



Programme prévisionnel

Mardi 16 Novembre 2010 Journée EDF R&D - LCPC Atelier « Méthodes et Perspectives »

10h - 10h30 Accueil Inscriptions

10h30 - 12h30 Conférences

- « Techniques électromagnétiques pour la géophysique appliquée, état de l'Art et perspectives », **Pr. Michel CHOUTEAU** (École Polytechnique de Montréal).
- « Imagerie et monitoring passifs : utilisation du bruit sismique », **Pr. Michel CAMPILLO** (Université Joseph Fourier, Grenoble)

12h30: Repas

14h30 – 17h00 Conférences

- "Instrumentation assistée par ordinateur, implications potentielles pour l'imagerie", **Frédéric BOURQUIN** (Lab. Central des Ponts et Chaussées).
- « Traitement des signaux géophysiques : Méthodes et applications », **Pr. Jean-Louis LACOUME** (INP Grenoble, gipsa-lab).



Mercredi 17 Novembre 2010 Journées Scientifiques AGAP-Qualité.

9h - 9h30 **Accueil Inscriptions**

9h30 - 10h00 **Introduction aux journées. Ouverture par le directeur du CETE**

10h – 12h Session « Géophysique Aquatique »

Chairman : A. Bitri

Auteurs	TITRE	page
J.C. Gourry, G. Braibant	Reconnaissance de sédiments pollués issus d'un drainage minier acide par imagerie électrique aquatique sur le lac Hatillo (République Dominicaine)	7
C. Herisson, A. Mc Neill, P. Gauthier, C. Caillet, D. Taliana	Intégration de quatre méthodes géophysiques marines dans le but d'estimer les propriétés géotechniques des sols	11
Jean-Claude Bernard, Pierre Frappin, Florence Renalier	Prospection géophysique sous le Danube, Budapest, Hongrie	15
Raphaël Bénot, Magali Jouas, Jean-François Mahé, Denis Rolland	Construction du nouveau pont du Larivot en Guyane – Localisation du substratum rocheux par géophysique	19
Nikodic Jean, Borne Viviane, Mouquet Alain, Legrand Erwan, Walker Patrice	Evaluation des volumes de sédiments à extraire dans le fleuve Charente	23

14h – 16h30 Session « Digos »

Chairman : Ch. Hérisson

Auteurs	TITRE	page
Alexandre Bolève	Suivi d'érosion interne d'une digue expérimentale en terre par monitoring de polarisation spontanée	27
Kévin. Samyn*, Aude. Nachbaur, Adnand. Bitri	Intégration de la méthode sismique SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) dans la cartographie de l'aléa karstique sur les digues de protection contre les crues du bassin de la Loire	31
Yves-Laurent Beck, Jean-Marie Hénault, Cyril Guidoux, Jean-Robert Courivaud	Surveillance des fuites dans les digues en terre par mesure de température répartie par fibre optique	37
pause		
Yannick Fargier, Sérgio Palma-Lopes, Daniel Francois, Cyrille Fauchard, Philippe Cote	Optimisation du positionnement des électrodes pour l'Imagerie de Résistivité Electrique : Application à la détection d'infiltrations dans une digue expérimentale	41
J.P. Blais	Méthodologie opérationnelle pour le diagnostic d'Érosion Interne et de fuites dans les digues en terre, par reconnaissances non destructives - Expérience d'EDF -	45
Sérgio Palma Lopes, David Hupin, Yannick Fargier, Raphaël Bénot, Anaëlle Luczak et Sébastien Hervé	Surveillance de digues par Imagerie de Résistivité Electrique : expérimentation de longue durée sur une levée de Loire	49



Jeudi 18 Novembre 2010 Journées Scientifiques AGAP-Qualité.

9h – 12h Session « Mines, Carrières, Cavités »

Chairman : Ch. Camerlynck

Auteurs	TITRE	page
Olivier Fontanarava, Pierre Frappin	Calcul de cubature par panneaux électriques (tomographies de résistivité)	53
Yann Penhouët, Pascal Bouton, Viviane Borne	Extension de carrière : apport de la géophysique dans l'évaluation de l'homogénéité d'un massif calcaire.	57
Côte Philipe, Olivier Magnin, Jacques Morel	Tomographies sismiques différentielles : application au suivi d'un pilier delimité par des galeries souterraines	61
pause		
Kévin. Samyn, Adnand. Bitri, Gilles. Grandjean	Imaging near-surface feature using cross-correlation analysis of surface-waves	65
Francois BRETAUDEAU, Donatienne LEPAROUX, Romain BROSSIER, Odile Abraham	Potentiel de l'inversion des formes d'ondes élastiques pour l'imagerie 2D quantitative de la proche surface.	71
Cyrille Balland, Arkadiusz Kosecki ¹ , Bogdan Piwakowski	Développement et application de méthodes d'imagerie sismique pour la détection des cavités souterraines en milieu urbain	75

14h – 16h30

Session « Méthodes innovantes et techniques croisées »

Chairman : C. Balland

Auteurs	TITRE	page
Donatienne LEPAROUX, Francois BRETAUDEAU, Laurent LAGUERRE, Fabien TREYSEDE, Philippe COTE, Odile Abraham	Modélisation sismique expérimentale à échelle réduite à l'aide d'un Banc de Mesures Ultrasonore Sans Contact (MUSC) – application à l'analyse de la dispersion des ondes de surface	79
Carole Kaouane & Michel Chouteau	GPR & ERT sur une chaussée montréalaise : étude de cas et autopsie primaire	85
Michel Dabas, Gianfranco Morelli, Alexandre Novo, René Ruault	Faisabilité de la reconnaissance de structures archéologiques grâce à un radar multi-antennes bi-fréquence, bi- polarisé et une navigation assistée par ordinateur	89
Christian Camerlynck, Gilles Bossuet, David Etienne, Clément Laplaige, Jean-Pierre Simonet, Jean-Michel Friedt, Michel Dabas	Application du radar-sol aux sites d'ambiance humide - Application aux habitats littoraux lacustres du Jura et des mardelles de Lorraine"	93
Grégory Bièvre, Florence Renalier Guérolé Mainsant, Luc Valldosera, Denis Jongmans, Etienne Flavigny & Eric Larose	Caractérisation de l'endommagement d'une argile au sein d'un glissement de terrain par mesures sismiques	97
Huiyan Wang, Bo li, Cyrille Fauchard	Caractérisation diélectrique des roches dans la bande 500 MHz – 4GHz	103



Reconnaissance de sédiments pollués issus d'un drainage minier acide par imagerie électrique aquatique sur le lac Hatillo (République Dominicaine)

Jean-Christophe Gourry, Gilles Braibant

BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans, France

jc.gourry@brgm.fr ; g.braibant@brgm.fr

Abstract

An aquatic electrical resistivity and Induced Polarization was carried out on Lake Hatillo (Dominican Republic) to detect contaminated sediments transported by a river from mining tailings. Contaminated sediments have lower electric resistivity and higher normalized IP. Volumes of total sediments and contaminated sediments were calculated from resistivity sections.

Objectifs de l'étude – le drainage minier acide

Le lac Hatillo est situé au centre la République Dominicaine à 150 km environ au Nord de Santo Domingo (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). C'est un lac de barrage alimenté majoritairement par le rio Yuna et par le rio Margajita. Cette dernière rivière traverse un massif de formations volcano-sédimentaires où sont exploités plusieurs mines d'or dans des sulfures massifs. Bien que protégés par des digues, les tas de stériles sont régulièrement érodés par les pluies tropicales, entraînant les sédiments vers le rio Margajita qui les dépose dans le lac Hatillo.

A son entrée dans la plaine alluvionnaire d'Hatillo, le rio Margajita présente un pH de 2 à 2.5. Le long de son cours, on trouve une couche épaisse de sédiments fins composés d'oxydes de fer. Les concentrations d'oxydes et sulfures métalliques atteignent 100 g/kg pour le fer et 30 g/kg pour l'Aluminium dans les alluvions de la Margajita. L'Arsenic atteint plus d'1 g/kg.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'épaisseur de l'ensemble des sédiments déposés dans le lac Hatillo depuis sa création et d'en estimer la qualité, c'est-à-dire leur possible pollution par des résidus miniers, en vue d'une réhabilitation. En corollaire, Il s'agit de faire la distinction entre les sédiments du rio Margajita pollués et ceux du rio Yuna peu pollués.

Méthodes géophysiques

Lagabrielle et Chevalier (1991) décrivent la méthode de la résistivité électrique aquatique. Son principe est identique à celui du traîné électrique classique : un quadripôle constitué d'un dipôle d'injection de courant et d'un dipôle de mesure de potentiel est tiré derrière un bateau en continu. Les électrodes du quadripôle peuvent soit être posées au fond soit flotter à la surface du lac, de la rivière ou de la mer. Cette méthode permet de caractériser la résistivité électrique des sédiments et des formations géologiques sous la masse d'eau mais également la résistivité de l'eau.

La polarisation provoquée aquatique se pratique de la même manière qu'en terrestre. Cette méthode permet de détecter la présence de métaux disséminés dans une matrice poreuse (Wong et Strangway, 1981). Dans un contexte de drainage minier acide où les sédiments pollués sont conducteurs, l'effet IP décroît. La chargeabilité normalisée ou facteur métal (metal factor) permet de normaliser la chargeabilité atténuée dans un contexte conducteur : $MF = 1000M/\rho$ où M est la chargeabilité et ρ est la résistivité électrique.

Une flûte de 13 électrodes (2 pour l'injection de courant et 11 pour la mesure de potentiel) flottant à la surface de l'eau ont été branchées sur un résistivimètre Syscal Pro à 10 canaux, pour une acquisition en continu piloté par le logiciel Sysmar. Un GPS de navigation marine couplé à un échosondeur donne la position et la profondeur de l'eau pour chaque mesure de potentiel à raison d'une mesure par seconde. Afin de conserver un bon signal/bruit, les mesures ont été acquises en configuration Wenner-Schlumberger réciproque ($n=1$ à 10) qui donne une profondeur d'investigation de 0.2 fois la longueur totale de la ligne (Apparao et Gangadhara, 1974). Pour un espacement entre électrode de 10 m, la profondeur d'investigation est donc de 30 m environ, qui correspond à la profondeur maximale du lac au niveau du barrage.

Les tomographies électriques ont pu être inversées à l'aide du logiciel Res2DInv qui comporte un module pour les mesures aquatiques (électrodes flottantes ou sur le fond) en tant compte de la bathymétrie et de la résistivité de l'eau qui peut être une constante ou une variable.

Les campagnes de terrain

Deux campagnes de géophysique ont été menées sur le lac Hatillo : une première campagne en septembre 2007 sur un secteur de 2 km² à la confluence des rios Yuna et Margajita au sud du lac, la seconde en avril-mai 2008 sur l'ensemble du lac (soit 30 km²), 5 mois après le passage des cyclones Olga et Noel (Figure 1).

Au cours de la première mission, 47 km linéaires ont été levés en tomographie de résistivité électrique et polarisation provoquée aquatique dans la partie sud du lac au dessus du cône de sédiments. Pendant la seconde mission, 250 km en tomographie de résistivité électrique aquatique, bathymétrie par échosondeur ont été menés sur l'ensemble du lac, à raison de 30 km par jour. Les profils ont été réalisés globalement avec un espacement de 150 m dans les 2 directions au sud du lac et avec un espacement de 150 m dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest au Nord du lac.

Résultats

La Figure 2 illustre la répartition typique des résistivités sur un profil transverse au cône de sédiments apportés par le rio Margajita. Les sédiments récents issus des résidus miniers sont plus conducteurs (5 à 10 ohm.m) que ceux apportés par le rio Yuna (50 à 70 ohm.m). On a pu identifier le substratum calcaire qui contraste bien avec les sédiments. En cartographiant la résistivité de la première couche sous le fond du lac (Figure 3), on observe plusieurs secteurs de sédiments conducteurs : au sud à l'exutoire du rio Margajita, à l'ouest dans la baie de Caballeros à l'exutoire d'un arroyo provenant du massif de péridotite exploité en « open-pit » pour le nickel, au nord où l'ancienne plaine d'inondation était couverte de limons plus conducteurs du type de la couche 3 de la Figure 2.

Le volume de sédiments déposés dans le cône depuis la création du lac est estimé entre 9.1 et 13.0 millions de m³. Cela représente un volume moyen entre 400 000 et 650 000 m³ par an, soit 1200 et 1800 m³ par jour depuis la création du lac. Son épaisseur atteint 6 m au dessus de l'ancienne plaine d'inondation du Yuna. Ces quantités de sédiments déposés en moyenne quotidiennement sont dans la norme sous climat tropical. Par différence de levé bathymétrique entre les 2 campagnes, le volume de sédiments apportés entre septembre 2007 et avril/mai 2008 est estimé à 900 000 m³. Ces sédiments ont été principalement amenés pendant les tempêtes tropicales Olga et Noel de l'automne 2007, provenant en grande partie des résidus miniers.

Les profils de polarisation provoquée réalisés en 2007 ont permis de calculer le facteur métal du premier mètre dans les sédiments du cône (Figure 4). Après seuillage du facteur métal, on a pu identifier les secteurs comportant une quantité importante de métaux disséminés dans les sédiments, et étant donc les plus toxiques. Ils correspondent à l'ancien lit de la Margajita. Cela confirme que la majorité des sédiments continuent de suivre l'ancien lit mineur de la Margajita qui est toujours marqué dans la bathymétrie.

Conclusion

Les méthodes électriques aquatiques permettent de grands rendements journaliers. Il existe des logiciels d'inversion permettant de tenir compte de la couche d'eau de résistivité constante ou variable. Les coupes géoélectriques ont permis de calculer l'épaisseur totale de sédiments comprenant les sédiments déposés sur les calcaires avant et après la création du lac. On a pu faire la distinction entre les apports du rio Margajita constitués de résidus miniers et ceux du Yuna non pollués. La résistivité et la chargeabilité normalisée des sédiments sont des indicateurs du niveau de pollution des sédiments charriés par le rio Margajita qui sont chargés de sulfates et oxydes métalliques. Ces sédiments pollués sont répartis principalement à l'embouchure et le long de l'ancien lit du rio Margajita.

Références

Apparao, A; Gangadhara Rao, T, 1974, Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes, Geophysical Prospecting, vol.22, no.2, pp.211-223.

Lagabrielle, R; Chevalier, M, 1991, Prospection électrique par courant continu en site aquatique. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol.171, pp.57-62.

Wong, J; Strangway, D W, 1981, Induced polarization in disseminated sulfide ores containing elongated mineralization, Geophysics, vol.46, no.9, pp.1258-1268.

Mots clés : géophysique, méthodes électriques aquatiques, pollutions, drainage minier acide, sédiments, République Dominicaine.

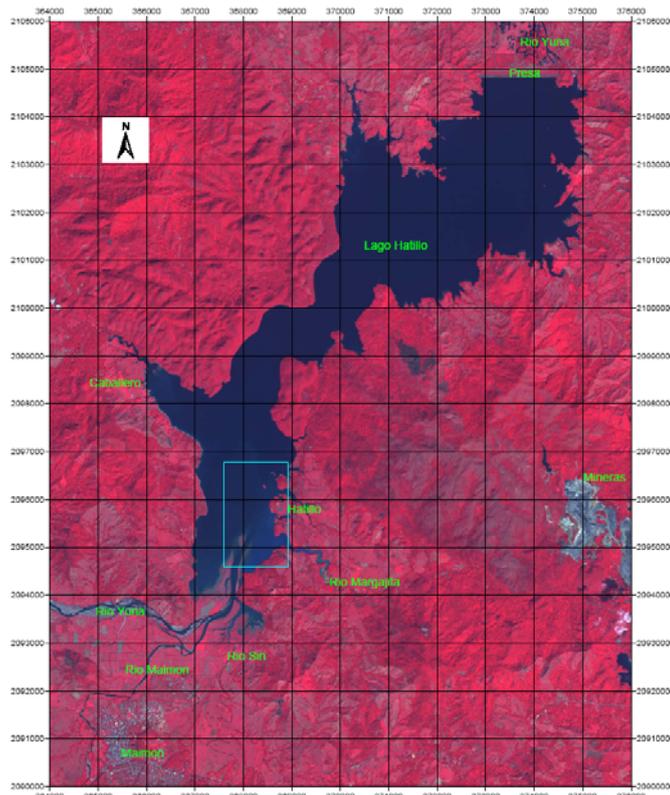


Figure 1 : Photo satellite SPOT orthorectifiée, géoréférencée (UTM 19N, datum NAD27). Le rectangle bleu représente la zone étudiée en septembre 2007.

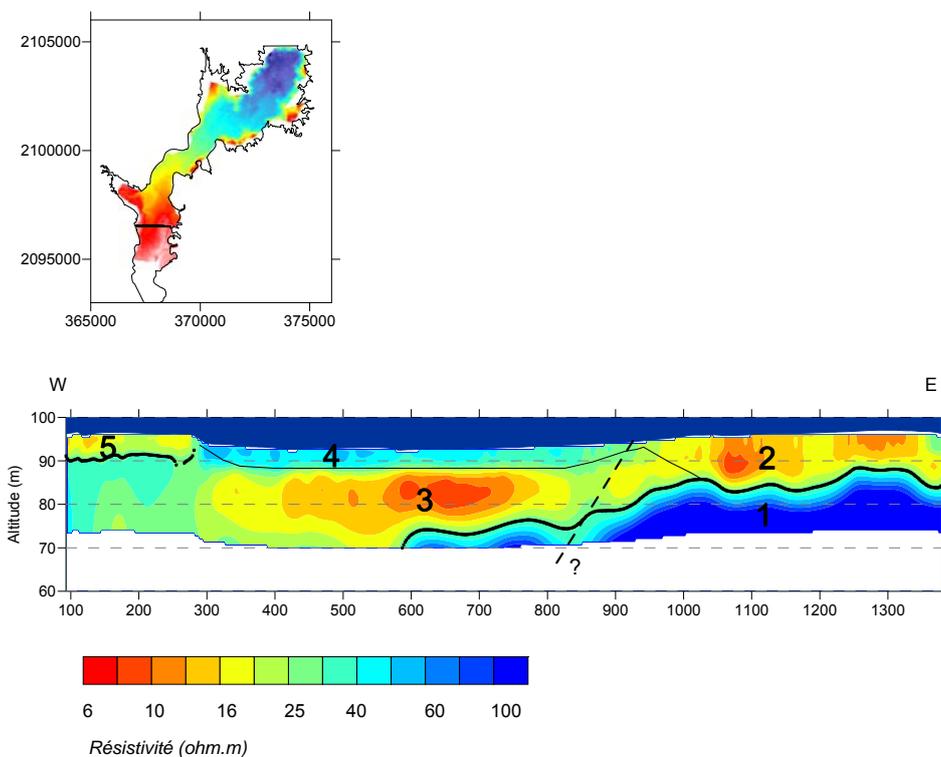


Figure 2 : Coupe de résistivité électrique interprétée. 1 : calcaire ; 2 : sédiments récents Margajita; 3 : sédiments anciens argileux conducteurs de la Yuna ; 4 : sédiments récents grossiers résistants de la Yuna ; 5 : sédiments anciens non érodés. Le trait noir épais correspond à l'interface pointée automatiquement à 25 ohm.m.

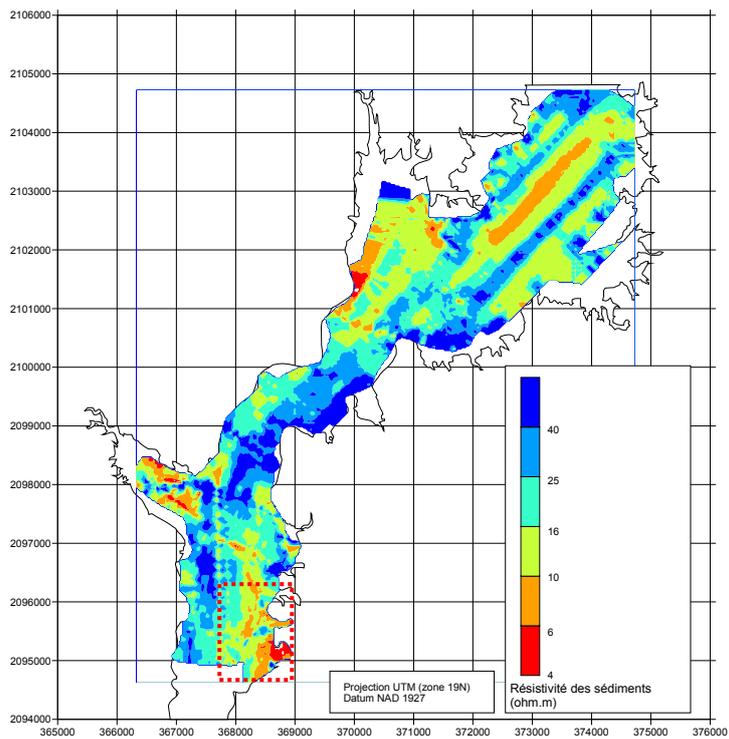


Figure 3 : Carte de résistivité du premier mètre des sédiments. Le rectangle en pointillé rouge correspond au levé de PP (voir figure 4)

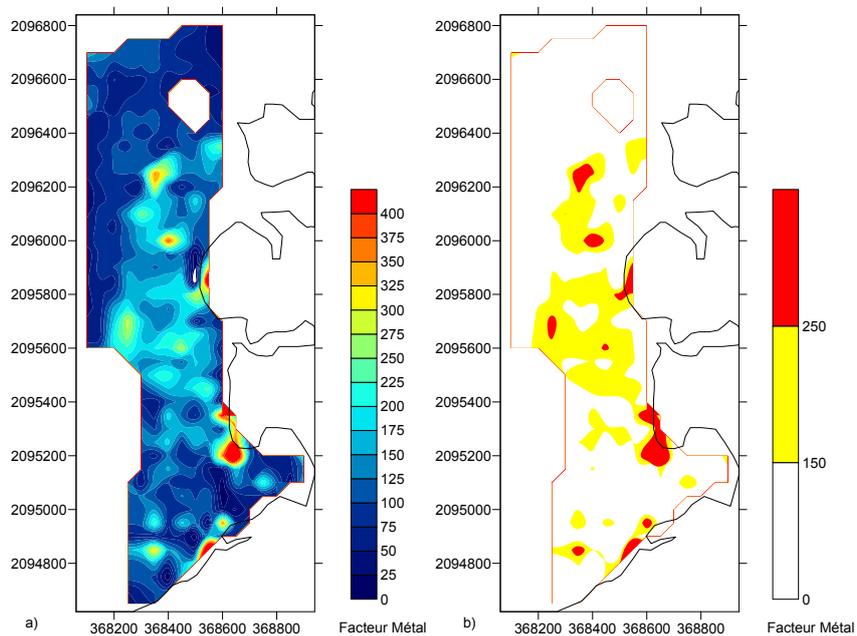


Figure 4 : Carte de facteur métal (à gauche) pour la profondeur 0 à 3 m dans les sédiments. Carte de métal seuillée (à droite).

Intégration de quatre méthodes géophysiques marines dans le but d'estimer les propriétés géotechniques des sols

Christian Hérisson¹, Aline McNeill¹, Philippe Gauthier¹, Benoit Caillet¹ et Daniela Taliana²

¹ Fugro France SAS, 39 rue des Peupliers, 92752 Nanterre Cedex - France

Email : c.herisson@fugro.com

² Fugro Oceansismica S.p.A., Viale Charles Lenormant 268, 00126 Rome - Italie

Abstract

Resistivity, Seismic Refraction, Multichannel Analysis of Surface Waves and Ultra High Resolution Seismic were successfully used offshore, at the same site, to characterize the stratigraphy from the seabed down to 130 m below seabed. The integrated interpretation of these datasets showed the presence of harder material outcropping at or near seabed, and the occurrence of palaeochannels.

