France

☎ 01 44 27 63 26
Fax 01 44 27 51 25

p. 45

RAKOTO Heritiana

Observatoire de Géophysique
B.P. 1473
Antananarivo
Madagascar

☎ 261 22 53 53

p. 65

RALAIMARO Joseph

ORSTOM
Centre d'Antananarivo
Madagascar
Fax 261 233 098

p. 71

RANAIVO-NOMENJANAHARY

Flavien
Observatoire de Géophysique
B.P. 1473

Antananarivo
Madagascar

☎ 261 22 53 53

E-mail : frnanai@syfed.refer.mg

p. 65

RASOLOMANANA Eddy

Observatoire Géophysique
B.P. 1473
Antananarivo
Madagascar

☎ 261 22 53 53

p. 71

RATSIMBAZAFY Jean-Bruno

Observatoire de Géophysique
B.P. 1473
Antananarivo
Madagascar

☎ 261 22 53 53

E-mail : jbratsim@syfed.refer.mg

p. 65

REMY Brigitte

FREDEC
93, rue de Curambourg
45403 Fleury les Aubrais cedex
France

☎ 02 38 22 11 11
Fax 02 38 84 19 79

p. 39

RENAUX Bernard

INRA
Laboratoire de Science du Sol
SESCPF
Domaine de Limère
45160 Ardon
France

☎ 02 38 41 78 00
Fax 02 38 41 78 69

p. 53

RICHARD Jean-François

ORSTOM
Le Haut des Envers
88340 Le Girmont Val-d'Ajol
France

☎ 03 29 66 53 58
Fax 03 29 30 50 17

E-mail : jean-francois.richard2@wanadoo.fr

p. 147

RISSER Vincent

ORSTOM
Apartado Postal 1711
6596 Quito
Equateur

☎ 593 2 503 944
Fax 593 2 569 396

E-mail : mission@orstom.ecx.ec

p. 87

RITZ Michel

Centre ORSTOM, Géophysique
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76
Fax 221 32 43 07

E-mail : ritz@dakar.orstom.sn

p. 13, 71

RIVERA GONZALES Miguel

CENID-RASPA
Apartado Postal 225-3
Z.I. 35071 Gomez Palacio (DGO)
Mexique

p. 143

ROBAIN Henri

ORSTOM
Centre de Recherche d'Ile-de-France
Laboratoire des Formations Superficielles
32 avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex
France

☎ 01 48 02 56 36

Fax 01 48 47 30 88

E-mail : robain@bondy.orstom.fr

p. 33

ROBINEAU Bernard

Université de la Réunion
Département des Sciences de la Terre
97490 Sainte-Clotilde
France

Fax 262 93 81 66

p. 13

ROBISON Laurent

LRSAE
ORSTOM/CNRE
Androhibe
B.P. 434
Antananarivo 101
Madagascar

Fax 261 23 30 98

p. 71

SCHMUTZ Myriam

C.E.R.E.G
3 rue de l'Argonne
67083 Strasbourg cedex
France

☎ 03 88 41 63 95

Fax 03 88 61 67 47

p. 161

SCHOTT Jean-Jacques

Observatoire de Physique du Globe
5 rue René Descartes
67084 Strasbourg cedex
France

☎ 03 88 41 63 95

Fax 03 88 61 67 47

E-mail : schott@macareux.u-strasbg.fr

p. 65, 127, 161

TABBAGH Alain

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire de Géophysique Appliquée
tour 15-25, Case 105

4 place Jussieu

75252 Paris cedex 05

France

☎ 01 44 27 48 24

Fax 01 44 27 45 88

E-mail : alat@ccr.jussieu.fr

p. 53

TCHANI Joseph

Centre ORSTOM, Géophysique
B.P. 1386
Dakar-Hann
Sénégal

☎ 221 32 34 76

Fax 221 32 43 07

p. 133, 173

TURBERG Pascal

Université de Neuchâtel/
Centre d'Hydrogéologie
rue Emile Argand 11
Case Postale 2

CH 2007 Neuchâtel 7

Suisse

☎ 32 718 26 92

Fax 32 718 26 01

p. 167

WYNS Robert

BRGM
Service Géologique National
3 avenue Claude Guillemin
B.P. 6009

45060 Orléans cedex 02

France

☎ 02 38 64 33 91

Fax 02 38 64 31 64

p. 139

XU SHI ZHE

Institut of Geology and Geophysics
Ocean University of Qingdao
Qingdao, 266003

République Populaire de Chine

Fax 86 53 22 87 90 91

E-mail : szxu@ns.qd.sd.cn

p. 87

ZANOLIN Anne

27 bis rue de La Fontaine
92260 Fontenay aux Roses
France

☎ 01 46 61 57 79

E-mail : azanolin@aol.com

p. 173

ZANTE Patrick

ORSTOM
5 impasse Chahrazed
B.P. 434
1004 El Menzah 4
Tunisie

☎ 216 75 00 09

Fax 216 75 02 54

p. 17

L'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération

Direction Générale

209-213, rue La Fayette - 75480 Paris cedex 10

Web : <http://www.orstom.fr>

Centre de Recherche d'Ile de France

32, avenue Henri Varagnat - 93143 Bondy cedex

☎ 01 48 02 55 00 - fax : 01 48 47 30 88