Introduction

Comme en terrestre, le choix des techniques à mettre en œuvre lors d'un lever géophysique marin dépend essentiellement des objectifs recherchés. Afin de déterminer plus en détail la stratigraphie d'un site en mer, en vue de l'installation de tunnels de prise et rejet en mer, quatre techniques géophysiques ont été mises en œuvre : de la résistivité pour connaître la nature des sédiments superficiels, de la sismique réfraction et des ondes de surface pour étudier les 20 premiers mètres sous le fond marin et accéder aux vitesses de compression et de cisaillement du sol, et enfin, de la sismique réflexion ultra haute résolution, pour des informations plus en profondeur, jusqu'à 130 mètres sous le fond marin dans le cas de l'étude présentée.

Description des méthodes et de l'acquisition

La résistivité, qui peut être reliée aux propriétés du sol, telle que sa compaction, s'obtient en mesurant la différence de potentiel entre deux électrodes données, après injection d'un courant entre deux autres électrodes. La résistivité de l'eau doit aussi être mesurée ainsi que la hauteur d'eau pour le traitement des données acquises en milieu marin. L'acquisition des données de résistivité a été faite avec le système IRIS SYSCAL Pro Deep Marine, avec une flute draguée sur le fond, et – en parallèle sur certains profils - avec une flute flottante.

La sismique réfraction permet de mesurer les vitesses de compression v_p et les épaisseurs des couches associées à ces vitesses. Les ondes de surface, souvent considérées comme du bruit dans la plupart des levés sismiques, permettent d'accéder aux vitesses de cisaillement v_s , qui sont directement liées au module de cisaillement maximum G_0 , et donc à la dureté des sols. L'acquisition de la sismique réfraction et des ondes de surface se fait en utilisant le même dispositif : le GAMBAS® 50, développé par Fugro France SAS. Ce système comporte une flute avec 24 ou 48 hydrophones, qui est draguée sur le fond au moyen d'une luge (Figure 1). Un système de yoyo permet au dispositif de rester stationnaire lors du tir et de son enregistrement, alors que le bateau continue à avancer, assurant ainsi des données peu bruitées. Un profil continu des vitesses de compression ou des vitesses de cisaillement en fonction de la profondeur est ainsi obtenu. La géométrie du système (longueur de la flute, nombre d'hydrophones, énergie de la source) peut être définie en fonction des objectifs du projet. Dans le cas présent, une flute de 104 m de long, avec 48 hydrophones et un canon à air de 60 cu.in ont été utilisés pour la sismique réfraction, tandis qu'une flute de 47 m de long, avec 48 hydrophones et un canon à air de 60 cu.in. ont servi pour l'acquisition des ondes de surface. Ces dispositifs ont permis une pénétration de 20 m sous le fond marin.

La sismique réflexion ultra haute résolution a été réalisée au moyen d'une source de 10 cu.in. et d'une flute de 75 m de long, avec 24 groupes de 4 hydrophones chacun, soit un inter-trace de 3.125 m. La pénétration obtenue était d'environ 600 ms sous le fond, mais seulement les premiers 250 ms ont été utilisés pour l'étude présente.

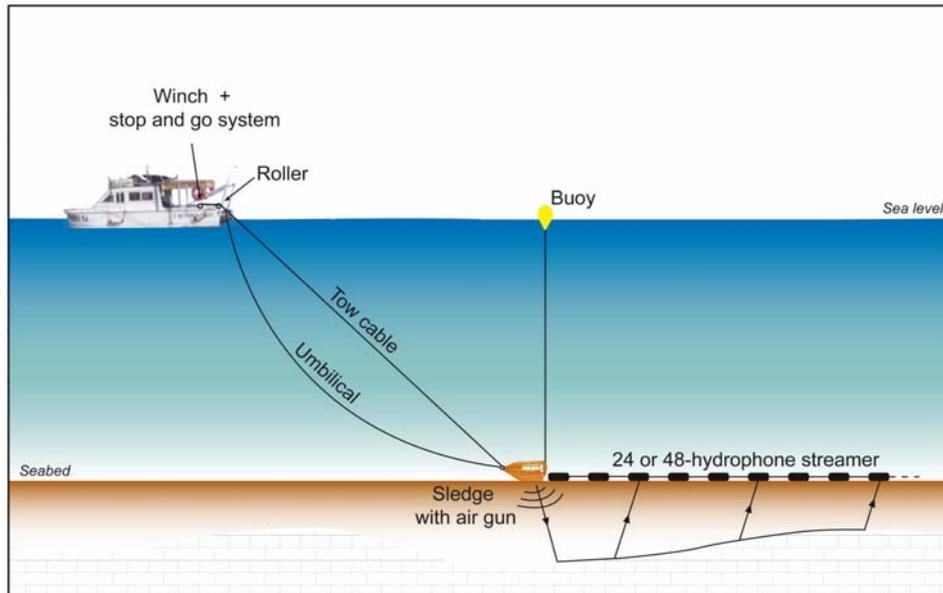


Figure 1 : Système GAMBAS® 50 pour l'acquisition de la sismique réfraction et des ondes de surface.

Traitement des données

Les données de résistivité de la flûte flottante ont été traitées à l'aide du logiciel IX1D, en contraignant la hauteur d'eau (enregistrée par un sondeur bathymétrique) et la résistivité de l'eau (supposée constante, égale à $0.285 \Omega.m$). La première couche de sédiments superficiels (Holocène), interprétée à partir de la sismique réfraction, a aussi été contrainte dans le modèle, permettant une inversion 1.5D au lieu de 1D. L'interpolation des résultats a ensuite été faite avec Surfer, permettant de réaliser des profils de résistivité flottante. La même approche ne pouvait pas être utilisée pour les données de résistivité de la flûte draguée, puisqu'avec une telle flûte il est nécessaire de corriger de la hauteur d'eau lorsque la profondeur d'eau est plus petite que la longueur de la flûte. Les résistivités apparentes acquises avec la flûte draguée ont donc été recalculées à partir d'un facteur géométrique qui prend en compte la hauteur d'eau et réduit les effets de l'air au dessus de la colonne d'eau. Pour éliminer l'influence de la résistivité de l'eau, des résistivités « strippées » (c'est-à-dire ne prenant pas en compte l'action de la colonne d'eau), ont ensuite été calculées, puis elles ont été normalisées par la résistivité de l'eau, donnant ainsi des Facteurs de Formation. Ces facteurs de formation ont enfin été présentés en pseudo-sections.

Le traitement de la sismique réfraction consiste à pointer les premières arrivées, puis à interpréter des courbes temps-distances (dromochroniques) avec la méthode des intercepts. Ce traitement est fait sous Starfix.Gambas, un logiciel développé par Fugro. Les résultats sont présentés sous forme d'histogramme, où pour chaque tir, les vitesses de compression sont distribuées en fonction de leur épaisseur.

Le traitement des ondes de surface se base sur la propriété dispersive de ces ondes : à une fréquence donnée, chaque train d'onde se déplace à une vitesse différente, appelée vitesse de phase. L'analyse fréquentielle des ondes de surfaces consiste à construire la courbe de dispersion (vitesse de phase en fonction de la fréquence), puis à inverser cette courbe pour établir un modèle de vitesse de cisaillement v_s en fonction de la profondeur (Park et al., 2000). Ce traitement a été fait grâce au logiciel SurfSeis v2.05, développé par le Kansas Geological Survey. Les profils de vitesse ainsi obtenus sont ensuite interpolés à l'aide du logiciel Surfer, pour présenter des profils continus en 2D.

La sismique réflexion ultra haute résolution a été traitée avec le logiciel Uniseis, développé par Fugro. La chaîne de traitement utilisée était classique, avec l'application de gain et filtres, la réduction des multiples, le pointé des vitesses, un stack, des filtrages dans les domaines F-X et F-K, et enfin une migration des données. Un traitement post-stack spécifique a aussi été appliqué aux données pour améliorer les hautes fréquences et plus particulièrement la résolution des premières 20 ms.

Résultats et conclusions

Les sédiments superficiels de l'Holocène ont été interprétés grâce à la sismique réfraction. Ils sont supposés correspondre aux vitesses de compression inférieures à 1580 m/s, ce qui suggérerait des argiles très molles, des argiles sableuses ou du sable argileux. Il y a en général un bon accord entre les profils de sismique réfraction et ceux des ondes de surface pour cette première couche, bien que les ondes de surface ont une faible résolution dans les premiers 1.5 m sous le fond. Cette zone de faible résolution est liée à la vitesse de phase et la fréquence du signal. La base de l'Holocène correspondrait à des vitesses de cisaillement inférieures à 180 m/s. En terme de résistivité, cela correspond à des valeurs moyennes de 0.38 Ω .m d'après les données de résistivité flottante et à des facteurs de formation entre 3 et 4 pour les données de résistivité de la flute draguée. La sismique réfraction permet de déterminer que les sédiments de l'Holocène ont une épaisseur variable, allant de 0 à 8.8 m dans la zone d'étude.

Sous l'Holocène, les sédiments du Crag sont présents. Seul le tiers ou la moitié de ces sédiments peut être caractérisé par la sismique réfraction ou les ondes de surface, puisque la pénétration de ces techniques dans le cas présent est de 20 m, et que le Crag est sensé avoir une épaisseur d'au moins 40 m dans la zone d'étude. Des vitesses de compression entre 1580 et 1900 m/s et des vitesses de cisaillement entre 180 et 550 m/s ont été trouvées pour le Crag. Ces vitesses représentent essentiellement du sable fin à grossier, qui peut être dense à très dense, parfois silteux ou argileux, et localement cimenté avec des graviers.

Localement, des vitesses élevées (v_p supérieures à 1800 m/s et v_s supérieures à 400 m/s) sont visibles près de la surface du fond marin (Figure 2). D'après la géologie locale, disponible sous cartes du British Geological Survey, elles correspondraient à des affleurements de Coralline Crag, qui sont des grès coquilliers à ciment calcaire relativement indurés. Le Coralline Crag est aussi visible sur les données de sismique réflexion haute résolution, puisqu'il présente une stratification entrecroisée. De fortes valeurs de résistivité (facteurs de formation jusqu'à 9) peuvent aussi être interprétées à ces endroits sur le fond marin.

Des vitesses de compression élevées ne correspondent pas toujours à des vitesses de cisaillement élevées (Figure 2, milieu de la ligne) ; cela peut s'expliquer par des variations dans la teneur en particules fines. L'augmentation de la teneur en argile dans une formation peut en effet diminuer les vitesses de cisaillement, sans affecter la compaction du matériel et donc sans changer les vitesses de compression.

Occasionnellement, des anomalies d'amplitude peu profondes ont été identifiées sur la sismique réflexion ultra haute résolution. Certaines peuvent correspondre à des lentilles de tourbe dans l'Holocène, d'autres sont probablement dues à la présence de sédiments plus grossiers à l'intérieur de paléo-chenaux. Ces anomalies peuvent être associées à des anomalies de faible vitesse de cisaillement et/ou à un épaissement de l'Holocène sur la sismique réfraction.

La sismique réflexion ultra haute résolution a permis de définir la stratigraphie détaillée du Crag jusqu'au Chalk, qui peut être considéré comme le socle du site étudié. Elle a notamment montré que le Crag comprenait un ensemble de surfaces d'érosion, dues aux variations glacio-eustatiques. Entre le Crag et le Chalk, les argiles du London Clay ont été mises en évidence ; elles sont caractérisées par de fortes amplitudes sismiques et des réflecteurs continus et parallèles.

Bibliographie

- British Geological Survey, geological map, sheet 191.
Park C., Miller R., Xia J. and Ivanov J., Kansas Geological Survey; (SEG 2000). Multichannel analysis of underwater surface waves near Vancouver, B.C., Canada

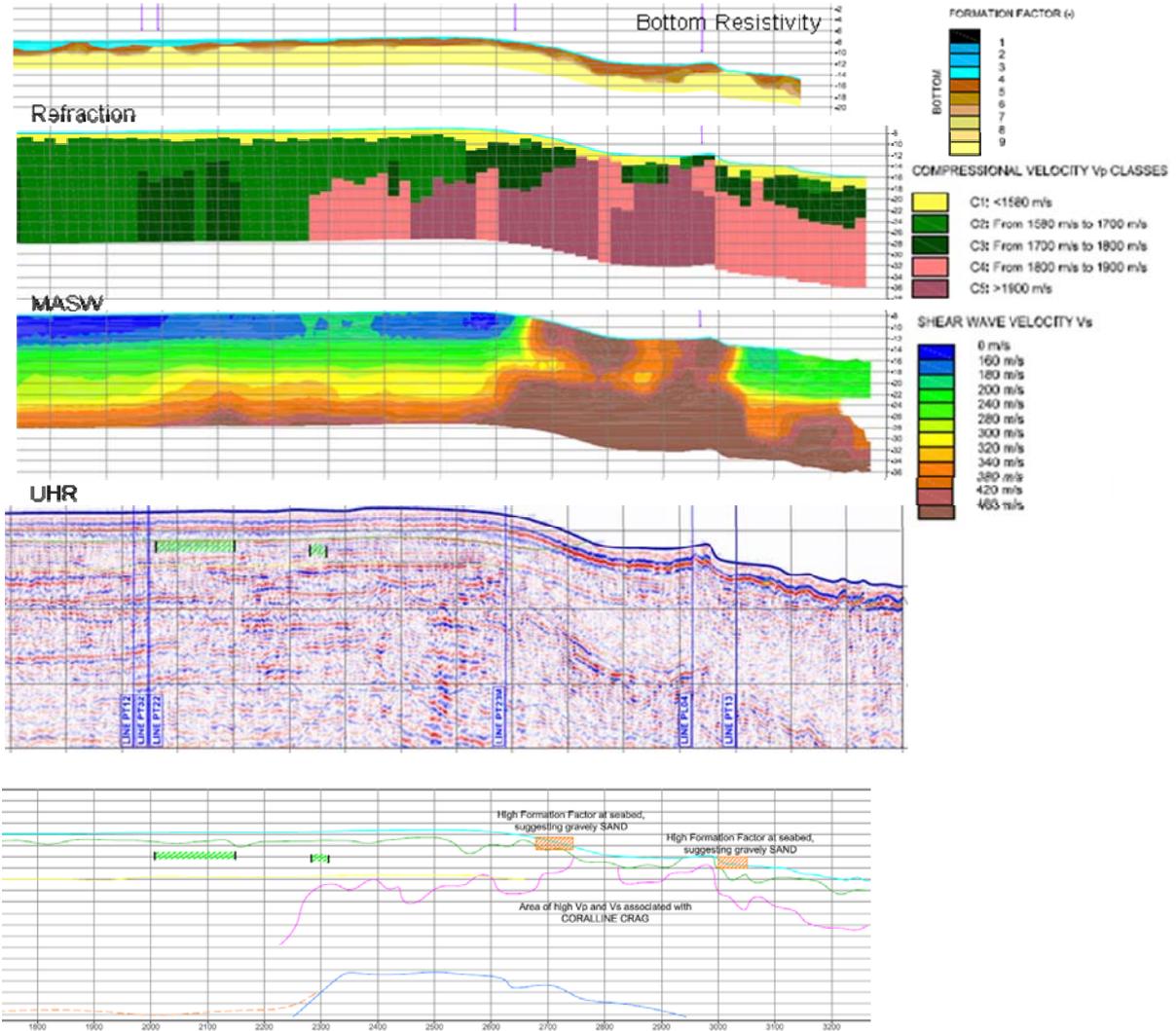


Figure 2 : Exemple de résultats le long d'une ligne, avec de haut en bas : le profil de résistivité de la flûte draguée, le profil de sismique réfraction, le profil d'analyse multiple des ondes de surface, le profil de sismique réflexion ultra haute résolution, et enfin la coupe interprétée (bleu clair = le fond marin ; vert = base de l'Holocène ; jaune = limite intra-Crag ; rose= toit du Coralline Crag ; bleu foncé= autre limite intra-Crag ; zones hachurées vertes= anomalies de sismique réflexion ; zones hachurées marrons= zones de forte résistivité sur le fond marin).

Mots clés : Résistivité, sismique, marin, anomalie, paléo-chenal

Prospection géophysique sous le Danube, Budapest, Hongrie

Jean-Claude Bernard, Pierre Frappin, Florence Renalier

EDG Européenne De Géophysique, RD 1085, N°3209, 38300 Nivolas-Vermelle.

jean-claude.bernard@geophy.eu; pierre.frappin@geophy.eu; florence.renalier@geophy.eu

Abstract

In the frame of the construction of the underground in Budapest, Hungary, five geophysical techniques (seismic refraction, electrical resistivity tomography, downhole seismics, electrical cylinder and spontaneous potential) were used for the investigation of the subsurface below the Danube River. The results allowed the delineation of the base of the alluvial layer and the location of geological vertical contacts for a safer design of the project.

Introduction

Cette étude réalisée en 2008, entre dans le cadre de la construction du métro de Budapest, en Hongrie. Le tracé de la ligne passe à faible profondeur sous le Danube, où la géologie est constituée d'une couche d'alluvions (graviers sableux/argileux), sur le substratum argilo marneux. Il s'agissait ici d'apporter des informations quant aux variations latérales de la géologie le long du tracé du projet, quant à la localisation d'éventuelles anomalies géologiques (fractures / failles), et quant à l'épaisseur de la couche d'alluvions. Dans ce but, cinq méthodes géophysiques ont été associées : trois méthodes en surface de sismique réfraction, tomographie électrique et polarisation spontanée, et deux méthodes en forages de sismique downhole et cylindre électrique® (Brevet EDG), utilisées pour caler l'interprétation des résultats des méthodes en surface.

Acquisition

Pour l'acquisition, les flûtes sismiques et électriques ont été coulées et lestées sur le fond du Danube grâce à l'utilisation d'un équipement approprié : deux bateaux de tailles différentes, dont l'un très facilement manoeuvrable, des enrouleurs et des câbles renforcés pour résister à la forte traction imposée, des lestés pour plaquer les flûtes sur le fond du fleuve (figure 2). La mise en place des dispositifs a été contrôlée au GPS différentiel. La localisation des différentes acquisitions est présentée sur la figure 1. Six profils sismiques ont été effectués avec 24 hydrophones espacés de 5 m (115 m de long). Un canon à air de 40 cu.inch a été utilisé pour générer les ondes sismiques en 7

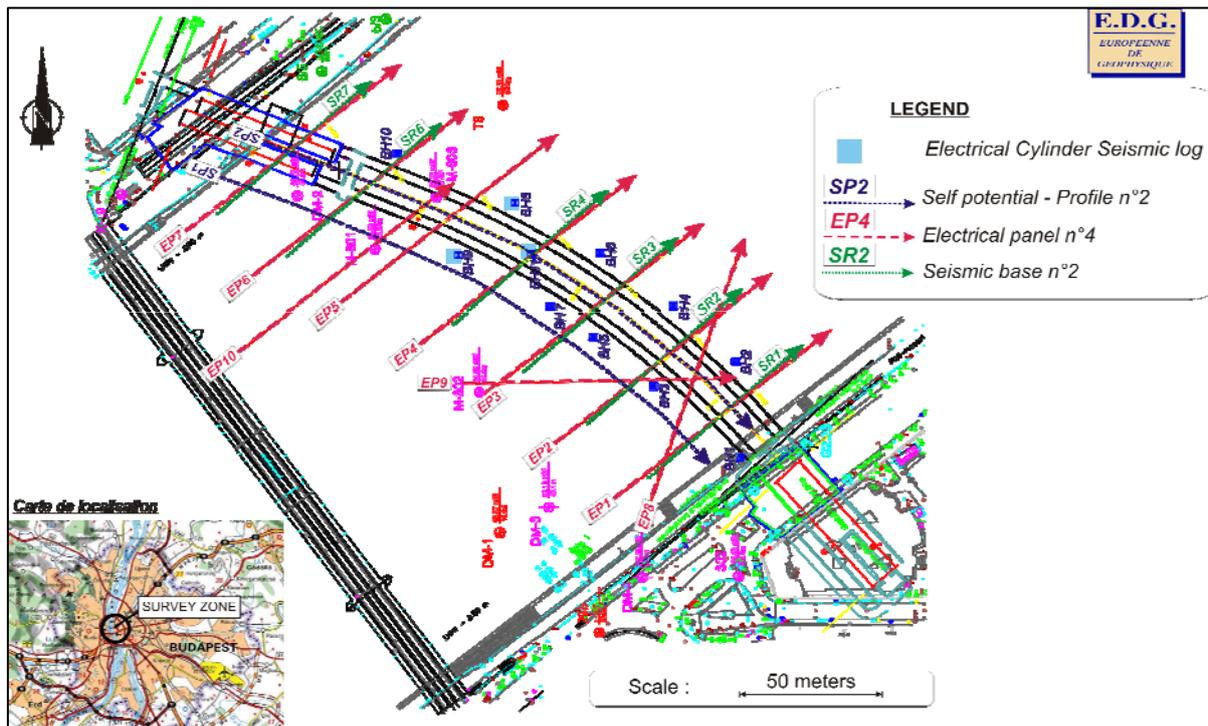


Figure 5 : Position des investigations géophysiques. Vert : sismique réfraction ; rose : résistivité électrique, bleu foncé : potentiel spontané, et bleu clair : techniques en forages (cylindre électrique et sismique downhole). Encart : Localisation de l'étude à Budapest, Hongrie.

points le long de chaque profil, le déclenchement de l'enregistrement se faisant par transmission radio. Le dispositif utilisé pour les 10 profils électriques (32 électrodes espacées de 5m) est semblable à un dispositif terrestre classique. Les deux profils de polarisation spontanée de 320 m de long ont été enregistrés grâce à une électrode déplacée à vitesse constante sur le fond du fleuve. Pour la sismique downhole, 12 hydrophones espacés de 1 m ont enregistré la propagation vertical des ondes le long de chaque forage. Celles-ci étaient générées par un coup de marteau sur un tube métallique placé sur toute la hauteur d'eau, en tête du forage. Enfin, les cylindres électriques ont été réalisés avec une flûte 32 électrodes espacées de 80 cm et un protocole de mesures spécifique.

Traitement des données

Les temps de première arrivée mesurés sur les profils sismiques ont été traités par la méthode du temps d'intercept et par la méthode ABC (délais) avec le logiciel WinSism® de WGeosoft. Les sections de résistivités apparentes, mesurées avec un protocole Schlumberger, ont été inversées avec Res2DInv®. Les résistivités apparentes des cylindres électriques ont été inversées avec CylInv®, qui utilise une inversion 3D prenant en compte la présence de terrain tout autour du forage. Enfin, la sismique downhole ainsi que les profils de polarisation spontanée ont été traités sous Excel®.

Résultats

La figure 3a présente les résultats obtenus sur le forage BH11 par la méthode du cylindre électrique (gauche), par sismique downhole (milieu), et par carottage (droite). Sur l'ensemble des 3 forages, trois couches peuvent être identifiées, synthétisées dans la figure 3b : le substratum argilo marneux, constitué d'une couche d'argiles sur une couche de marnes, est globalement caractérisé par des vitesses d'ondes P supérieures à 1700 m/s et des résistivités inférieures à 30 Ohm.m. Sur celui-ci,



Figure 6 : Acquisition des données a) en forage, b) de résistivité électrique, d) de sismique réfraction. c) Bateaux utilisés pour l'acquisition.

une couche superficielle d'alluvions (non visible dans le forage BH11 en figure 3a) est caractérisée par des vitesses de l'ordre de 1600 m/s et des résistivités généralement plus élevées que dans le substratum.

La figure 3c présente la synthèse des résultats des études sismique et électrique sur le profil 4. Les alluvions (vitesses sismiques inférieures à 1600 m/s, résistivités supérieures à 60 Ohm.m) se distinguent clairement du substratum argilo marneux sous jacent, qui présente des vitesses sismiques plus élevées (>1700 m/s) et des résistivités plus faibles (< 6 Ohm.m). Il n'est pas possible de distinguer à partir des mesures électriques en surface les deux couches internes au substratum argilo marneux observées sur les cylindres électriques. En effet, les mesures en surface intègrent les effets de ces couches successives de résistivités proches, tandis que les mesures en forage permettent de mesurer au sein même des formations. En revanche, les profils sismiques et électriques mettent en évidence des variations latérales et des structures verticales, comme sur la figure 3c. Certains d'entre eux montrent également une unité de résistivité intermédiaire (environ 30 Ohm.m) en profondeur (vers 20 m sous le fond de fleuve).

Enfin les profils de polarisation spontanée présentent des anomalies sur la moitié du fleuve côté rive gauche (non illustré). Elles sont liées d'une part à des variations d'épaisseur de sédiments et de hauteur d'eau, notamment près des rives, d'autre part à la présence de contacts géologiques sous les alluvions, associés à des sources d'eau.

Synthèse

La synthèse de l'ensemble des résultats (profils et sondages sismiques, profils et sondages électriques, polarisation spontanée) a permis de délimiter la surface de contact entre les alluvions et le

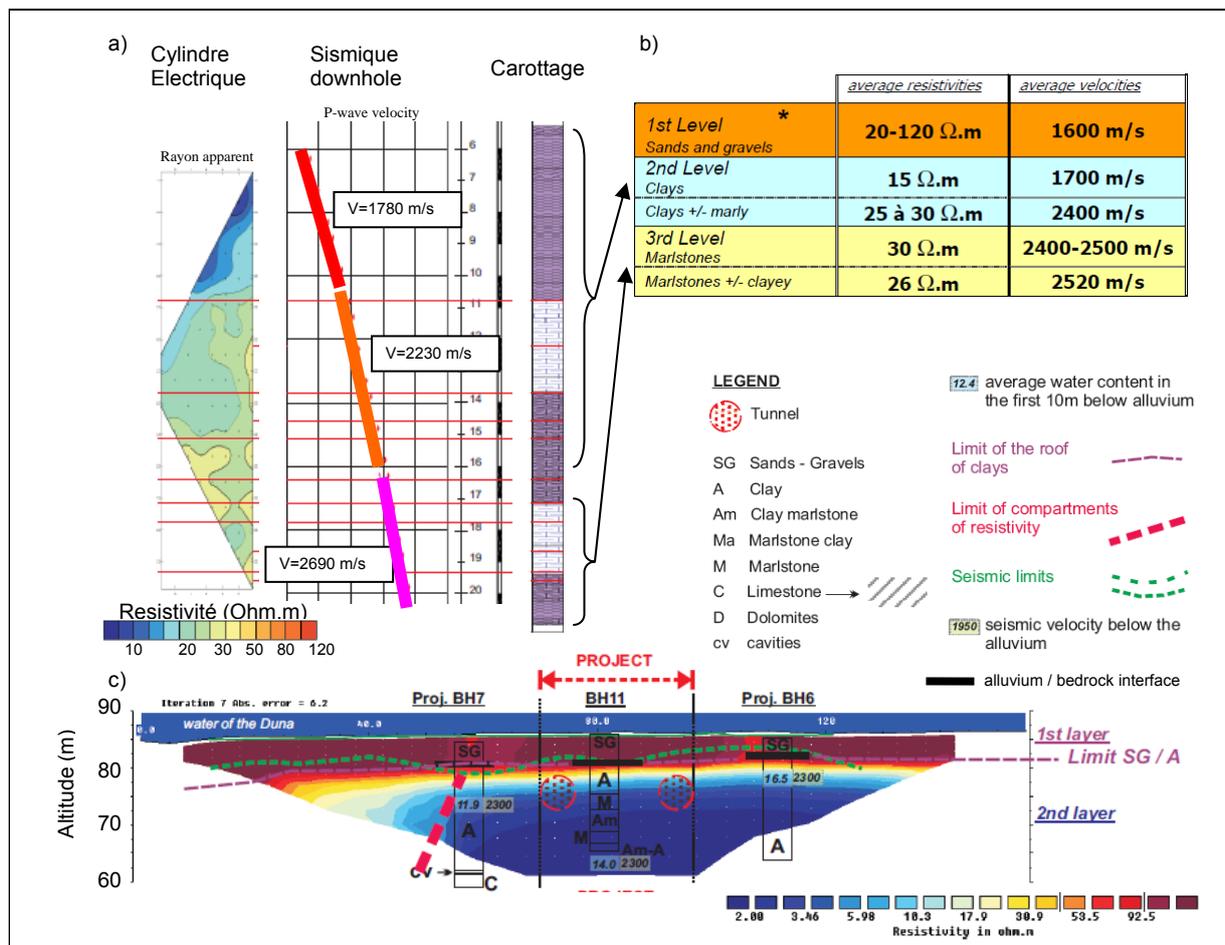


Figure 7 : a) Résultats obtenus sur le forage BH11 en cylindre électrique (gauche), sismique downhole (centre) et observations géotechniques (droite), b) synthèse des résultats obtenus en forage, c) synthèse des résultats obtenus en sismique et en électrique sur le profil 4.

substratum argilo marneux sur l'ensemble de la zone investiguée, ainsi que de définir le tracé de contacts verticaux entre unités géophysiques. Par comparaison avec les descriptions des forages positionnés sur les profils, l'erreur sur la position de l'interface entre alluvions et substratum a été estimée à 15 %. Sur la figure 4, cette interface a été placée entre 4 et 10 m de profondeur avec un point de vue conservateur, c'est-à-dire au plus profond possible en prenant en compte l'incertitude estimée. La position des contacts verticaux le long du tracé des deux voies du métro est également indiquée. Une zone critique a ainsi été mise en évidence, où la base des alluvions est très proche du toit du tunnel envisagé. Un des sondages à l'amont du projet montrait également un contact entre alluvions et substratum à une cote égale à celle du toit du tunnel. Des sondages implantés judicieusement grâce à l'étude géophysique ont finalement montré qu'au niveau de cette zone critique du projet, l'interface se situait 1 m au-dessus du profil envisagé. A l'heure actuelle, le métro de Budapest est terminé et le creusement des voies le long du nouveau tracé s'est effectué sans encombre.

Conclusions

Cinq techniques géophysiques adaptées à des conditions fluviales (sismique réfraction, tomographie électrique, sismique downhole, cylindre électrique et polarisation spontanée) ont été associées pour étudier la sub-surface sous le Danube au niveau du tracé du métro de Budapest. Les résultats géophysiques, associés à la description géologique des forages, ont permis de positionner en profondeur l'interface entre alluvions et substratum argilo marneux et de mettre en évidence des variations latérales délimitées par des contacts pseudo verticaux. Ces informations ont ensuite été utilisées pour positionner des sondages additionnels qui ont confirmé et précisé ponctuellement les résultats.

Mots clefs : traversée sous fleuve, sismique réfraction, tomographie électrique, cylindre électrique, sismique downhole, polarisation spontanée.

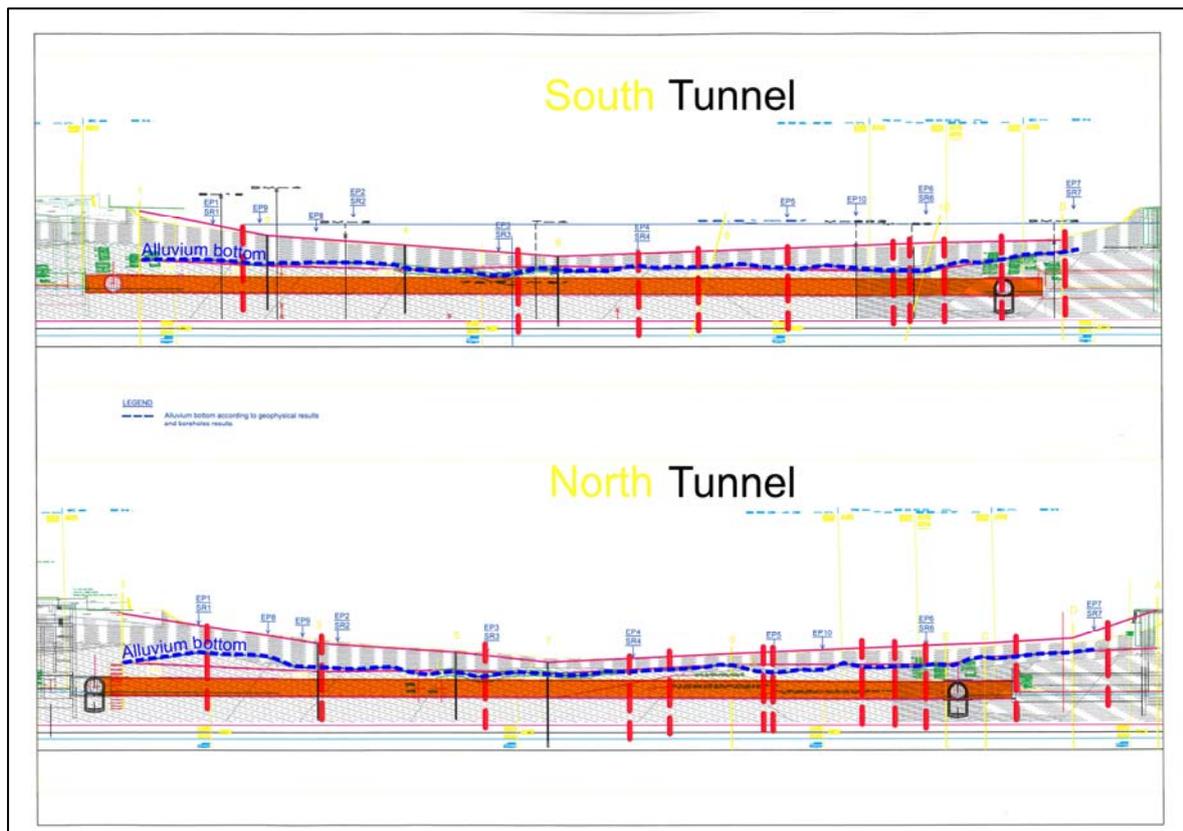


Figure 8 : Interprétation conservatrice de la position de la base des alluvions à partir de la synthèse des résultats.

Construction du nouveau pont du Larivot en Guyane

Localisation du substratum rocheux par géophysique

Raphaël Bénot, Magali Jouas, Jean-François Mahé, Denis Rolland
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc

A la demande du Service de Maîtrise d'Ouvrage de la Direction Départementale de l'Équipement de Guyane (973), le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc est intervenu, du 8 au 18 mars 2010, dans le cadre du projet de reconstruction du pont du Larivot situé à l'ouest de Cayenne, en GUYANE (973).

L'objet de la commande était de déterminer la profondeur du substratum rocheux par reconnaissance géophysique au niveau des culées de l'ouvrage, en rives droite et gauche du fleuve Cayenne.

Contexte

La zone d'emprise du projet se situe de part et d'autre de la route nationale 1 dans la mangrove, sur une bande de 50 m de large et 400 m de long en rive droite, et 100 m de long en rive gauche.



Figure n°1, 2 et 3 : Localisation de la Zone d'étude

Les conditions de prospection étaient particulières puisque les mesures ont été réalisées en grande partie dans la mangrove en bordure du fleuve. L'invention sur le terrain était, donc, assez difficile avec une progression très ralentie par la vase. A cela s'ajoutait une contrainte de temps imposée par la marée : il fallait, en effet, disposer les dispositifs sismiques et réaliser les tirs dans un intervalle de temps relativement court avant la marée montante. Autre contrainte, la réalisation des tirs sur la route, principale voie d'accès entre Cayenne et Kourou, qu'il fallait organiser et coordonner avec l'interruption du trafic.



Figure n°4 et 5 : implantation dans la mangrove

D'après la carte géologique au 1/100 000e de l'Institut français d'Amérique Tropicale, le substratum de la zone d'étude est constitué de roches éruptives et cristallines, de la famille des granites (diorites) avec des passages de quartzites, en rive droite, côté Cayenne et de granites à tendance pegmatite en rive gauche sous un recouvrement d'alluvions marines et fluvio-marines et d'éluvions latéritiques et argilo-latéritiques.

La sismique réfraction a été proposée compte-tenu de l'objectif (reconnaissance du toit du rocher) et du contexte géologique (vitesses sismiques croissantes). Sur certains profils sismiques (hors zone humide), nous avons proposé un complément par de la tomographie de résistivité électrique.

La sismique réfraction

Le matériel d'acquisition utilisé pour l'étude est un enregistreur Terralog ABEM 24 voies raccordé à deux flûtes sismiques équipées de 24 capteurs (4,5 Hz), espacés de 10 m pour les investigations en rive droite et de 5 m en rive gauche (pour tenir compte des profondeurs d'investigation plus importantes en rive droite estimées entre 40 et 50 m).

Sur quatre dispositifs, trois ont été implantés dans la mangrove en suivant les layons tracés perpendiculairement au fleuve, sur 315 m en rive droite et 165 m en rive gauche, avec des tirs en bout et en offset réalisés à l'explosif (0,4 Kg en offset et 0,2 Kg en direct). Le quatrième dispositif a été réalisé en bord de route (voir Figure n°6). Le pointé et le traitement des données ont été effectués avec le logiciel « SISMIC » (LRPC Saint-Brieuc/LCPC).



Figure n°6 et 7 : mise en place d'un dispositif sismique

L'imagerie de tomographie électrique

Le matériel utilisé pour cette étude est un système multi-électrodes SAS4000 composé d'une unité d'acquisition « Terrameter » et 4 câbles de 16 électrodes (64 électrodes) avec un espacement entre électrodes de 5 m pour un linéaire de 315 m par dispositif pour la rive droite, réduit à 165 m par dispositif en rive gauche. Les mesures ont été réalisées en tenant compte de l'objectif à atteindre, mais aussi de la géométrie des layons et de la place disponible pour permettre la mise en place des dispositifs. Les données de résistivité apparente ont été traitées, puis inversées par les logiciels RES2DINV et X2IPI.



Figure n°8 et 9 : mise en place d'un dispositif électrique

En préalable, plusieurs protocoles de mesure ont été testés sur site comme le Schlumberger, le Wenner, le pole-dipole. Compte-tenu du type de sol en surface, très conducteur et hétérogène, surtout en rive droite (remblai de latérite, sur des horizons vaseux), les mesures étaient très perturbées et les profondeurs d'investigation limitées. Après traitement et examen des profils de résistivité obtenus après inversion, le protocole retenu dans le cadre de l'étude est le Wenner, plus adapté du fait d'une lithologie très variable en surface. Quatre profils de résistivité ont été réalisés, deux sur chaque rive, de part et d'autre de l'ouvrage. Deux profils sont implantés sur les profils sismiques (profils 1 en rive droite et 4 en rive gauche).

Les profils de mesure, en sismique et en tomographie de résistivité électrique, ont été repérés par GPS lorsque le couvert végétal le permettait.

Synthèse des mesures

Quatre sondages destructifs, avec enregistrement de paramètres, effectués de part et d'autre du fleuve, ont permis d'affiner l'interprétation des profils sismiques et électriques. Du fait des difficultés de déplacement et d'accès, ils ont été réalisés à l'extérieur de la mangrove sur la route départementale, et malheureusement en dehors de la plupart des profils de mesure.

Résultats en rive droite

L'interprétation des coupes sismiques met en évidence trois couches de vitesse de l'ordre de 400 m/s, 1500 m/s et 5500 m/s, correspondant respectivement à l'horizon de surface, un horizon de vase et d'altération et le substratum rocheux qui apparaît entre 30 et 40 m de profondeur. Sur un seul profil apparaît une troisième interface a priori entre la vase et l'altérite.

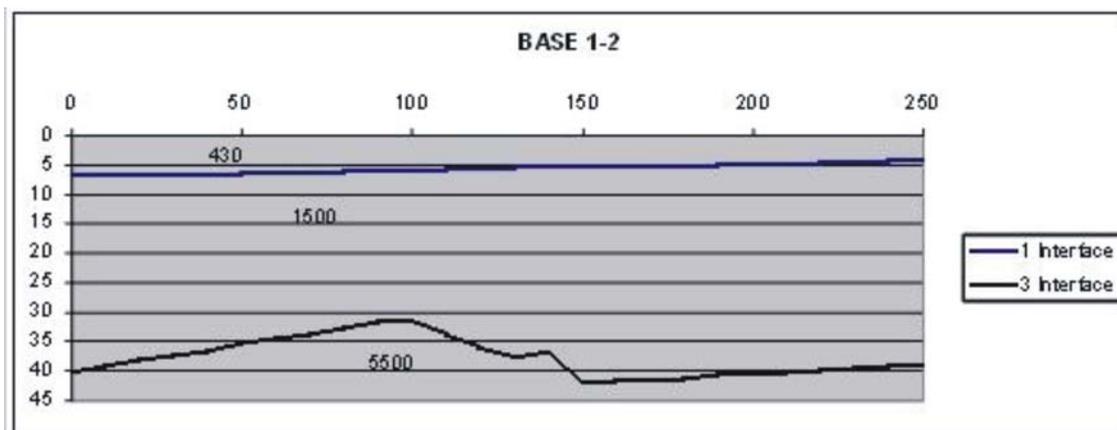


Figure n° 10: interprétation sismique

L'imagerie de tomographie électrique a mis en évidence une couche de matériaux meubles de faible résistivité ($<100 \Omega.m$) d'une épaisseur variable pouvant dépasser les 30 m. Les sondages géotechniques montrent qu'elle correspond aux formations de vase et d'altération. Le substratum n'a été que ponctuellement atteint (résistivité $>100 \Omega.m$), et lorsqu'il se situe à une profondeur inférieure à 20 m.

Compte-tenu des matériaux de surface, très hétérogènes et très conducteurs, il est difficile de se caler sur un modèle de répartition des résistivités après inversion et les résultats obtenus sont à relativiser. A défaut, de donner une coupe précise du sous-sol, le modèle apporte une vue approchée de sa géométrie.

Résultats en rive gauche

De même qu'en rive droite, il apparaît trois horizons lithologiques avec des vitesses moyennes de 400 m/s, 1550 m/s et de 6000 m/s pour le substratum rocheux qui se situe à une profondeur variant de 12 à 20 m.

Les profils obtenus par tomographie électrique montrent des valeurs de résistivité, après inversion, similaires à celles de la rive droite. Il apparaît, en plus, un horizon de résistivité élevée (matériau de remblai) en surface, de 4 mètres d'épaisseur, sur une partie des profils.

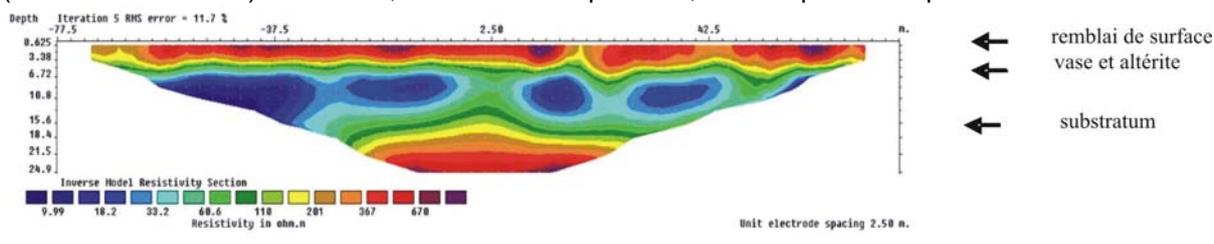


Figure n° 11 : coupe de résistivités vraies – modèle obtenu après inversion (profil n°3, rive gauche)

En rive gauche, il apparaît une bonne corrélation entre les résultats en sismique et en électrique : les deux méthodes trouvent le substratum à environ 12-13 mètres de profondeur (base 5-6 et profil électrique n°4).

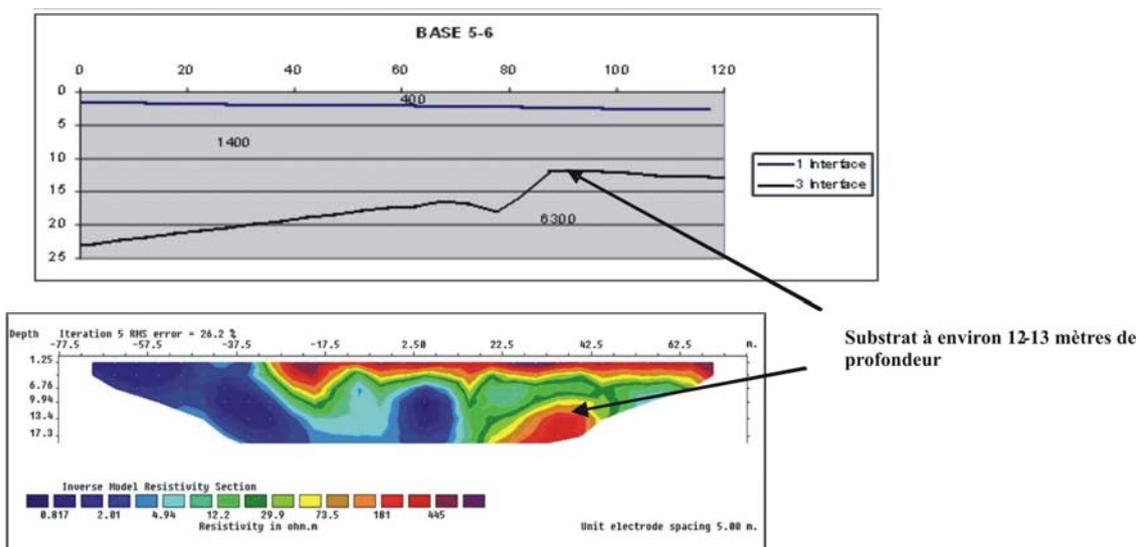


Figure n°12 et 13 : coupe des résistivités après inversion n°4 et base sismique 5-6

Les deux profils précédents, sismique et électrique, sont implantés au même endroit, en partie sur la mangrove et sur le remblai. Le substratum apparaît en sismique comme en électrique à environ 90 m du début des profils.

Conclusion

La particularité de cette étude réside avant tout dans les conditions inhabituelles et difficiles de prospection. En effet, la mangrove est très difficile à pénétrer, surtout avec du matériel sismique, malgré les layons sommairement tracés (machette). A cela, se rajoute la contrainte de temps, liée à la marée qui vient recouvrir la zone, et à la synchronisation avec l'arrêt de la circulation pour permettre les tirs.

Malgré cela, la profondeur du substratum a pu être déterminée à partir de 30 m en rive droite et 12 m en rive gauche, en corrélation avec les sondages.

Il y a en fait peu de données sur la géologie (stratigraphie et structurale), au niveau de la zone d'étude. Le recouvrement de formations sédimentaires masque le substratum sur toute la zone d'emprise du projet. En rive droite, la carte géologique apporte quelques informations ponctuelles, mais en dehors du projet à l'est.

La géophysique couplée aux sondages géotechniques a apporté quelques précisions sur la géologie du site. Les données mériteraient, cependant, d'être complétées par des profils transversaux (parallèles aux fleuves). Mais cela nécessiterait une organisation assez lourde comme de couper la route et d'aménager un remblai d'accès dans la mangrove.

Evaluation des volumes de sédiments à extraire dans le fleuve Charente

Nikodic Jean, j.nikodic@calligee.fr - Borne Viviane, v.borne@calligee.fr - CALLIGEE - Atlanpole - 1, rue de la Noë - BP82118 - 44321 NANTES CEDEX 3

Mouquet Alain, Legrand Erwan, amt@mesuris.com - MESURIS - Edonia B - Rue de la Terre Victoria - 35760 SAINT-GREGOIRE

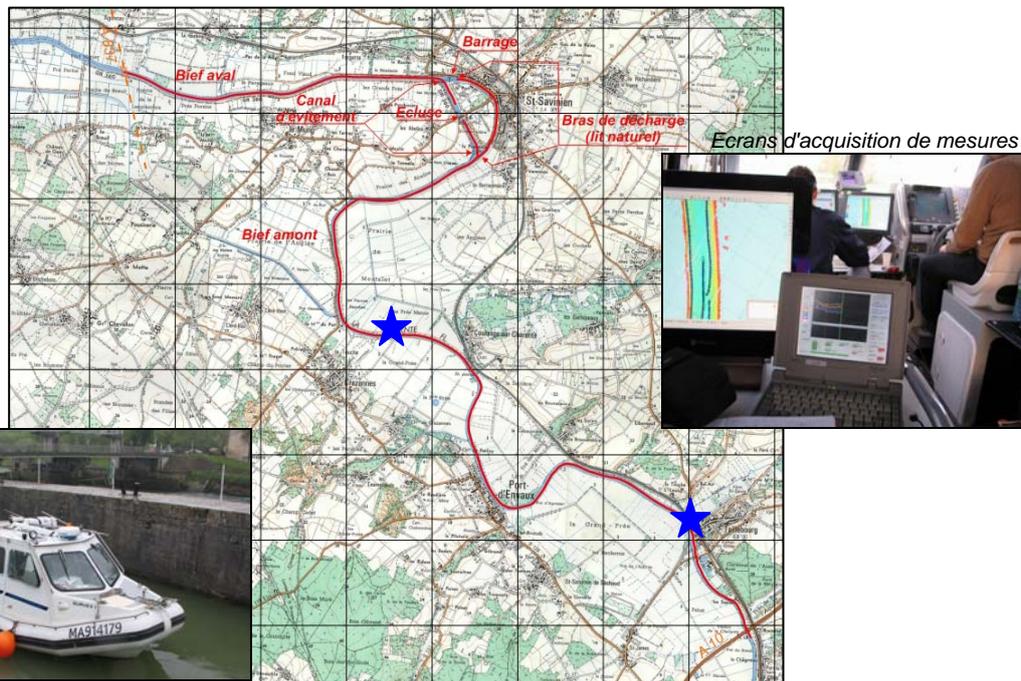
Walker Patrice, walker@creocean.fr - CREOCEAN - Zone Technocéan - Chef de Baie - Rue Charles Tellier - 17000 LA ROCHELLE

The association of various prospecting methods: bathymetry and geophysical measurements seismic and electric, responds effectively to the sediment volume evaluation. When the seismic method is not adapted, the electrical prospecting gives an alternative solution to penetrate in organic sediments and allows the recognition of the substratum's bottom under sand and mud.

Contexte de l'étude

Le barrage de Saint-Savinien, édifié sur la Charente à la fin des années 1960, permet la régulation du niveau d'eau mais sa construction a entraîné un envasement conséquent de part et d'autre de l'ouvrage. L'*Institution interdépartementale pour l'aménagement du fleuve Charente et de ses affluents* a souhaité connaître les volumes des sédiments à extraire. Pour préciser la géométrie actuelle du lit du fleuve entre les ponts autoroutiers de l'A10 et de l'A837 (communes de TAILLEBOURG, PORT-D'ENVAUX, CRAZANNES, SAINT-SAVINIEN et LE MUNG (17), soit 16 km, différentes méthodes ont été mises en oeuvre :

- reconnaissance bathymétrique surfacique réalisée par MESURIS BATHYMETRIE à bord du navire Survex 1 ;
- reconnaissance des caractéristiques du sous-sol par sismique réflexion (CREOCEAN) ;
- profilage électrique aquatique continu à l'aide du résistivimètre TEA 42 (CALLIGEE).



Vedette Survex 1 - Ecluse de Saint-Savinien

La vallée de la Charente est ménagée sur une assise calcaire dont les coteaux la dominent nettement (30 à 35 m NGF). En raison de la proximité de l'estuaire, elle est entièrement colmatée par des alluvions modernes sur lesquelles se développent de larges et basses prairies (altitude 3 m NGF). Le fond de la vallée est recouvert par des limons gris à bruns plus ou moins sableux, d'origine continentale. Ils surmontent les alluvions flamandaises appelées "Bri" : argiles bleues déposées dans un contexte marin, avec des épaisseurs très variables (de 0.5 à 30 m). Elles recouvrent le plus souvent le substratum crétacé mais elle repose localement sur une couche de sables et graviers.

Résultats

Sismique réflexion

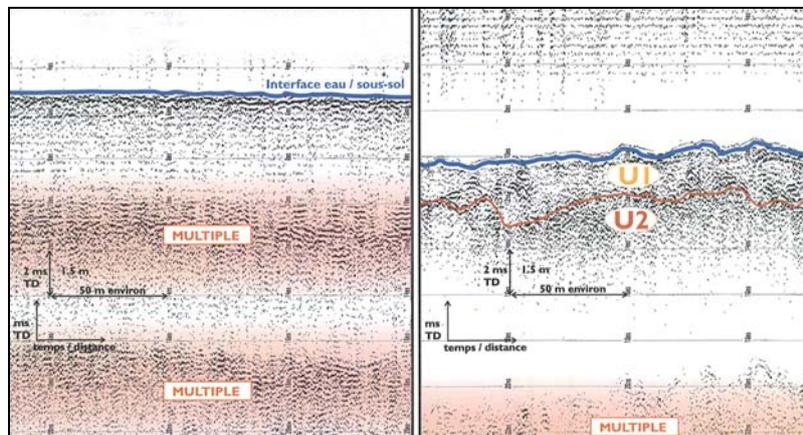
Le matériel utilisé pour cette reconnaissance était un boomer IKB Seistec de haute résolution. L'appareil, un catamaran de 2.5 m de long, était équipé d'une source (énergie de 50 ou 150 J, cadence de tir fixée par l'opérateur) et d'une chaîne d'hydrophones installés verticalement au sein d'un concentrateur de forme conique. La géométrie du dispositif présente plusieurs avantages :

- le caractère fixe du système allié à la faible distance entre la source et les récepteurs permet une très haute résolution verticale (précision de l'ordre de 0.25 m) et offre la possibilité de travailler par faibles profondeurs d'eau ;
- la directivité verticale de l'équipement limite la réception des signaux réfléchis latéralement et assure ainsi un meilleur rapport signal/bruit.

Les signaux sismiques analogiques sont numérisés par une centrale d'acquisition de type Delph 1 qui reçoit en simultané les données de position issues de la centrale de navigation. Le logiciel Delph permet un contrôle en temps réel de la qualité des données par visualisation du spectre du signal et tracé graphique à l'écran des informations. Un traitement du signal (application de gains, filtrage, sommation) permet par ailleurs d'améliorer la qualité du signal enregistré par augmentation du rapport signal/bruit.

Malheureusement, sur la quasi-totalité des profils réalisés, l'information récoltée ne concernait que la partie superficielle du sous-sol avec un échantillonnage vertical n'excédant pas 1 ms temps double sous l'interface eau/sous-sol (soit 0,75 m de pénétration avec comme hypothèse une vitesse de propagation du son dans le sous-sol de l'ordre de 1 500 m/s). Malgré différents réglages, il n'a pas été possible d'améliorer la pénétration verticale du signal acoustique. La très faible pénétration du signal est donc très probablement rattachée à la nature du sous-sol et à la présence de nombreuses poches de gaz issues de la décomposition de matière organique.

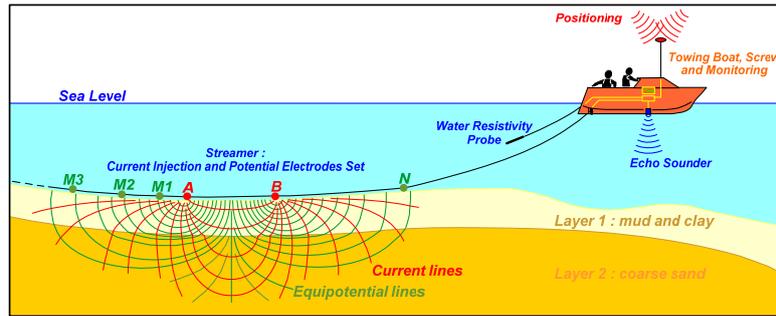
Toutefois, en amont de Port d'Envaux, une meilleure pénétration du signal acoustique est observée et reflète la présence de formations géologiques de nature différente de celles qui caractérisent la partie plus aval de la Charente. Deux unités acoustiques sont distinguées : une unité sommitale (U1) caractérisée par un faciès acoustique transparent dont l'épaisseur est en moyenne de 2 m et une unité basale (U2) au faciès acoustique plus chaotique.



En raison des caractéristiques du site et du caractère inadapté de l'outil sismique pour appréhender les paramètres du sous-sol, la prospection initialement prévue en sismique a été réalisée en électrique.

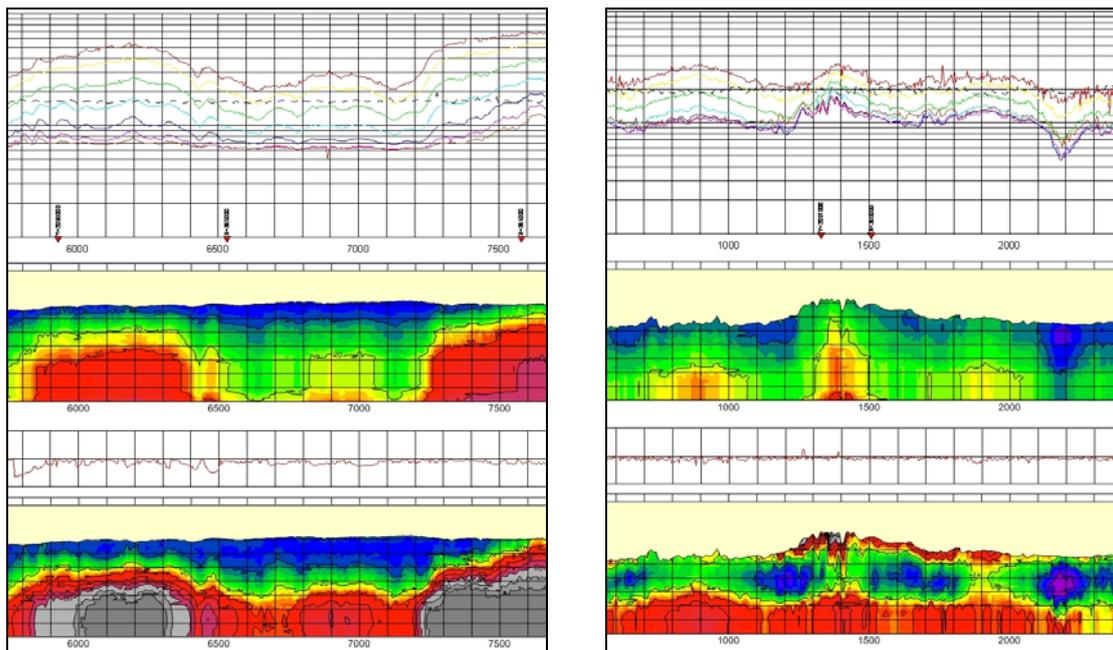
Trainé électrique aquatique (TEA)

La prospection électrique par courant continu en site aquatique est semblable à celle pratiquée à terre (méthode du traîné électrique). Elle consiste à injecter du courant de basse fréquence entre deux électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel entre deux autres électrodes M et N. Le dispositif de mesure est figé et comprend actuellement sept paires d'électrodes MN espacées en progression géométrique sur une longueur de 20 m, 100 m et 200 m. Les mesures se font à partir d'un bateau remorquant un câble souple multiconducteur reposant à l'interface eau/sédiment, et qui supporte l'ensemble des électrodes d'injection et de réception.



Les mesures s'affichent directement sur l'écran, permettant de suivre l'évolution de la résistivité apparente sur chacune des flûtes, la résistivité de l'eau et la hauteur d'eau. Le traitement des données est effectué *a posteriori* par le logiciel ZOHDYAQ, mis au point par le LCPC et développé par CALLIGEE. La méthode consiste à ré-échantillonner le signal puis à reconstituer un profil de résistivité modifié itérativement (épaisseurs et résistivités vraies) jusqu'à obtention d'un facteur de qualité inférieur à un seuil paramétrable; il est possible ensuite de construire des coupes complètes à l'aide des mesures pour lesquelles une convergence suffisante a été constatée.

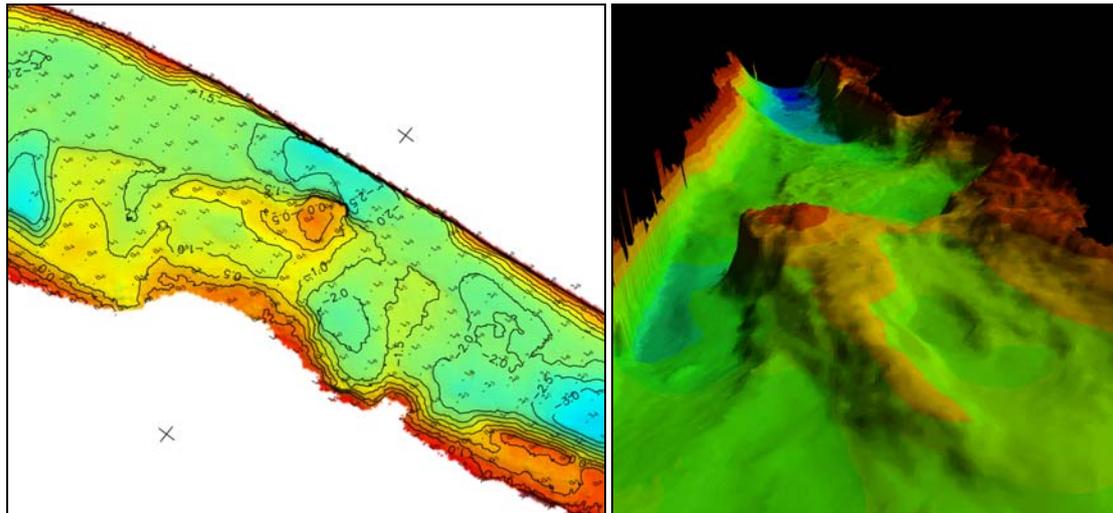
La modélisation consiste en une inversion, et comme toute méthode électrique, requiert cependant le respect de l'**hypothèse de tabularité des terrains (topographie plane, pas de pendage des couches, pas de discontinuités ou failles)**. Cette phase, de calcul n'est pas toujours pertinente si l'on ne dispose pas d'un calage (log de sondage destructif par exemple).



Profils de résistivités : en haut, résistivités apparentes sur les 7 capteurs, au milieu tomographie (profondeurs arbitrairement octroyées en fonction de la géométrie des quadripôles), en bas modélisation Zohdy.

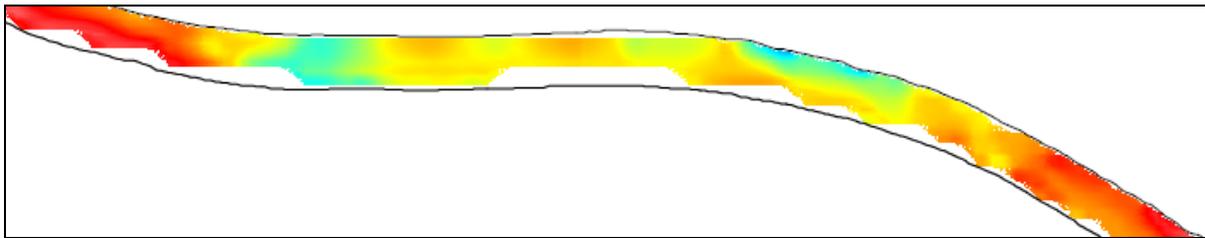
Le profil électrique de gauche a été réalisé sur un endroit où le profil sismique montrait une "zone sourde". La topographie est relativement plane. Les résistivités sont très faibles en surface (6 ohms.m) sur environ 2 m et correspondraient à de vases molles et organiques. Les résistivités augmentent ensuite régulièrement avec la profondeur pour atteindre 40 à 50 ohms.m représentant des sables et graviers.

Le profil de droite a été réalisé en aval du pont de Taillebourg. La topographie est plus accentuée (cf. figures suivantes), les valeurs de résistivités sont plus élevées et plus resserrées, entre 20 et 30 ohms.m. L'interprétation indique la présence de terrains résistants (graviers, blocs calcaires ?) surmontant un horizon plus conducteur (argiles), avant d'atteindre un substratum résistant. Il s'agirait d'un ancien gué romain.



Bathymétrie et vue 3D au niveau du gué romain

Les résultats de la modélisation ont été secondairement traités afin d'en extraire, en fixant des résistivités "pilotes", la position estimée des interfaces sédiment/substratum et substratum altéré/sain. Ces données ont ensuite été traduites sous forme de cartes isopaques de sédiments, permettant de calculer les volumes à extraire.



Conclusion

La prospection géophysique électrique a permis d'obtenir des informations dans un contexte très défavorable aux méthodes sismiques. Elle aboutit à une estimation de la position du toit du substratum calcaire et de distinguer les différentes natures du colmatage détritique récent : argiles organiques molles, matériaux sablo-graveleux, cailloutis et blocs.

Références

- WALKER P. (2005)** - CREOCEAN - Reconnaissance acoustique par sismique réflexion le long de la Charente. 5 p.
- Dubois F. Legrand E. (2005)** - MESURIS BATHYMETRIE - MNT différentiel et épaisseurs de sédiments Saint-Savinien. 8 plans
- Mouquet Th. Legrand E. (2010)** - MESURIS BATHYMETRIE - La Charente de l'écluse de Saint-Savinien à l'A 10 - Plans détaillés. 5 plans
- Mouquet Th. Legrand E. (2010)** - MESURIS BATHYMETRIE - La Charente de l'écluse de Saint-Savinien à l'A 10 - Plans différentiels. 5 plans
- Nikodic J. TRANCART G. (2005)** - Reconnaissance géophysique par T.E.A. Biefs amont et aval de l'Ecluse de Saint-Savinien. Rapport Calligée, 31 pages, 12 figures.

Mots clés

Sismique réflexion, sondeur de sédiment, traîné électrique aquatique, modélisation Zohdy, épaisseur de sédiments, dévasement

Suivi d'érosion interne d'une digue expérimentale en terre par monitoring de polarisation spontanée

Alexandre Bolève

Fugro Géotechnique, 34 allée d'Aiguebelette, 73375 Le Bourget-du-Lac, a.boleve@fugro.com

Abstract. Investigation of dams and embankments in terms of leakage detection is an important issue for safety and economic reasons. We propose here to present some results of one week self-potential monitoring applied to an experimental earth dam located in Holland. Goal of this study was to test self-potential technique effectiveness on dam's failure prevention.

Résumé. La surveillance des digues et des barrages en termes de détection de zones de fuites est un défis majeur dont l'enjeu est de permettre une meilleure connaissance de l'évolution temporelle de l'état de ces ouvrages afin d'anticiper leurs éventuelles ruptures, source de dégâts importants. C'est la raison pour laquelle de nombreux projets nationaux et internationaux ont vu le jour sur cette thématique et plus particulièrement le projet Hollandais IJKDIJK qui proposait de mettre à l'étude le phénomène d'érosion interne sur des digues expérimentales, instrumentées, à l'échelle 1 :1 et vouées à la rupture. Nous proposons ici de présenter les résultats issus d'un monitoring d'une semaine de potentiel spontané sur l'une de ces digues, de la mise en charge de l'ouvrage à son effondrement. L'objectif de cette étude est de montrer, d'une part l'efficacité de la polarisation spontanée pour la détection des écoulements préférentiels et d'autre part l'intérêt de la mise en œuvre d'un tel dispositif pour la surveillance des digues et la prévention d'éventuelles ruptures.

1. La méthode de polarisation spontanée

La polarisation spontanée est une méthode électrique passive qui consiste à mesurer en surface ou en forage le potentiel électrique naturel émit par le sous-sol. De l'ordre de la dizaine à la centaine de millivolt, ce potentiel électrique peut être généré par différentes sources de courant dont les deux principales sont l'oxydoréduction et l'électrofiltration. Dans le cadre de recherche d'écoulement préférentiel en milieu poreux, se sont les signaux d'électrofiltration qui seront recherchés. L'origine de ces signaux se situe à la surface des grains qui constituent le milieu poreux. En effet, la surface des grains est généralement chargée négativement. Afin de contrebalancer cette surface chargée, l'eau porale présente un excès de charge positive qui se déplace sous l'action d'un gradient pression hydrique (au niveau d'une couche appelée couche diffuse). Cette migration de charge électrique, dont les porteurs de charge sont les ions contenus dans l'eau porale, s'appelle courant de convection. La différence de potentiel électrique générée par cette densité de courant de convection est alors en équilibre suivant la conductivité électrique du milieu (loi d'Ohm) par le courant dit de conduction.

Le champ électrique généré par un écoulement en milieu poreux peut alors être mesuré en surface ou en forage à l'aide d'électrodes impolarisables.

2. Présentation du projet IJKDIJK

Le Projet IJKDIJK proposait pour la première fois de réaliser à l'échelle 1:1 des digues expérimentales en terre (quatre digues) destinées à la rupture. Constituées d'argile, ces digues de 15 mètres de largeur sur 20 mètres de long et 3.5 mètres de hauteur sont posées sur un niveau sableux de 3 mètres d'épaisseur. Par la mise en charge progressive du bassin (jusqu'à 2.2 mètres de pression d'eau), une zone d'écoulement préférentiel s'établit jusqu'à la rupture de l'ouvrage. Les quatre ouvrages réalisés pour le projet IJKDIJK ont alors permis de tester l'efficacité et l'intérêt, dans des conditions différentes (caractéristiques de matériaux différents), des équipements géotechniques et géophysiques pour le suivi et la surveillance des ouvrages.

Le monitoring du potentiel électrique s'est effectué à l'aide de 32 électrodes impolarisables. Ces électrodes sont réparties en deux flûtes de 16 électrodes chacune, reliées à une centrale d'acquisition haute fréquence. Les mesures ont été acquises à une fréquence de 200 Hz moyennées toutes les 10 secondes. Concernant la mise en place du dispositif, l'électrode de référence est localisée en crête de digue. Parmi les 32 électrodes de mesure, trois ont été placées de chaque côté de la digue, sur le parement aval avec un espacement de 2 mètres pour un total de 6 électrodes. Le reste des électrodes

a été placé en pied aval de l'ouvrage sous forme de 2 lignes parallèles de mesures. La première ligne de mesure est constituée de 10 électrodes (correspondant à une flûte de 16 électrodes moins les 6 électrodes positionnées sur le parement aval de la digue) avec un espacement inter-électrode de 2 mètres. La deuxième ligne de mesure a quant à elle été composée de 16 électrodes espacées de 1.2 mètres. Le positionnement de l'ensemble des électrodes est présenté en **Figure 1**.

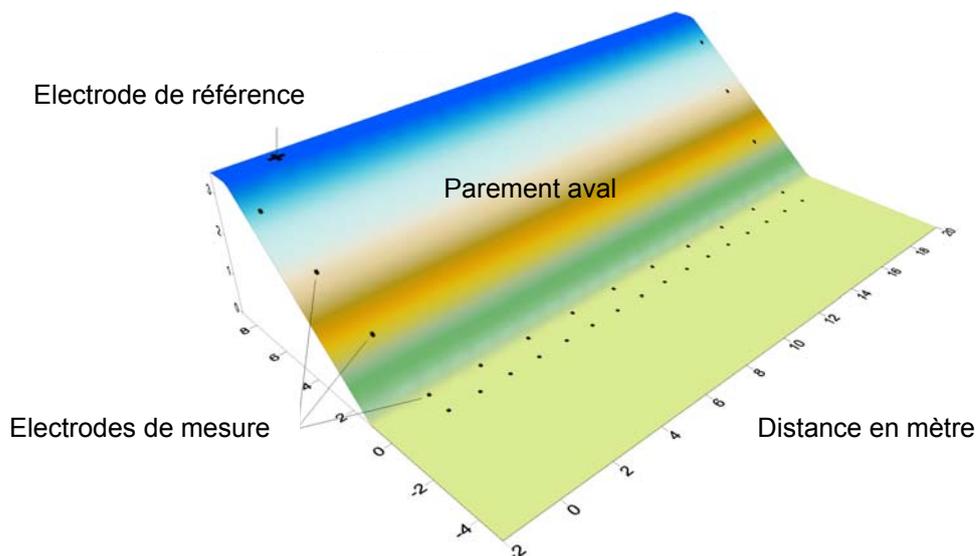


Figure 1. Emplacement des électrodes de polarisation spontanée sur le parement aval de la digue.

Le monitoring de polarisation spontanée a commencé le samedi 28 Novembre 2009 à 12^h00 soit deux jours avant le début de l'expérience IJKDIJK (début de mise en charge du bassin). L'acquisition des mesures de polarisation spontanée a pris fin le mardi 8 décembre soit 3 jours après la rupture de l'ouvrage qui a eu lieu le samedi 5 décembre 2009 entre 14^h30 et 14^h50.

3. Résultats et interprétations

Un total de 85038 acquisitions (une acquisition correspond à la moyenne de 10 secondes de mesures effectuées à une fréquence 200 Hz) a été réalisé pendant la durée de l'expérimentation (correspondant à une période de mesure de 9 jours, 20 heures et 12 minutes). Afin d'interpréter les signaux PS en termes de fuite, une phase de filtrage est nécessaire et constitue la première phase de traitement. En effet, les signaux PS « bruts » contiennent du bruit basse et haute fréquence correspondant

respectivement à la dérive des électrodes dans le temps (en lien avec les variations de température, la stabilisation des électrodes dans le milieu et aux phénomènes magnétotelluriques) et aux influences électromagnétiques du site. La **Figure 2** présente un exemple de traitement de signal PS mesuré par une électrode durant toute la période de mesure.

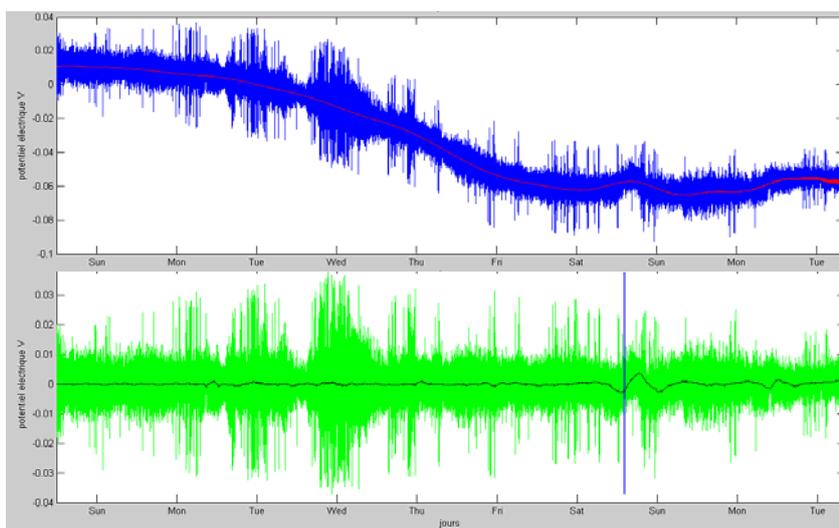


Figure 2. Exemple de filtre basse et haute fréquence sur le signal PS.

3.1 Identification d'un signal électrique actif

La Figure suivante (Cf. **Figure 3.a**) montre le signal mesuré par l'électrode N°21 durant toute l'expérimentation. Les deux traits rouges continus qui encadrent les mesures en début de test (jusqu'au lundi 12^h00) correspondent aux limites inférieure et supérieure du niveau de bruit résiduel après traitement. L'encadrement noir correspond aux limites du niveau de bruit mesuré après le lundi 12^h. Ce dernier affecte l'ensemble des électrodes comme le montre la **Figure 3.b**.

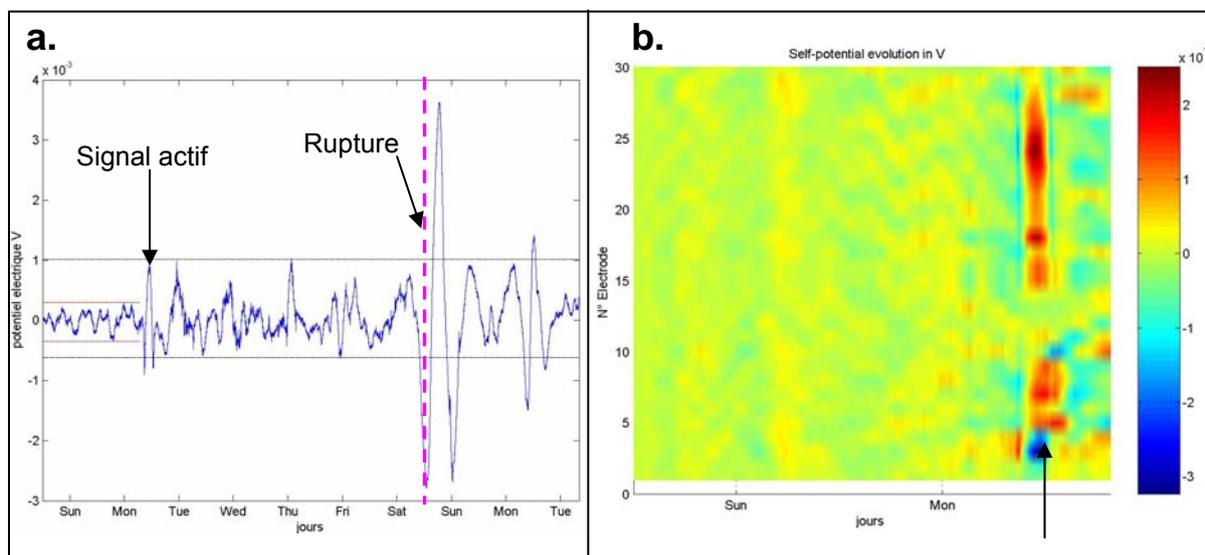


Figure 3.a- Signal mesuré par l'électrode N°21 pendant toute la durée de l'expérimentation.
b- Evolution du signal PS pour l'ensemble des électrodes jusqu'au lundi 30 novembre. On notera l'apparition d'un signal haute fréquence vers 12^h00 sur l'ensemble des électrodes.

Les **Figures 3.a** et **3.b** montrent la présence d'un signal haute fréquence qui affecte l'ensemble des électrodes impolarisables installées sur le site. Les partenaires du projet IJKDIJK ayant installé leurs équipements le lundi 30 vers 12^h00, le signal mesuré par les électrodes de polarisation spontanée pourrait correspondre à un signal actif (injection de courant ?) généré par l'équipement d'un des partenaires du projet. On notera que cet événement induit par la suite un niveau de bruit plus élevé (Cf. **Figure 3.a**) sur les mesures PS, niveau de bruit qui dégrade la sensibilité des électrodes à la détection des signaux d'électrofiltration.

3.2 Evolution du signal PS au cours de l'expérimentation

La Figure suivante (Cf. **Figure 4**) montre une photographie de l'ouvrage prise le 5 décembre 2009 à 12^h54. On voit très nettement une zone d'écoulement préférentiel au niveau de l'électrode PS n°10. La Figure suivante (Cf. **Figure 5**) présente, sous forme de plusieurs cartographies, l'évolution du signal PS à partir du samedi 5 décembre 7^h AM avec un pas de 50 minutes. La digue s'est rompue le samedi 5 décembre entre 14^h30 et 14^h50, c'est à dire au niveau des cartographies n°10 et n°11.



La **Figure 5** montre, au niveau de la cartographie n°4, l'apparition d'une anomalie négative de potentiel spontané centrée sur l'électrode n°10. L'amplitude de cette anomalie s'accroît en passant de -1.5 à -3 mV entre les cartographies n°4 et n°5. On notera aussi l'augmentation de l'extension spatiale de cette anomalie qui affecte progressivement la deuxième ligne d'électrodes PS. Cette anomalie négative va alors rapidement s'estomper avec le début de rupture de l'ouvrage (cartographies n°10, n°11 et n°12). Le délai estimé entre les premiers signes d'anomalie PS et la rupture de l'ouvrage est compris entre 250 et 300 minutes, soit entre 4h et 5h.

Figure 4. Photographie de l'ouvrage prise le 5 décembre 2009 à 12^h54. La flèche rouge indique la zone d'érosion au niveau de l'électrode PS n°10.

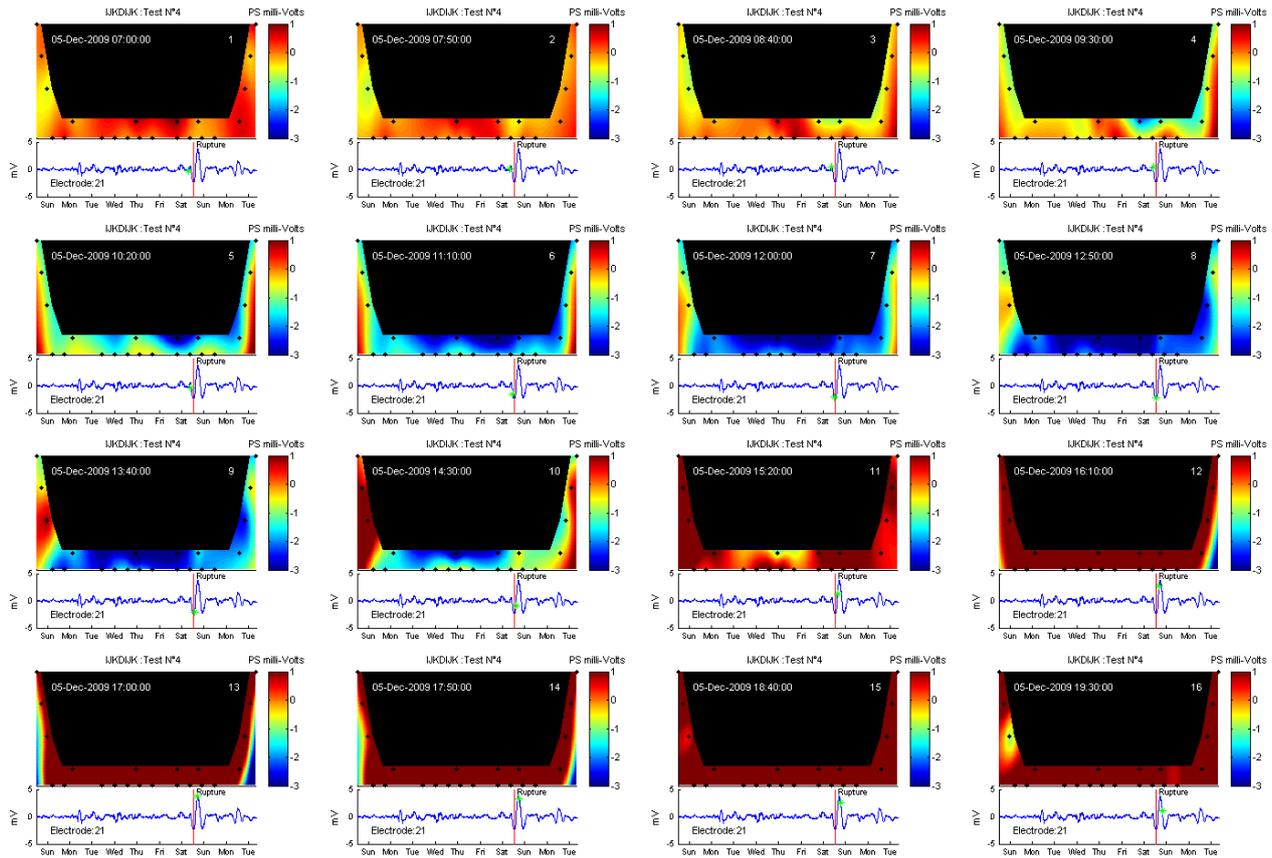


Figure 5. Evolution par pas de 50 minutes de la distribution du potentiel électrique sur le parement de l'ouvrage. La rupture intervient entre les cartographies n°10 et n°11 (entre 14^h30 et 14^h50).

Une vitesse d'écoulement peut être estimée à environ 2.10^{-4} m s⁻¹ en prenant en compte le temps de propagation de l'anomalie PS entre les deux lignes d'électrodes en pieds aval de digue.

4. Conclusions

Le monitoring de potentiel spontané réalisé au cours du projet IJKDIJK présente de nombreux résultats encourageants. En effet, trois résultats principaux peuvent être mis en avant :

- La détection d'une anomalie 4 à 5h avant la rupture de l'ouvrage,
- La localisation précise d'une anomalie le long du linéaire de l'ouvrage,
- La quantification de la vitesse d'écoulement et donc de la perméabilité du sable.

Ces trois résultats montrent l'intérêt ainsi que l'efficacité de la polarisation spontanée dans le cadre du diagnostic d'ouvrages hydrauliques en termes de détection du phénomène d'érosion interne.

Bibliographies

Bolève, A. Localisation et quantification des zones de fuite dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané. Thèse, Université des Sciences de la Terre et de l'Univers de Savoie, (2009).

Corwin, R. F. The self-potential method for environmental and engineering applications: Geotechnical and environmental geophysics, in "Investigations in Geophysics", 5, edited by H. Ward, Soc. Expl. Geophys., 1 (1997).

Mots clés. Polarisation Spontanée (PS), électrofiltration, digue, barrage, fuite, érosion interne.

Intégration de la méthode sismique SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) dans la cartographie de l'aléa karstique sur les digues de protection contre les crues du bassin de la Loire

Kévin. Samyn*, Aude. Nachbaur, Adnand. Bitri (1)

(1) BRGM, Service Risques Naturels et Sécurité du Stockage du CO₂, France

*Auteur principal. BRGM, Risques Naturels et Sécurité du Stockage du CO₂, 3 Avenue Claude Guillemin BP36009 45060 Orléans Cedex 2, France. Tel.: +33 (0)2 38 64 34 54; fax: +33 (0)2 38 64 36 89. E-mail: k.samyn@brgm.fr (K. Samyn).

Résumé

La DREAL Centre et le BRGM ont décidé en 2006 de lancer un programme visant à élaborer une méthodologie qui permette de déterminer et cartographier la susceptibilité de présence de karsts sous les digues domaniales de la Loire, afin de hiérarchiser les travaux de renforcement à conduire en priorité. L'analyse géologique et hydrogéologique, conduite dans cette étude, constitue la première phase du projet de recherche et de développement cofinancé par les deux organismes. Cette analyse a notamment permis d'aboutir à la réalisation d'une carte de susceptibilité de présence de karsts le long du linéaire de la Loire. Les principales données source utilisées sont les 37 cartes géologiques couvrant la zone d'étude (édition du BRGM) et les notices associées, ainsi que les sondages ayant pu être repérés sur la zone d'étude. Plus de 6 000 sondages ont été consultés. À partir des informations géologiques et hydrogéologiques obtenues, une carte de susceptibilité a été établie, dont l'objectif était d'évaluer la possibilité de désordres karstiques le long des levées domaniales de la Loire. L'élaboration de cette carte s'est basée sur trois critères explicatifs ayant été jugés pertinents et indépendants :

- la sensibilité à la dissolution de la formation géologique sous-jacente;
- l'épaisseur du recouvrement alluvionnaire;
- le mode d'écoulement entre la nappe alluviale et l'aquifère karstique.

A partir de la carte de susceptibilité établie, un secteur a ensuite été choisi afin de tester la méthode sismique SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) pour la reconnaissance du milieu sous la digue et la détection de matériaux décomprimés pouvant être liés à une activité karstique.

Enfin, sur les zones qualifiées comme les plus susceptibles à être concernées par des désordres d'origine karstique, une campagne d'investigation sismique SASW à grand rendement a été menée afin d'améliorer la qualification de ces secteurs quant à la possible présence de karst. Cette dernière étape permettra de d'affiner la carte d'aléa et de délimiter ainsi, les secteurs sur lesquels des actions pourront être menées en priorité : analyse géotechnique, surveillance, suivi de l'état des digues, sécurisation, confortements.

Test de la méthode sismique SASW

Les ondes de surface, se propagent parallèlement à la surface du sol. Ce sont donc des ondes hétérogènes qui se propagent horizontalement et s'atténuent selon la profondeur. Chaque composante fréquentielle de l'onde apporte une information sur le milieu, à une profondeur qui dépend de la longueur d'onde du signal. Dans les milieux stratifiés où chaque couche du sous-sol est caractérisée par des propriétés mécaniques différentes, l'onde de surface est dispersive : la vitesse de propagation varie avec la profondeur, et donc avec la fréquence. C'est cette propriété qu'exploite la méthode SASW. Le calcul de la vitesse de cisaillement (V_s) en fonction de la profondeur est basé sur l'inversion de la courbe de dispersion qui présente les variations de la vitesse de phase de l'onde de surface en fonction de la fréquence. Les principales étapes de ce calcul sont les suivantes (Figure 2) :

- acquisition d'un tir sismique (l'onde se propage et est enregistrée le long du dispositif par des géophones qui mesurent le mouvement vertical du sol) ;
- calcul des diagrammes de dispersion ;
- pointé des courbes de dispersion à partir des maxima des diagrammes de dispersion (variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence).

Un algorithme de digitalisation automatique des courbes de dispersion a été mis au point pour visualiser de manière globale, les variations de la dispersion des ondes de surface le long des profils.

- inversion de la courbe de dispersion afin d'obtenir un modèle 1D de Vs puis interpolation en 2D par krigeage, à partir du variogramme de répartition des vitesses dans le milieu.

Pour cette étape, un modèle initial est estimé empiriquement, puis un algorithme de type moindre carré amortis assure la convergence vers la meilleure solution constituant le modèle final. Le modèle de Vs obtenu permet donc de caractériser les propriétés mécaniques du milieu sous la digue et ainsi localiser des anomalies basses vitesses correspondants à un milieu décomprimé et/ou altéré et pouvant être relié à la présence de karsts.

Pour tester la faisabilité d'application de cette méthode à la problématique de l'étude, le dispositif SASW a été testé sur une portion linéaire en sommet de digue où la présence d'un fontis était avérée (Figure. 3a). Le profil de Vs obtenu met en évidence une zone de faible propriété mécanique au toit du calcaire (~20m de profondeur) à l'aplomb du fontis (Figure. 3b). Cette anomalie pourrait donc révéler une activité karstique à l'origine de l'effondrement observé.

Campagne d'investigation sismique à grand rendement

Sur les zones qualifiées comme les plus susceptibles à être concernées par des désordres d'origine karstique d'après la carte initiale, une campagne d'investigation sismique à grand rendement (de l'ordre de 2 Km/j) a été menée sur un tracé linéaire d'environ 70 Km dans le val d'Orléans (Figure. 4) et vers Blois à l'aide d'un dispositif tractable, afin d'améliorer la qualification de ces secteurs quant à la possible présence de karst. Les sections de SASW réalisées dans ce cadre mettent en évidence une grande variabilité des anomalies de Vs, dans leurs formes et leurs importances. Au niveau du toit du calcaire, les anomalies les moins étendues sont plus susceptibles de correspondre à une activité karstique (les anomalies plus larges reflètent plutôt des variations d'altitude à grande échelle) et on introduit sur ces dernières un paramètre de susceptibilité de présence de karsts à partir de l'intensité de l'anomalie et de sa corrélation avec des désordres de surface observés (Figure. 5). Cette dernière étape permettra d'affiner la carte d'aléa et de délimiter ainsi, les secteurs sur lesquels des actions pourront être menées : analyse géotechnique, surveillance, suivi de l'état des digues, sécurisation, confortements.

Conclusion et discussion

A partir des informations géologiques et hydrogéologiques disponibles, une carte de susceptibilité a pu être établie. L'objectif de cette carte était d'évaluer la possibilité de présence de désordres karstiques le long des levées domaniales de la Loire. Sur les zones les plus susceptibles à être concernées par des désordres d'origine karstique d'après la carte initiale, une campagne d'investigation sismique SASW à grand rendement a été menée afin d'améliorer la qualification de ces secteurs quant à la présence de karst. En effet, la méthode SASW permet de caractériser les zones de faibles propriétés mécaniques du milieu sous les digues et ainsi de localiser des anomalies pouvant révéler la présence de cavités karstiques en profondeur. Cette dernière étape permettra d'affiner la carte d'aléa. En l'absence de forages de contrôle, l'interprétation de la Vs n'est pas aisée et une simple hiérarchisation de cette susceptibilité, basée sur l'importance et l'étendue des contrastes de Vs au niveau du toit du calcaire est dans un premier temps proposée. A moyen terme, une réinterprétation des sections de Vs est envisagée avec prise en compte des variations connues de hauteurs de la digue et d'épaisseur des alluvions, ainsi que du recensement des travaux passés de remaniement du corps de la digue.

Figures

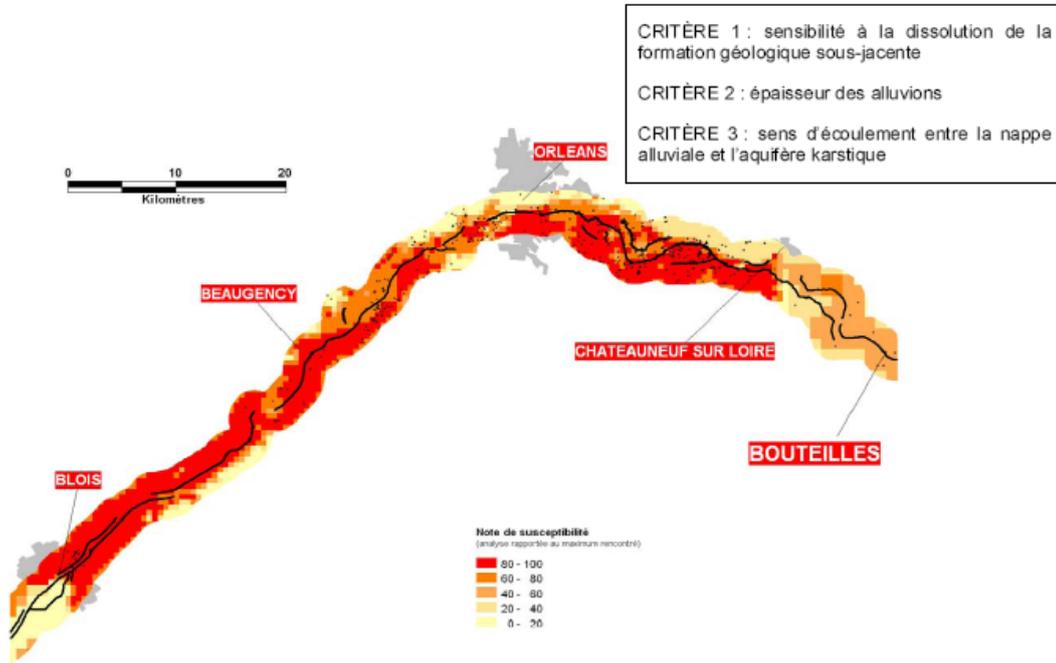


Figure. 1 : Carte de susceptibilité de présence d'évènements karstiques en surface entre Blois (41) et Bouteilles (45).

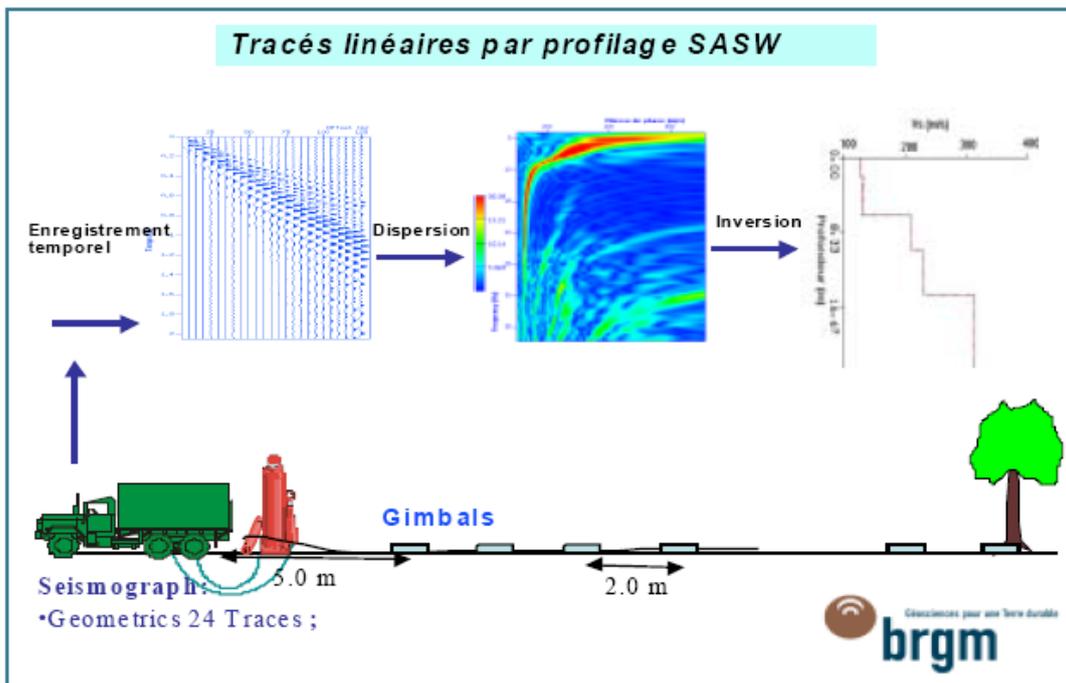
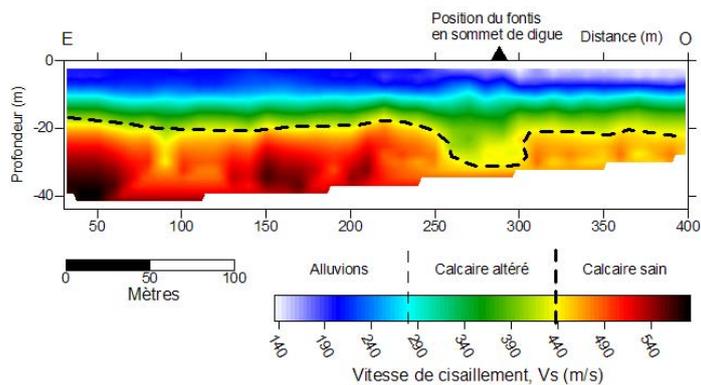


Figure. 2 : Schéma explicatif des étapes qui conduisent à l'obtention du modèle 1D de Vitesse de cisaillement (V_s) pour la méthode SASW.



a)



b)

Figure. 3 : a) photographie du site test en sommet de digue avec présence de fontis, b) section de V_s obtenue par méthode SASW. Une zone de faible propriété mécanique (décompressée et/ou altérée) est mise en évidence à environ 25m de profondeur à l'aplomb du fontis ce qui traduit d'un potentiel karst à l'origine de l'effondrement.

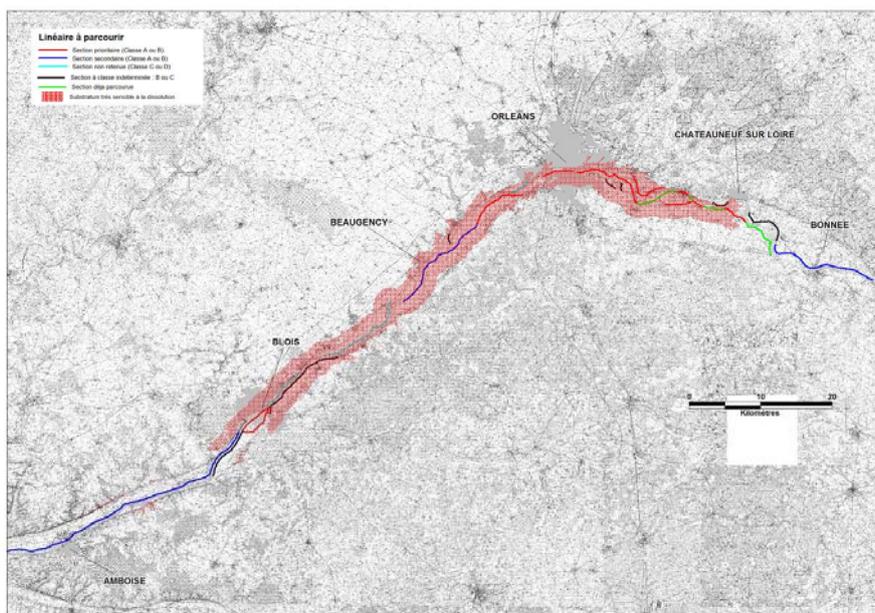


Figure. 4 : Linéaire à investigué avec la méthode sismique SASW (Traits pleins rouges), dans le cadre de la phase à grand rendement.

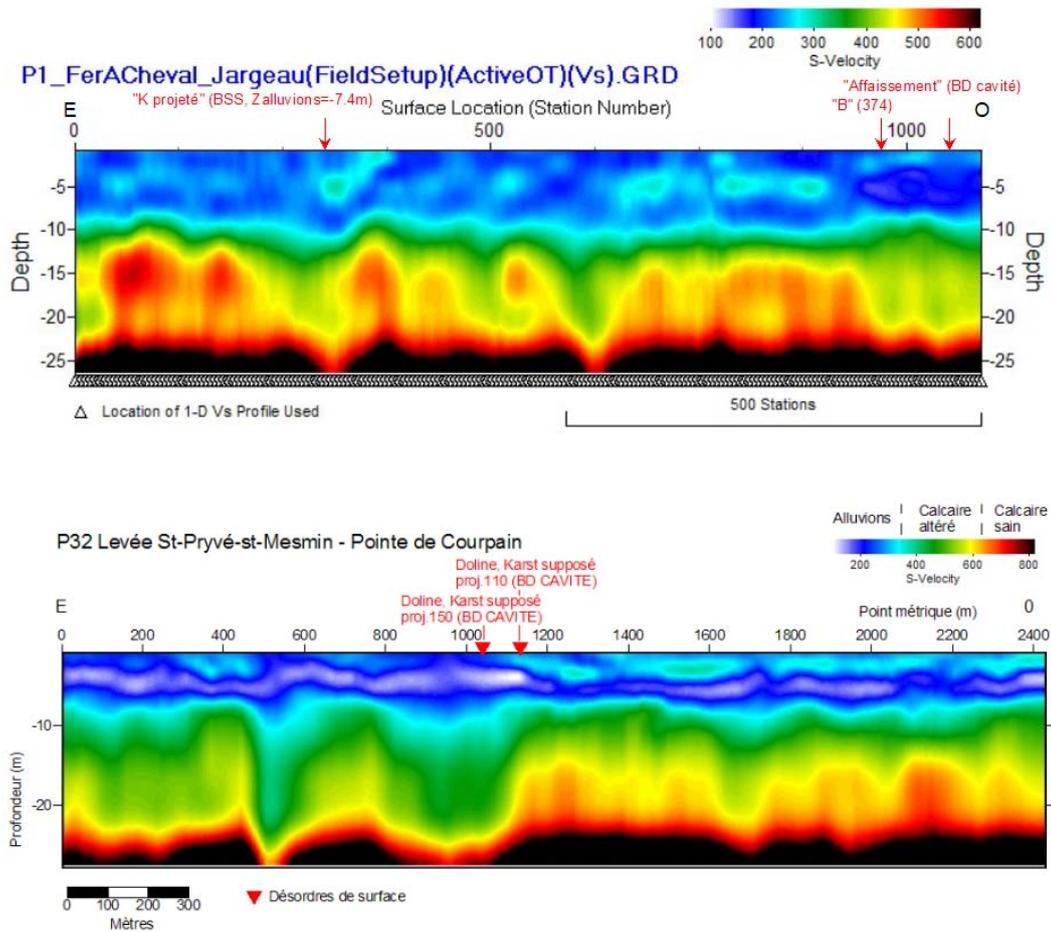


Figure. 5 : Exemple de sections de Vs réalisées par méthode SASW dans le cadre de la phase à grand rendement. Les champs de Vs présentent des anomalies de faibles propriétés mécaniques bien corrélées avec des désordres de surface observés.

Mots clés

SASW, vitesse des ondes de cisaillement, digue, karst risque



Surveillance des fuites dans les digues en terre par mesure de température répartie par fibre optique

Yves-Laurent Beck¹, Jean-Marie Hénault², Cyril Guidoux³, Jean-Robert Courivaud⁴

¹EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe BP41 38040 Grenoble, yves-laurent.beck@edf.fr

²EDF-R&D, 6 Quai Watier 78400 Chatou, jean-marie.henault@edf.fr

³GeophyConsult, BP231 73374 Le Bourget-du-Lac, cyril.guidoux@geophyconsult.com

⁴EDF-CIH, 73373 Le Bourget du Lac, jean-robot.courivaud@edf.fr, jean-jacques.fry@edf.fr

Abstract

Distributed temperature measurements based on fiber optic are presented as a new powerful means for leakage monitoring in hydraulic embankment. After presenting the principle of this technology, its performance on several large-scale experimental sites is demonstrated.

Introduction

L'érosion interne étant, avec l'érosion par surverse, la principale cause de rupture des digues et barrages en remblai, la surveillance des fuites est un élément majeur dans le dispositif de sécurité de ces ouvrages. Depuis plusieurs décennies, la thermométrie s'est avérée comme l'une des mesures les plus pertinentes pour détecter la présence de fuites au sein d'ouvrages en terre (Fry, 2004). Les capacités de la thermométrie ont été démultipliées dès lors que la technologie a permis d'effectuer des mesures réparties de température à l'aide de fibres optiques. Cette avancée a ouvert la voie à une utilisation des mesures de température dans le cadre de l'auscultation et de la génération d'alarmes.

Après avoir décrit les principes généraux de la surveillance des fuites par fibres optiques, nous présentons les résultats de détection de fuite obtenues avec cette méthode sur différents sites expérimentaux.

Principe général de la surveillance des fuites par fibre optique

Le principe de la mesure consiste à envoyer un rayon lumineux (rayon laser) dans une fibre optique standard installée à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en remblai. A partir de l'analyse du signal retrodiffusé en tout point de la fibre optique, en y associant le temps d'aller-retour de l'onde, l'interrogateur optoélectronique Raman permet de disposer d'une mesure répartie de la température tout le long de celle-ci. Les interrogateurs opto-électroniques disponibles sur le marché actuellement permettent d'obtenir une mesure de température tous les mètres, avec une portée allant jusqu'à 30 km. La précision de cette mesure de température est de 0,1°C, mais celle-ci se dégrade pour les portées supérieures à 10 km (Tyler et al., 2009).

En disposant ainsi d'une mesure répartie de température positionnée judicieusement au sein de l'ouvrage, on utilise les principes de la thermométrie appliquée à la détection des fuites. Deux méthodes différentes peuvent être utilisées : la méthode passive et la méthode active. Ces deux méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants.

- La méthode passive

La méthode passive consiste simplement à utiliser les mesures de températures de la fibre optique telles quelles. On fait généralement en sorte que la fibre optique mesure également localement la température de l'eau à l'amont de l'ouvrage et la température de l'air.

L'analyse des données de température brutes ne permet souvent pas de détecter directement la zone de fuite en temps et en espace. C'est pour cela que des méthodes d'analyse ont été développées. Johansson (1997) a été le premier à développer une méthode d'analyse des données pour la méthode passive. Mais cette méthode présentait l'inconvénient majeur d'avoir un domaine d'application limité à des fibres situées en milieu saturé, ce qui écarte son utilisation à la plupart des ouvrages situés dans le sud de l'Europe. C'est pour palier ce manque qu'EDF a développé plusieurs méthodes d'analyse valables quelque soit la position de la nappe par rapport à la fibre optique. EDF a ainsi développé trois modèles complémentaires pour l'analyse des mesures de température acquises

à l'aide de la méthode passive (Beck et al., 2010a), l'un, physico-statistique, développé en collaboration avec le Cemagref, et deux autres, basés le traitement du signal, développés dans le cadre d'une collaboration scientifique avec le laboratoire GIPSA de l'INPG.

- La méthode active (ou méthode de chauffe)

La méthode de mesure avec chauffe (Perzmaier et al., 2007 ; Beck et al., 2010b) reprend les mêmes principes de base de la mesure distribuée de température par fibre optique, utilisant l'effet Raman présenté ci-dessus. Mais ici, la fibre optique est entourée d'un câble de cuivre qui va être chauffé par effet Joule sur une courte période de temps. La puissance électrique nécessaire à cette chauffe est de 3 à 15 W/m. L'enregistrement de l'évolution de la température au cours de la période de chauffe va permettre de distinguer des comportements traduisant un phénomène dominant de conduction (absence de fuite) ou un phénomène dominant de convection (présence de fuite).

Dans la suite de ce papier, nous ne présenterons que les résultats obtenus par méthode passive.

Qualification de la technologie de surveillance des fuites par fibre optique

Cette technologie a été appliquée par EDF, en partenariat avec Tencate et Cemagref, sur différents sites, expérimentaux de grande échelle et des sites réels d'ouvrages opérationnels et à comparer les résultats issus de l'analyse des données par les différents modèles présentés ci-dessus aux données d'observation ou de mesures disponibles sur chaque site. Cette qualification globale de la technologie permet de prendre en considération la pertinence du choix de l'implantation de la fibre optique et de son mode de mise en place, la fiabilité des matériels (fiabilité des fibres optiques, résistance de l'installation aux agressions extérieures, fiabilité et performances métrologiques de l'interrogateur opto-électronique, fiabilité et performance du système de transmission des données) et la robustesse et la précision des modèles d'analyse des données.

- Bassin expérimental PEERINE du Cemagref

Dans le cadre du projet SAFEDYKE¹, le CEMAGREF a construit sur son site d'Aix-en-Provence un bassin expérimental pour développer les produits et méthodes de surveillance des fuites par fibre optique (Figure 1a). Ce bassin rectangulaire est constitué par des digues de 2,8 m de haut équipées de dispositifs permettant de simuler des fuites de débit contrôlé (Figure 1b). Il constitue donc un dispositif expérimental à méso-échelle particulièrement intéressant pour tester des matériels et des méthodes. La longueur totale de fibre optique installée est d'environ 1 000 m. Les quatre faces du bassin (Nord, Est, Sud et Ouest) sont instrumentées. Cinq fibres optiques sont installées sur trois hauteurs (deux en crête, deux à mi-pente et une en pied).

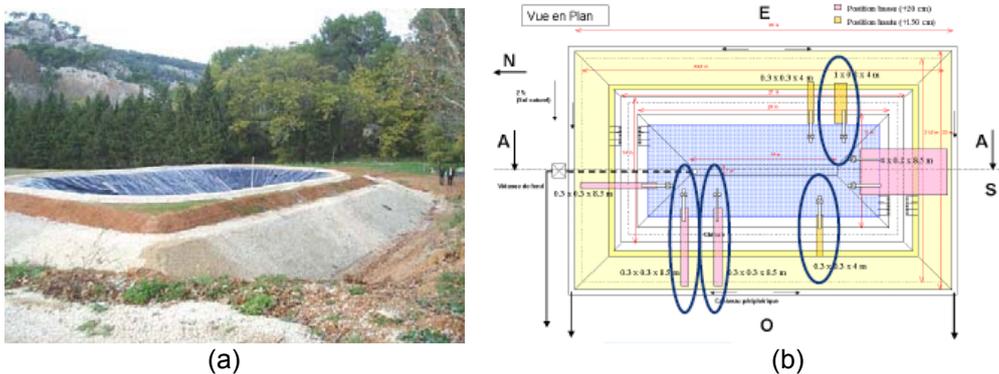


Figure 1 : (a) Vue du bassin expérimental PEERINE du CEMAGREF à Aix-en-Provence, (b) Schéma en vue de dessus du bassin PEERINE équipé des dispositifs de fuites contrôlées

Une campagne de mesures par la méthode passive a été effectuée sur une période de trois mois, de fin août à fin novembre 2006. Les mesures brutes de température (en °C) le long de la fibre en pied aval du bassin ne permet pas la détection de fuite. Le modèle d'analyse physico-statistique a été

¹ Les partenaires de ce projet sont : EDF, CEMAGREF, TENCATE, LTHE (université de Grenoble), CETMEF, FOS&S (société belge).

appliqué à ces mesures. Cette évaluation a été effectuée sans connaissance du positionnement des fuites, afin de se rapprocher d'un cas réel. Les débits de fuite variaient de 0 à 4 l/min sur la période d'essai. Les résultats de cette analyse pour la fibre au pied aval de la face Est et de la face Ouest du bassin montrent la capacité de cette méthode à détecter et localiser les fuites en observant le paramètre statistique SCE (somme des carrés des écarts), issu de l'analyse du résidu (Figure 2).

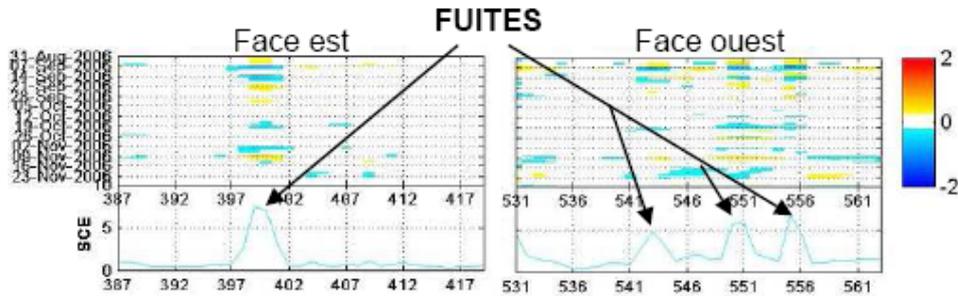


Figure 2 : Résultats de l'analyse de la fibre face Est et face Ouest du bassin PEERINE

- Dignes tests du projet hollandais IJKDIJK

Considérant que les moyens de surveillance utilisés jusqu'à présent sur les digues néerlandaises étaient insuffisants eu égard aux enjeux avenir de sécurité pour le pays, le gouvernement néerlandais a lancé en 2008 le projet Ijkdijk (Ijkdijk signifie digue instrumentée en néerlandais), afin d'évaluer les technologies de surveillance innovantes les plus prometteuses. Ce projet doit comporter trois séries d'essais, correspondant aux trois modes de rupture d'une digue : par instabilité du talus aval, par érosion interne et par surverse. EDF a participé à la série d'essais de rupture par érosion interne réalisés en 2009, en collaboration avec Tencate et geophyConsult. Quatre essais de rupture par érosion interne ont été réalisés de septembre à novembre 2009, sur des digues test de 3,5 m de hauteur, 15 m de longueur et de pentes amont et aval de 1 :2 (cf. Figure 3). La rupture a été obtenue en appliquant un chargement hydraulique à l'amont de la digue entraînant des gradients hydrauliques tels qu'une initiation et un développement d'une érosion régressive devaient apparaître. Les digues tests étaient constituées d'un corps homogène en argile reposant sur une fondation en sable saturé avant la mise en charge du réservoir amont. Les fibres optiques ont été installées au cours de la construction des digues (Figure 4).



Figure 3 : Digue test au cours d'un essai Ijkdijk de rupture par érosion interne

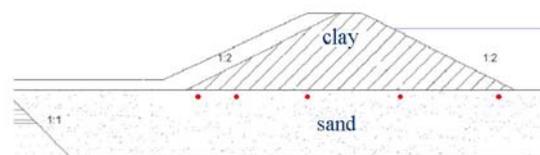


Figure 4 : Schéma d'une section transversale d'une digue test avec la position des fibres optique

Chaque essai a duré de 4 à 6 jours. La problématique était ici de détecter le plus tôt possible le processus d'érosion régressive qui était amené à se développer au sein du remblai et de sa fondation. On ne présentera ici que les résultats obtenus pour le second essai. Pour le second essai, le réservoir a été rempli le 19/10/2009 à 12h00 et l'essai s'est achevé le 25/10/2010 à 10h00 par la rupture de la digue. La charge imposée à l'amont a été de 1,9 m. Les données utilisées pour l'analyse ont été acquises du 19/10 à 9h18 au 25/10 à 9h10. Au cours de cette période, la visualisation des données de température brutes a permis de détecter des précurseurs de la rupture deux jours avant celle-ci, pour une durée totale de l'essai de 6 jours. Les résultats de l'analyse sur les données acquises du 19 au 23/10 sur la fibre optique positionnée le plus à l'aval sont présentées sur la figure 5 ci-dessous. Les rectangles rouges représentent les zones de fuites observées par inspection visuelle au pied du talus aval. On constate qu'au cours de la première journée d'essai (19-20/10) l'absence d'anomalie résultant de l'analyse du modèle correspond bien à l'absence d'observation de fuite. Les jours suivants, la fuite importante identifiée vers l'abscisse 9-10 m est bien mise en évidence également par

le modèle. Les résultats de l'analyse sur les données acquises du 23 au 25/10 sur la même fibre optique positionnée le plus à l'aval sont présentés sur la figure 6 ci-dessous. Du fait du débit de fuite plus important, le paramètre de dissimilarité prend des valeurs plus importantes que pour les jours d'avant, ce pourquoi ces résultats sont présentés séparément, pour ne pas écraser l'échelle des résultats sur les premiers jours. Ce modèle d'analyse journalière a donc permis de détecter la zone où la rupture s'est finalement produite (abscisse 9 à 10 m sur l'axe des y des figures 5 et 6) 4 à 5 jours avant, pour une durée totale de l'essai de 6 jours.

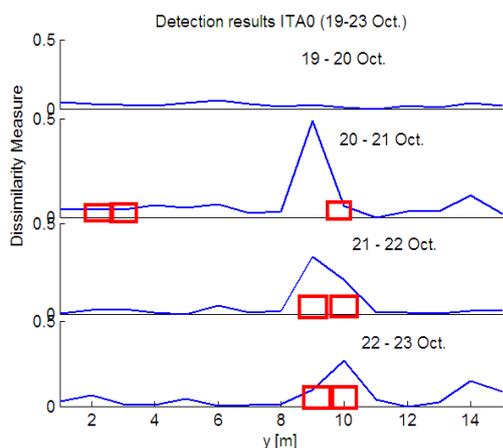


Figure 5 : Analyse des résultats du test #2 du 19 au 23/10 pour la fibre placée à l'aval

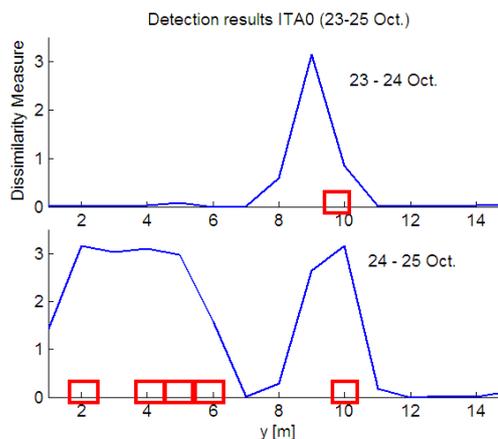


Figure 6 : Analyse des résultats du test #2 du 23 au 25/10 pour la fibre placée à l'aval

Conclusions

L'utilisation de la mesure de température répartie par fibre optique est un moyen efficace pour détecter les fuites dans les digues en terre. Les résultats présentés constituent des premiers éléments pour démontrer la capacité de cette technologie à être utilisée pour la surveillance de fuites dans les digues. Cette démonstration devra être confirmée par d'autres résultats qui devraient désormais provenir d'installations sur des sites industriels.

Références

- Fry, J.J. (2004) Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température le long d'une fibre optique Sécurité des digues fluviales et de navigation, Actes de colloque du CFGB, Orléans, France.
- Beck Y.L., Khan A.A., Cunat P., Guidoux C., Artières O., Mars J. and Fry J.J. (2010a) Thermal Monitoring of Embankment Dams by Fiber Optics, 8th ICOLD European Club Symposium DAM SAFETY, Innsbruck, Autriche
- Beck Y.L., Le Clerc T., Fry J.J., Fabre J.P. and Royet P. (2010b) Leakage detection in earth dams by heated fiber optics, CDA 2010 Annual Conference, Niagara Falls, Canada
- Johansson, S. (1997) Seepage monitoring in embankment dams. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Perzmaier, S., Aufleger, M., Dornstadter, J. (2007) Active and passive defences against internal erosion in assessment of the risk internal erosion of water retaining structures : dams, dykes and levees. Intermediate report of the European Working Group in Internal Erosion of ICOLD 2007, pp. 194-207
- Tyler S. W., Selker J. S., Hausner M. B., Hatch C. E., Torgersen T., Thodal C. E., and Schladow S. G. (2009) Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. Water Resources Research, Vol. 45, 11 pp

Mots-clés : digues, barrages en remblai, surveillance, fuites, thermométrie, érosion interne, fibre optique.

Optimisation du positionnement des électrodes pour l'Imagerie de Résistivité Electrique : Application à la détection d'infiltrations dans une digue expérimentale

Yannick Fargier^{1,2,3}, Sérgio Palma-Lopes², Daniel Francois¹, Cyrille Fauchard³, Philippe Cote²

¹ EDF R&D/STEP/P1E, 6 quai Watier –BP 49 - 78401 Chatou Cedex,

² LCPC, centre de Nantes, 44340 Bouguenais, yannick.fargier@lcpc.fr

³ LRPC Rouen, CETE Normandie Centre, 10 chemin de la poudrière, 76121 Le Grand Quevilly Cedex

Abstract

Embankment dikes can be subject to several phenomena such as internal erosion, which may lead to mechanical weakness and even a breach. Until recently, there has been a research effort on the optimization of ERI data sets to increase the amount and reliability of information. This paper extends how to optimize electrodes layouts to enhance the resolution compared to conventional layout.

Introduction

Récemment, plusieurs inondations ayant entraîné des pertes humaines et économiques considérables ont mis en évidence la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques en terre en France. L'érosion interne (EI), pathologie fragilisant peu à peu les digues à charge permanente, est identifiée comme une des principales causes de rupture d'ouvrages (Fell & Fry, 2007). Or, la France compte plus de 1000 km de digues d'aménagement hydraulique. Dans le cadre du Projet National ERINOH (ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques) concernant l'étude du phénomène d'EI dans les ouvrages hydrauliques en terre, plusieurs méthodes d'auscultation géophysiques ont été testées.

Cité par Johansson (1997) parmi plusieurs méthodes géophysiques, la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) a été sélectionnée pour sa forte sensibilité à certains paramètres d'E.I. et pour sa capacité à imager le sous-sol. La suffusion est un type d'E.I., elle entraîne une mobilisation et une fuite des particules fines (argiles, limons) menant à une diminution de la teneur en argile, à une augmentation de la porosité et à une augmentation de la teneur en eau. Le principe de la TRE repose sur la mesure de différences de potentiel générées par un courant électrique continu. Cette méthode est sensible à la répartition spatiale du paramètre résistivité électrique et donc sensible à la nature du sol, type d'argile, teneur en argile, teneur en eau, porosité, et à la température.

Pour exploiter les données TRE, les mesures sont inversées afin de remonter à un modèle géologique réaliste. Or, le potentiel des méthodes d'inversion est limité par la quantité d'information contenue dans les données (mesurées ou *a priori*). Ainsi, le concept de matrice de résolution du modèle R_m a été introduit (Menke, 1984) pour quantifier la robustesse des méthodes d'imagerie géophysique.

Le calcul de R_m peut servir à qualifier la fiabilité de chaque cellule inversée, et donc informer indirectement sur la profondeur d'investigation d'un jeu de mesures. Ce type de résultat montre que la profondeur d'investigation désirée n'est pas toujours atteinte et qu'il peut être hasardeux d'interpréter ces résultats.

Au cours de la dernière décennie un effort considérable de recherche a été employé pour exploiter efficacement les capacités d'imagerie de la TRE. Dans ce contexte, Maurer *et al.* (2000), ont démontré qu'il était primordial d'élaborer des campagnes d'acquisition optimisées. Par la suite, Stummer *et al.* (2004) ont établi une méthodologie permettant de définir une séquence optimisée grâce à l'utilisation d'une fonction de qualité appelée « Goodness Function » pondérant R_m .

Notre approche suggère que la matrice R_m peut aussi être utilisée pour automatiser une procédure d'optimisation du placement des électrodes. Cette méthode développée pour les cas 3D permet de focaliser l'information vers plusieurs régions internes ciblées et a été appliquée à une étude sur une digue expérimentale construite en mars 2010 au CER de Rouen.

Dans un premier temps, ce papier présente brièvement la digue expérimentale apportant l'information *a priori* nécessaire à notre procédure. Ensuite, la méthodologie permettant l'optimisation du placement

des électrodes est décrite. Enfin, la méthodologie est appliquée au cas de la digue expérimentale et plusieurs résultats concernant l'amélioration de R_m sont présentés.

La digue expérimentale

La longueur de la digue a été étudiée pour permettre la génération d'infiltrations à trois positions différentes (Fig. 1). Les infiltrations se produisent dans un même matériau (sable limoneux), bien que compacté selon différents modes selon la longueur. Dans le but de quantifier du point de vue de la résistivité électrique l'évolution temporelle des infiltrations d'eau, 48 électrodes ainsi que des jeux de sondes sont installés de manière permanente dans la digue (Fibre Optique, sondes de température, capteurs d'humidité et sondes de conductivité électriques).

A partir d'outils de modélisation numérique (Hydrus 2D/3D), le comportement d'une infiltration progressive dans la digue expérimentale a été simulé. Cette étude apporte l'information *a priori* sur l'évolution de la géométrie du panache et la durée estimée du suivi temporel à réaliser. La section suivante, présente une méthode permettant l'utilisation de cette information afin de contraindre la « goodness function » (GF).

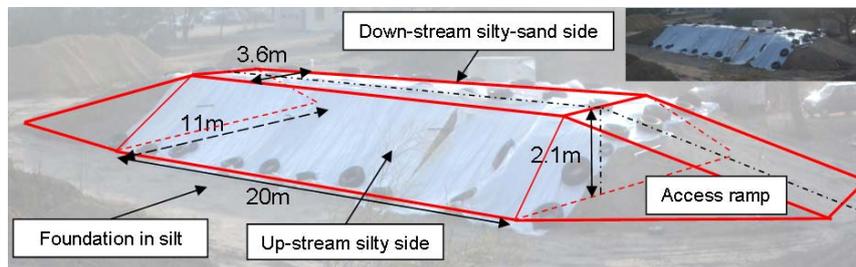


Figure 1: Dimensions et matériaux de la digue expérimentale séparée en deux parties avec une photo dans l'angle supérieur droit.

Méthodologie pour l'optimisation du placement des électrodes

La robustesse d'une inversion peut être atteinte par l'information extraite de la matrice de résolution du modèle « R_m », qui est une matrice dérivant de la théorie de l'inversion linéarisée (équations 1, 2). De manière stricte, R_m n'est définie que pour les problèmes inverses linéaires. Cependant, une procédure d'inversion est souvent implémentée via une série itérative d'étapes de linéarisation.

$$\delta m_i = (J^T W_d^T W_d J + \lambda C)^{-1} J^T W_d^T W_d (d_{\text{obs}} - d_{\text{calc}}) + \{\lambda (C (m_i - m_0))\} \quad (1)$$

δm_i correspond au vecteur perturbation du modèle à l'itération i de l'inversion.

J est la matrice des dérivés de Fréchet ($\delta V / \delta p$) aussi appelée matrice Jacobienne ou matrice de sensibilité et calculée par la méthode de l'état adjoint (Park and Van, 1991).

W_d est une matrice diagonale des erreurs statistiques de mesure (Dahlin and Zhou, 2004).

λ est le facteur d'amortissement aussi appelé damping factor

C contient les contraintes et les filtres spatiaux (ex : connaissances *a priori* du modèle) permettant la régularisation du processus d'inversion. m_i représente le modèle à l'itération i et m_0 un modèle de référence.

$$R_m = (J^T W_d^T W_d J + \lambda C)^{-1} J^T W_d^T W_d J \quad (2)$$

Chaque élément de la diagonale de la matrice R_m correspond à une cellule d'inversion. La valeur de cet élément quantifie la capacité des mesures à résoudre de manière fiable chaque cellule d'inversion. Cette méthodologie implique la connaissance d'un modèle d'entrée proche du modèle vrai (théorie de la linéarisation). Une estimation simple du modèle vrai peut-être obtenue en prenant le résultat d'une inversion. Dans notre cas, la construction de la digue expérimentale étant imposé par un cahier des charges strict sur la géométrie désirée et les matériaux utilisés, la digue résultante est considérée comme conforme au cahier des charges.

Afin de focaliser l'information et d'améliorer la résolution en certaines zones, il est nécessaire d'introduire un système de pondération permettant d'inclure de l'information *a priori*. Les régions présentant peu d'intérêt pour le suivi temporel telles que les rampes d'accès sont alors pondérées par

un facteur plus faible que les régions à fort intérêt telles que les zones où des infiltrations sont attendues.

L'utilisation d'une fonction de qualité telle que la GF (Stummer *et al.*, 2004) permet de hiérarchiser les mesures entre elles à partir de R_m . Si toutes les mesures correspondant à une électrode sont rassemblées, et que l'opération est itérée pour toutes les électrodes, il devient alors possible de comparer les électrodes entre elles.

Ainsi, une fine grille d'électrodes est simulée à la surface du milieu ausculté. Ensuite, un jeu exhaustif de mesures correspondant à chaque électrode est modélisé numériquement. Enfin, les électrodes sont comparées par le calcul de GF afin de sélectionner celles contribuant le plus à l'optimisation de R_m , pour ne garder qu'un jeu de "p" électrodes optimisées.

Application à la digue expérimentale

Pour des raisons de coût en lien avec la longueur des digues et sans information *a priori*, la méthode TRE est habituellement appliquée de manière conventionnelle; un jeu d'électrodes équidistantes est aligné sous forme de panneau électrique dans le sens longitudinal sur la crête, la pente ou le pied de la digue. Dans le cas d'une étude 3D, les électrodes sont habituellement placées sur une grille régulièrement espacée en surface. Pour tester notre méthodologie, nous initions les calculs avec une fine grille de 210 électrodes régulièrement espacée sur la surface de la digue et nous calculons 48 électrodes "optimisées". Les figures 2,3 présentent la répartition spatiale des valeurs de la diagonale de R_m obtenues pour respectivement 48 électrodes régulièrement espacées sur une grille et 48 électrodes dont le placement est optimisé par la méthode présentée précédemment.

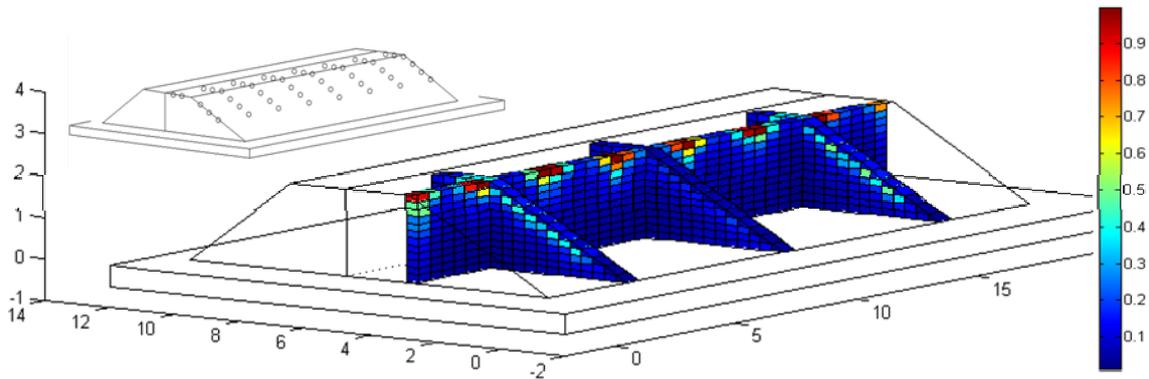


Figure 2: Représentation de la matrice de résolution du modèle calculée à partir d'un jeu exhaustif de mesures réalisées avec 48 électrodes linéairement espacées sur une grille (schéma dans l'angle haut gauche, un cercle=une électrode)

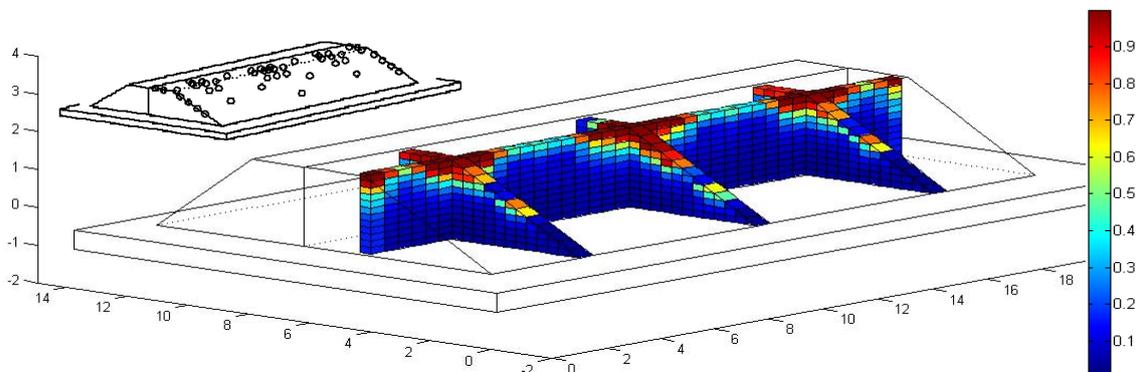


Figure 3: Représentation de la matrice de résolution du modèle calculée à partir d'un jeu exhaustif de mesures réalisées avec 48 électrodes dont le placement est optimisé (schéma dans l'angle haut gauche, un cercle=une électrode)

La couleur bleue de la figure 4 indique un gain en résolution dû à l'optimisation du placement des électrodes et la couleur rouge indique une perte en résolution. Les régions spécifiquement ciblées, où l'infiltration devrait se produire, sont à l'intersection entre les coupes longitudinale et transversales et bénéficient d'un gain important en résolution (effet recherché).

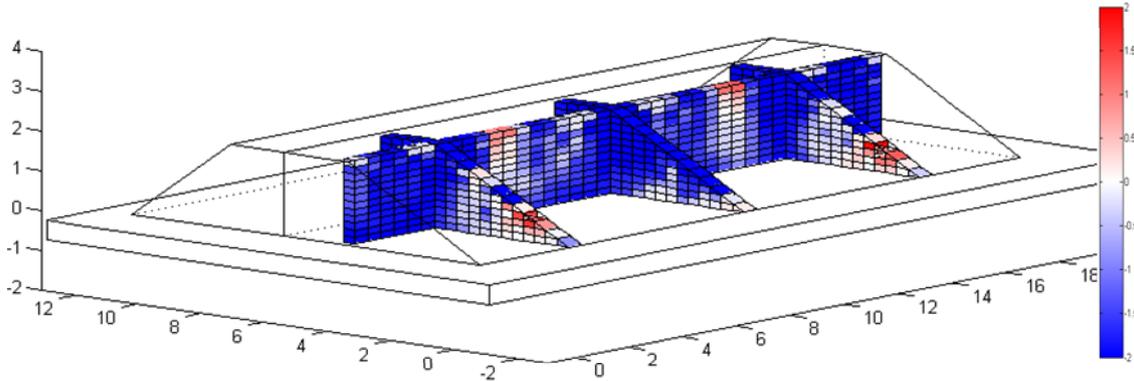


Figure 4: Gain (en bleu), ou perte (en rouge) en capacité de résolution apportée par l'utilisation d'un dispositif optimisé comparé à un dispositif conventionnel (différence relative entre R_m équidistant (fig1) et R_m optimisé (fig2)).

Conclusion

Une méthodologie originale est proposée afin d'optimiser le positionnement des électrodes pour l'imagerie Electrique 3D. Cette méthodologie est basée sur le calcul d'une fonction de qualité et améliorée par l'utilisation d'informations *a priori*. Les résultats issus d'une étude synthétique basés sur une digue expérimentale montrent une amélioration significative de la matrice de résolution du modèle et donc une amélioration de la robustesse des futures inversions. Plusieurs facteurs impactant cette méthodologie ont été brièvement discutés et seront prochainement investigués plus précisément sur des données réelles.

References

- Dahlin, T., and B. Zhou [2004] A numerical comparison of 2D resistivity imaging using ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **52**, 379-398.
- Fell, R., and J.-J. Fry [2007] Internal erosion of dams and their foundations. Taylor & Francis, London.
- Johansson, S. [1997] Seepage monitoring in embankment dams, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Maurer, H., D.E. Boerner, and A. Curtis [2000] Design strategies for electromagnetic geophysical surveys. *Inverse Problems*, **16**, 1097-1117.
- Menke, W. [1984] Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press Inc.
- Park, S. K., and G.P. Van [1991] Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, **56**, 951-960.
- Stummer P., H. Maurer, and A.G. Green [2004] Experimental design: electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, **69**(1), 120-139.

Mots clés : Digue, Erosion Interne, Tomographie de Résistivité Electrique, Optimisation, Inversion, Matrice de résolution du modèle.

Méthodologie opérationnelle pour le diagnostic d'Érosion Interne et de fuites dans les digues en terre, par reconnaissances non destructives - Expérience d'EDF -

Jean-Paul Blais

EDF, Service.GEOLOGIE et GEOTECHNIQUE
905 av du Camp de Menthe. 13097 Aix en Provence
jean-paul.blais@edf.fr

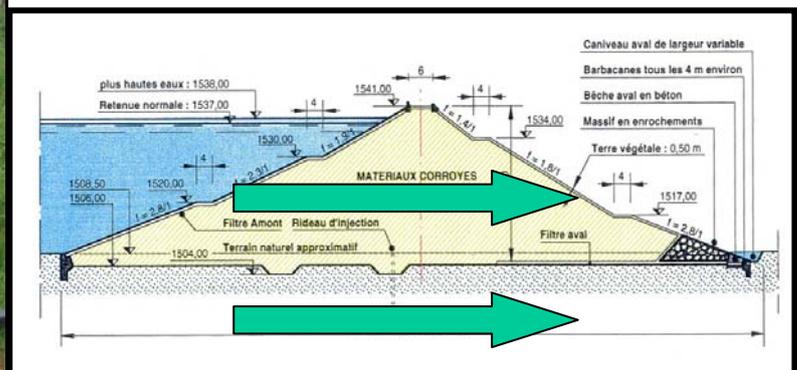
Résumé :

La méthodologie utilisée par EDF (ayant été mise en œuvre, à ce jour, sur une trentaine de digues) pour la détection de fuites consiste, après une recherche d'indices visuels à effectuer :

- dans un premier temps, une inspection géophysique à grand rendement d'acquisition (plusieurs kilomètres par jour) ; le choix de la méthode dépend de la configuration de la digue et des caractéristiques de sa fondation ; les méthodes classiquement utilisées sont : *les méthodes électromagnétiques (EM 31, EM 34) la radio Magnéto Tellurie, le Radar Géologique, les panneaux électriques glissants, la Radiométrie infrarouge Thermique.* L'élaboration d'un premier zonage géophysique de la digue est alors possible.
- dans un second temps, une inspection locale sur des zones « suspectes » définies par l'inspection à grand rendement ; les méthodes utilisées sont : les panneaux électriques, les mesures de Polarisation Spontanée, le radar géologique, la thermographie, les méthodes acoustiques ; les zones de fuites identifiées peuvent alors faire l'objet d'un traçage à la saumure, avec suivi du passage du front salé par panneaux électriques.

Les résultats de cette inspection locale permettent alors, de mettre en évidence et d'analyser les éventuels désordres (zones de fuites, faiblesse, contraste de matériaux) et implanter de façon rigoureuse les reconnaissances destructives de validation des anomalies géophysiques.

La communication présente quelques exemples significatifs d'application de cette méthodologie, réalisés par EDF sur un certain nombre de ses digues.



L'érosion interne concerne tous les ouvrages hydrauliques et constitue 46% des ruptures de digues (en terre) dans le monde. C'est le mode de rupture le plus dangereux. ; l'érosion interne est responsable, en France, d'une rupture d'ouvrage hydraulique par an en moyenne. La connaissance de ce mécanisme est essentielle pour tous les maîtres d'ouvrage.

1. Analyse des diagnostics réalisés sur les digues d'EDF

Les digues de protection des berges, canaux ainsi qu'un certain nombre de barrages en matériaux meubles ont subi depuis leur mise en eau un certain vieillissement. Celui-ci se traduit, entre autres, par des phénomènes de fuites pouvant entraîner des désordres préjudiciables pour la sécurité de l'ouvrage.

Depuis de nombreuses années, EDF, par l'intermédiaire de son service Géologie-Géotechnique étudie les problèmes liés à la détection et au cheminement des fuites dans et sous ses ouvrages et a mis au point une méthodologie opérationnelle en plusieurs phases, pour le diagnostic d'Erosion Interne et les reconnaissances de fuites associées.

Les objectifs de ces investigations sont d'une part d'effectuer un diagnostic sur des fuites connues et d'autres parts de mettre en évidence des secteurs « fuyards » inconnus.

Cette méthodologie s'appuie sur l'auscultation d'ouvrages, de conception très variée :

- Les sites investigués par EDF présentent des localisations géographiques très différentes.
- Les conceptions des ouvrages, et les conditions de fondation sont également très différentes : hauteur de fondation, nature de l'étanchéité des ouvrages et de ses fondations.
- Les natures des fuites sont également très variables :
 - Volume de fuites variant de quelques l/mm à plusieurs centaines de l/s,
 - Linéaire et localisation des fuites variables (fuites diffuses, ponctuelles, sur parement aval, pied parement aval, contre canal)

2. Méthodologie du diagnostic

L'établissement du diagnostic s'appuie sur la réalisation de 3 phases d'études principales. Ces 3 phases sont réalisées de façon chronologique et s'articule de la façon suivante :

► Phase 1 : Recherches d'indices visuels

Cette phase consiste à recueillir le plus d'informations possibles concernant :

- l'histoire de l'ouvrage (bibliographie, topographie, examen des données disponibles dont celles d'auscultation...),
- la géologie de l'ouvrage (nature des matériaux de constitution, des conditions géologiques de fondation),
- l'hydrogéologie locale ainsi qu'éventuellement l'analyse morphodynamique du cours d'eau.

Cette recherche est complétée par une inspection visuelle sur site avec repérages de tous les indices géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques de fuites, comme les zones d'érosion, la végétation spécifique, les ravinements, les sources ou suintements, et tous les désordres de surface.

A l'issue de cette première phase, une reconnaissance par méthode non destructive est proposée en fonction de la problématique posée et des conditions locales : hauteur de digue, environnement industriel, caractéristiques des matériaux.

D'une manière générale on préférera doubler les méthodes afin de croiser les éventuelles anomalies mises en évidence par les reconnaissances géophysiques.

La reconnaissance géophysique sur une digue ou un barrage en remblai consiste à déduire les caractéristiques internes de l'ouvrage en étudiant les variations d'un champ physique mesuré selon des profils longitudinaux et/ou transversaux de l'ouvrage.

► Phase 2 : Reconnaissance par méthodes non destructives (géophysiques)

Suivant la problématique cette phase se décomposera en 2 sous phases :

▷ Phase 2.1. Inspection à grand rendement

Le résultat de la reconnaissance à grande vitesse d'acquisition (plusieurs km / jour) donne une image interne de l'ouvrage sur tout son linéaire (corps de digue et fondation), soulignant la nature et la répartition des matériaux, les zones sèches et les zones humides, les secteurs remaniés et hétérogènes, la présence d'anomalies importantes : ouvrages ou réseaux enterrés, conduites...).

L'analyse des résultats permet l'élaboration d'un premier zonage contrasté de l'ouvrage, en fonction des paramètres physiques mesurés (par exemple, secteurs conducteurs et secteurs résistants si le paramètre mesuré est la résistivité).

Les méthodes classiquement utilisées par EDF généralement le long de profils longitudinaux parallèles (couronnement, pied aval des ouvrages) sont :

- les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche :
 - EM 31 – EM 34
- la méthode radio magnéto tellurique (RMT),
- le radar géologique,
- les panneaux électriques « glissants » (ou traîné électrique multiprofondeur), de type dipôle-dipôle, multi-électrodes.

Le choix de la (ou des) méthode utilisée dépend des conditions locales mais également des performances de la méthode utilisée comme sa profondeur d'investigation ainsi que ses limites d'utilisation (interdits industriels ...)

A l'issue de cette phase et en fonction des anomalies mises en évidence et des secteurs « suspects » une seconde phase d'investigation est alors envisagée (phase 2.2).

▷ Phase 2.2. Inspection locale

Cette phase d'investigation très locale s'intéresse à des secteurs très localisés (de la dizaine de mètres à quelques centaines de mètres de linéaire reconnus).

Les profils sont réalisés de façon longitudinale et transversale à la digue.

Les objectifs de cette phase sont :

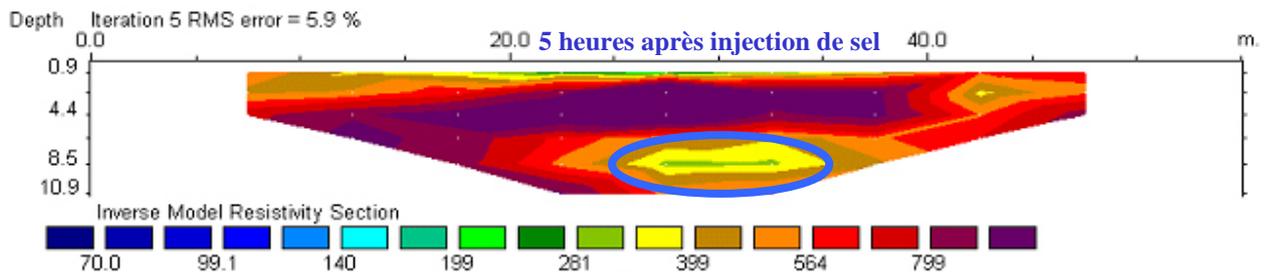
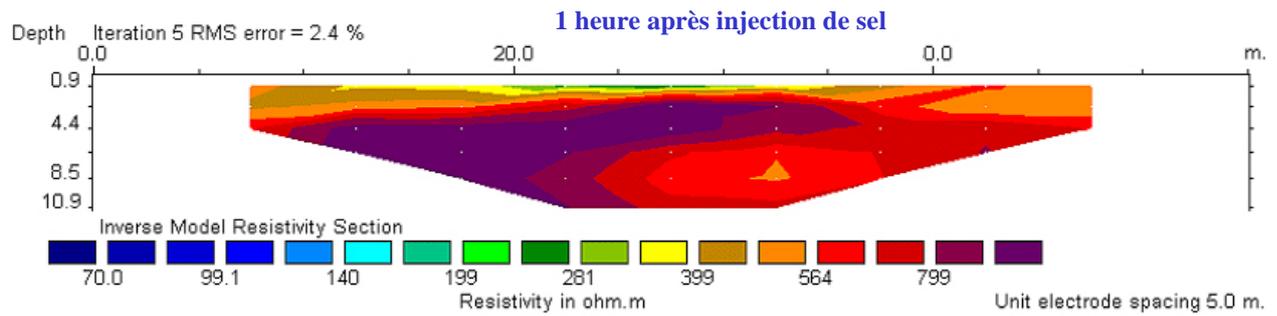
- améliorer le zonage géophysique défini par la phase 2.1
- mettre en évidence les désordres internes à l'ouvrage : fuites avec localisation des entonnements et des circulations internes, les zones de faiblesse, les éventuels contrastes des différents matériaux.

Les méthodes classiquement utilisées lors de cette phase sont :

- Les panneaux électriques (fixes),
- La polarisation spontanée (ou mesure du potentiel d'electrofiltration),
- Le radar géologique,
- La méthode acoustique,
- La radiométrie Thermique, les mesures de températures.

Les zones de fuites identifiées peuvent alors faire l'objet d'un traçage à la saumure, avec suivi (monitoring) du passage du front salé par panneaux électriques.

Les résultats de cette inspection locale permettent alors d'implanter de façon rigoureuse les reconnaissances destructives de validation des anomalies géophysiques.



Exemple de 2 panneaux électriques montrant l'abaissement de résistivité lors du passage d'un front salé (1 heure et 5 heures après l'injection de sel) et identifiant le cheminement de la fuite

► Phase 3 : Reconnaissance par méthodes destructives

Cette phase permet, par réalisation de reconnaissances destructives géologiques et géotechniques :

- d'une part, une validation des anomalies géophysiques mises en évidence durant les phases précédentes,
- et d'autre part une caractérisation des différents matériaux.

La nature de ces reconnaissances est variable :

- sondages destructifs ou carottés,
- essais in situ: pénétrométriques et de perméabilité,
- essais laboratoire sur échantillons.

L'analyse de l'ensemble de ces phases permet alors d'effectuer, au niveau des secteurs investigués, un diagnostic exhaustif de l'ouvrage, ainsi qu'une optimisation des travaux de maintenance afin de pérenniser sa sécurité.

3. Amélioration de la connaissance du diagnostic

Afin d'améliorer la connaissance du diagnostic EDF développe le projet interne **PAREOT** (Prévention et Analyse des Risques D'Érosion des Ouvrages en Terre) et participe, avec une trentaine de partenaires, au projet national **ANR-ERINOH** (Érosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques).

En ce qui concerne le chapitre détection, les objectifs de ces projets sont :

- Le perfectionnement de certaines techniques d'auscultation à grand rendement.
- Le développement :
 - d'une méthode de détection des fuites par fibre optique,
 - d'une méthode d'estimation des débits de fuite,
 - et d'un dispositif de surveillance en continu (monitoring) des zones « fuyardes ».

Surveillance de digues par Imagerie de Résistivité Electrique : expérimentation de longue durée sur une levée de Loire

Sérgio Palma Lopes¹, David Hupin², Yannick Fargier^{3,1,4}, Raphaël Bénot⁵, Anaëlle Luczak¹ et Sébastien Hervé²

¹ UNAM, LCPC, 44340 Bouguenais, sergio.lobes@lcpc.fr

² CETE Ouest, LRPC d'Angers, 49136 Les Ponts de Cé Cédex

³ EDF R&D, 6 quai Watier - BP 49 - 78401 Chatou Cedex,

⁴ CETE Normandie Centre, LRPC Rouen, 76121 Le Grand Quevilly Cedex

⁵ CETE Ouest, LRPC de Saint-Brieuc, 22015 St Brieuc Cedex

Abstract

A long term experimentation is being conducted on a Loire river levee to develop the monitoring of earthen embankment dikes by DC-Electrical Resistivity Imaging techniques. The suggested approach requires the implementation of multi-electrode cables in the dike body to detect water infiltrations. Although no flooding event has occurred, time-lapse inversion results show two singularity zones which seasonal behaviour is still to be explained. Future work includes further characterization of these zones, as well as sequence acquisition optimization taking 3D aspects into account.

Introduction

Parmi d'innombrables ouvrages hydrauliques en terre, la France compte près de 8 000 km de digues de protection contre les crues. La plupart de ces ouvrages est très âgée et de constitution très hétérogène. Que ces ouvrages protègent des zones d'habitation, d'exploitation agricole ou des bassins industriels, les enjeux humains, économiques et de sûreté sont considérables. Or les accidents sont réguliers et les gestionnaires demandent des techniques de surveillance automatisées. Un tronçon de levée de Loire fait l'objet d'un suivi géophysique expérimental depuis fin 2008. La DDT 49 est gestionnaire de la levée entre Angers et Saumur. L'objectif est d'étudier et améliorer la pertinence des outils géophysiques dans une méthodologie de surveillance.

A intervalles de temps réguliers, des coupes par Imagerie de Résistivité Electrique (IRE) ont été relevés. Rappelons que cette méthode fait partie de celles considérées comme efficaces pour caractériser l'hétérogénéité des ouvrages en terre et leurs évolutions temporelles (Fauchard et Mériaux (2004), Johansson (1997)). Cette communication présente un premier bilan du suivi temporel, qui s'est basé sur une instrumentation pérenne du corps de digue. L'instrumentation pérenne consiste en 2 lignes parallèles de 48 électrodes enfouies sous la crête et dont le but est de localiser et d'imager le passage d'un front d'infiltration occasionné par une crue. Pendant les 18 premiers mois de ce suivi, nous avons déployé une approche dite « conventionnelle » afin d'en caractériser les atouts et les limites dans un contexte de surveillance.

La levée de Loire et l'instrumentation pérenne

La zone étudiée est un linéaire en contact direct avec la Loire et fortement soumis aux courants, entre les communes de Saint-Clément-des-Levées et Saint-Martin-de-la-Place (49). Au moins 3 points de filtration y ont été observés en 1999. La hauteur moyenne de l'ouvrage est de 4-6 m côté val et 6-8 m côté Loire. Ce secteur a par ailleurs été équipé du système GeoDetect® développé par la société Tencate. Le corps de digue est constitué de limons et de sables. Il présente une certaine hétérogénéité liée à l'historique de l'ouvrage. Le substratum se situe à une profondeur variant de 10 à 16 m. Il est constitué par les craies recouvertes par les alluvions de la Loire qui atteignent une épaisseur de 10 m environ. En 2008 ce tronçon a fait l'objet d'une étude géotechnique et géophysique (LRPC d'Angers et LRPC de Saint-Brieuc), afin de préparer l'instrumentation pérenne.

Deux lignes parallèles de 48 électrodes (espacées de 2 m) ont été installées dans le matériau de digue sous les couches de chaussée. Les câbles sont implantés parallèlement à l'axe de la chaussée, à une profondeur de 1,20 m par rapport à la surface (crête). La distance entre le câble côté val et les pieds de glissière de sécurité est de 1,90 m environ. L'espacement horizontal entre les deux lignes multi-électrodes est de près de 4 m. L'objectif de cette double ligne d'électrodes est de mieux

caractériser (spatialement et temporellement) le passage d'un front d'infiltration. Les électrodes ont été repérées par GPS avec une précision centimétrique (figure 1).



Figure 1 : Instrumentation de la digue (tranchée et repérage GPS, à gauche) et vue du système d'acquisition (à droite).

Analyse des variations temporelles

Dans cette première phase de 18 mois, le suivi temporel « conventionnel » a consisté à réaliser des tomographies de résistivité mensuelles sur chacune des deux lignes d'électrodes séparément. Les séquences d'acquisition sont constituées de configurations *Wenner-Schlumberger*, *Dipôle-Dipôle* et *Gradient*. Parallèlement, on note l'observation des conditions météorologiques, la température du sol (en surface) et les niveaux d'eaux (piézomètre dans corps de digue et hauteur Loire).

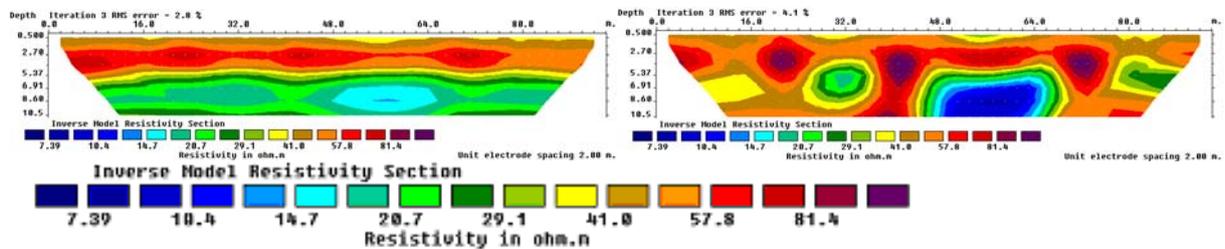


Figure 2 : Coupes de résistivité inversée réalisées en mai 2009 (*Wenner-Schlumberger*) à partir des électrodes enterrées côté val (à gauche) et côté Loire (à droite).

Les très faibles résistances de contact pour les 96 électrodes (de l'ordre de $1 \text{ k}\Omega$) garantissent des résistivités apparentes de très bonne qualité. Les séquences de résistivités apparentes sont inversées à l'aide du logiciel commercial Res2Dinv (Loke and Barker, 1996). Elles sont d'abord réalisées séparément pour chaque date et pour chaque implantation (val et Loire). L'hypothèse 2D n'est pas respectée, mais il s'agit justement d'une approche « conventionnelle » dont on veut connaître les limites. Pour simplifier, on ne s'intéresse ici qu'aux mesures en *Wenner-Schlumberger*, qui sont par ailleurs robustes vis-à-vis d'une analyse de variations temporelles. La comparaison entre les différentes dates d'intervention montre une grande stabilité des sections inversées. L'allure générale de ces coupes est présentée figure 2. Le site n'ayant pas été soumis à une crue de janvier 2009 à juin 2010, on n'a pu observer le passage d'un front d'eau et on s'attendait à des variations de résistivité faibles (dues uniquement aux variations saisonnières de température et de teneur en eau).

Une analyse plus robuste consiste à inverser directement les écarts temporels entre résistivités apparentes enregistrées à différents instants. On présente figure 3 une série de résultats couvrant la période de juin 2009 à juin 2010. La situation de référence de cette période est montrée figure 2 (mai

2009). On suppose que l'analyse en écarts temporels, sans pour corriger totalement les biais dus à des effets 3D et d'enfouissement des électrodes, les atténue sensiblement.

Certaines des variations de résistivité observées, en particulier vers la surface, s'expliquent par les variations saisonnières de température des matériaux du corps de digue. Vers le bas de la section (profondeurs supérieures à 5 m correspondant aux alluvions sous le remblai), des zones de variations localisées apparaissent à partir de décembre 2009 et se développent jusqu'en juin 2010, notamment entre les abscisses 48 m et 64 m, et de façon beaucoup plus marquée côté Loire. On peut être tenté de relier ces variations aux fluctuations relevées des niveaux de la nappe et de la Loire. Cette comparaison met en évidence des corrélations intéressantes, mais également des paradoxes. Le fonctionnement des deux zones singulières reste à comprendre. Comme déjà évoqué, il faut rester prudent sur certains résultats d'inversion, en particulier sur les forts contrastes atteints (amplitudes des variations). Leur validation, et l'explication des phénomènes à l'origine des variations apparemment contradictoires, devront faire appel à des essais complémentaires à la géophysique.

Conclusion et perspectives

Une expérimentation de longue durée a été montée sur une levée de Loire pour tester et améliorer une méthodologie de surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre par IRE. La démarche proposée impose d'instrumenter préalablement le corps de digue par une ou plusieurs lignes d'électrodes, ce qui garantit une excellente qualité et répétabilité des mesures. Pour la première phase de 18 mois de suivi temporel, une approche « conventionnelle » a été menée. Malgré l'absence d'une montée importante du niveau des eaux, l'analyse temporelle fait apparaître deux zones singulières. Le fonctionnement de celles-ci ne peut s'expliquer simplement et une observation plus poussée va être menée (sondages, prélèvements). L'enjeu est double : i) comprendre le fonctionnement de l'ouvrage et de sa fondation et ii) déterminer la part de biais (inversion, effets 3D) ayant pu éventuellement se propager dans l'analyse temporelle. On pourra alors émettre des recommandations.

A moyen terme, il est prévu d'optimiser les séquences d'acquisition sur la base des informations déjà recueillies (configurations non conventionnelles et « cross-line »). Cette démarche, basée sur des travaux de recherche en cours (Fargier et al., 2010) tiendra compte de la complexité 3D du problème. L'objectif sera alors de permettre une surveillance « presque 3D », bien que basée sur un dispositif d'acquisition raisonnable.

Références

- Fargier, Y., Palma Lopes, S., François D., Fauchard, C., and Côte, P., 2010, Optimization of electrode layouts for 3D-resistivity imaging: application to water infiltrations in an experimental dike. Near Surface 2010 – 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Zurich, Switzerland, 6 - 8 September 2010
- Fauchard, C., Mériaux, P., 2004, Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues, Guide pour la mise en oeuvre et l'interprétation, Editions Cemagref, 124p.
- Johansson, S. [1997] Seepage monitoring in embankment dams, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Loke, M. H. and Barker, R. D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

Remerciements

Nous remercions la DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne, le CETE de l'Ouest, la DDT 49, la DDT 44, le LCPC (Opération de Recherche SOLEM), le PN ERINOH, la Région des Pays de la Loire, et Théophile Guillon (Master 2008 au LRPC d'Angers).

Mots clés : Imagerie de Résistivité Electrique, Surveillance, Digue en terre, Infiltration.

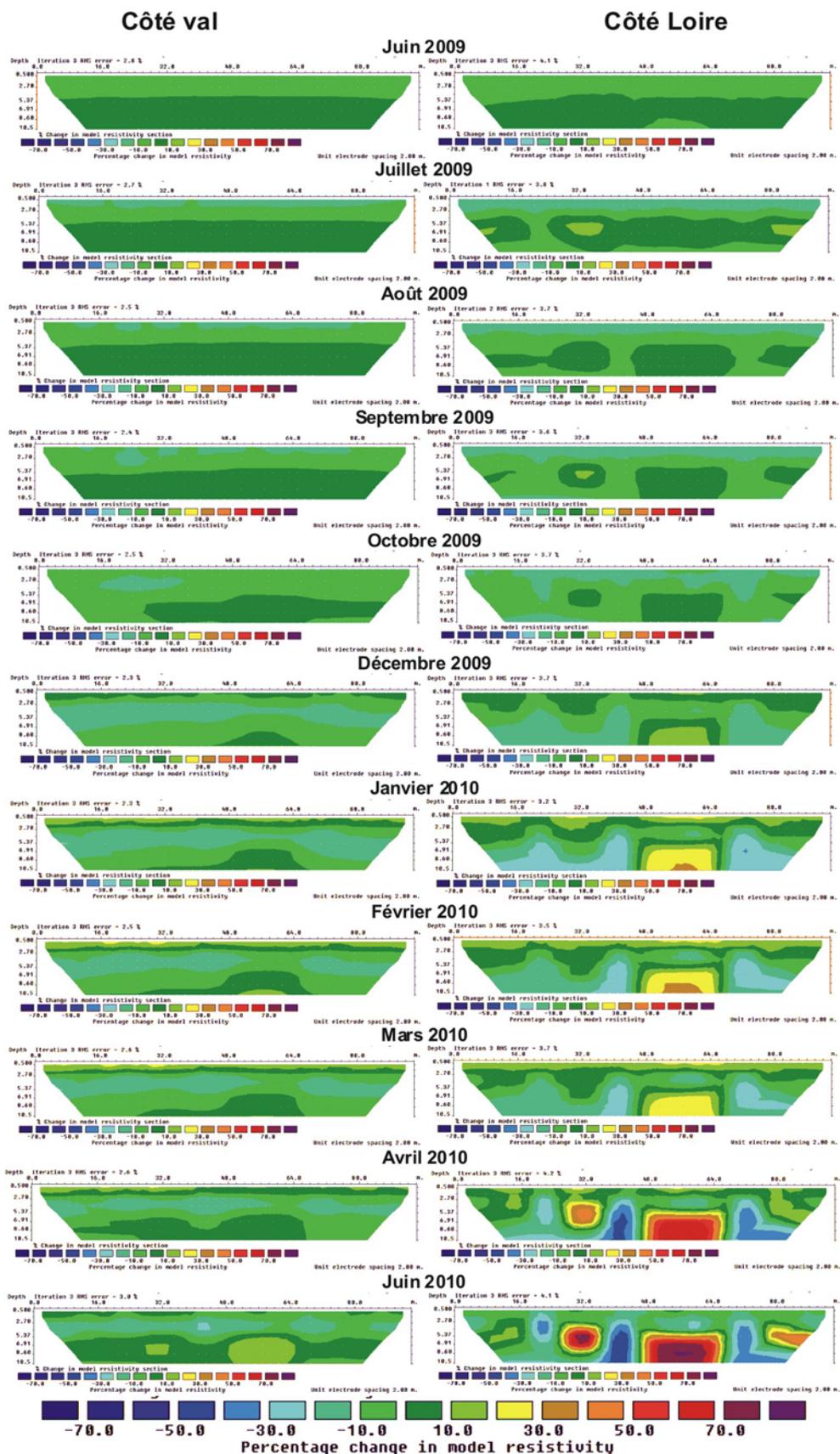


Figure 3 : Coupes des variations relatives (%) de résistivité inversée obtenues de juin 2009 à juin 2010 (Wenner-Schlumberger) par rapport à la situation de mai 2009 (fig. 2).

Calcul de cubature par panneaux électriques (tomographies de résistivité)

Olivier Fontanarava, Pierre Frappin
EDG, olivier.fontanarava@geophy.eu

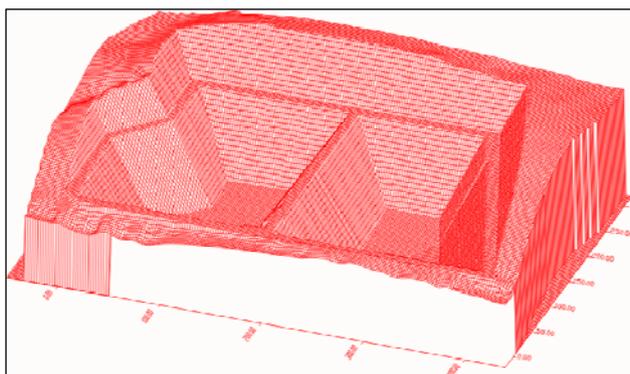
Abstract

This work highlights the particular interest of 'electrical panels' (ERT) method applied to cubature calculation. This survey has been settled in Dordogne, France, in order to estimate the amount of different materials involved in the project of a new water reservoir realization.

Introduction

E.D.G. est intervenue sur un site proche de Nontron en Dordogne, dans le cadre de la réalisation d'une retenue d'eau. L'intervention d'E.D.G. avait pour but d'estimer les volumes des différents terrains en place afin de définir un plan de valorisation des déblais calcaires par un exploitant carrier.

La prospection géophysique a été réalisée par panneaux électriques et inversion 3D des résultats. Ce travail présente la synthèse des résultats obtenus sur ce site et l'intérêt de cette méthode pour le calcul de cubature.



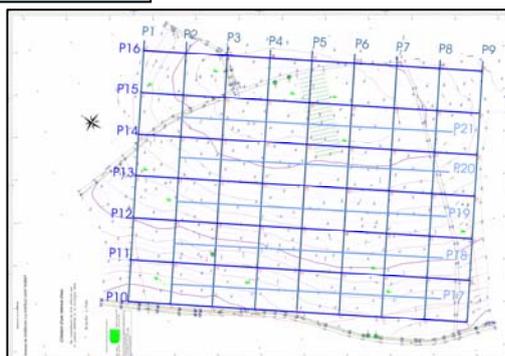
Représentation du projet de retenue d'eau par le logiciel Descartes Modélisation

Mise en œuvre et traitement

Le site d'étude a été couvert par 21 panneaux électriques répartis sur un quadrillage de maille principale de 50 m par 50 m et resserrée à 25 m sur sa partie centrale comme le montre la figure suivante.

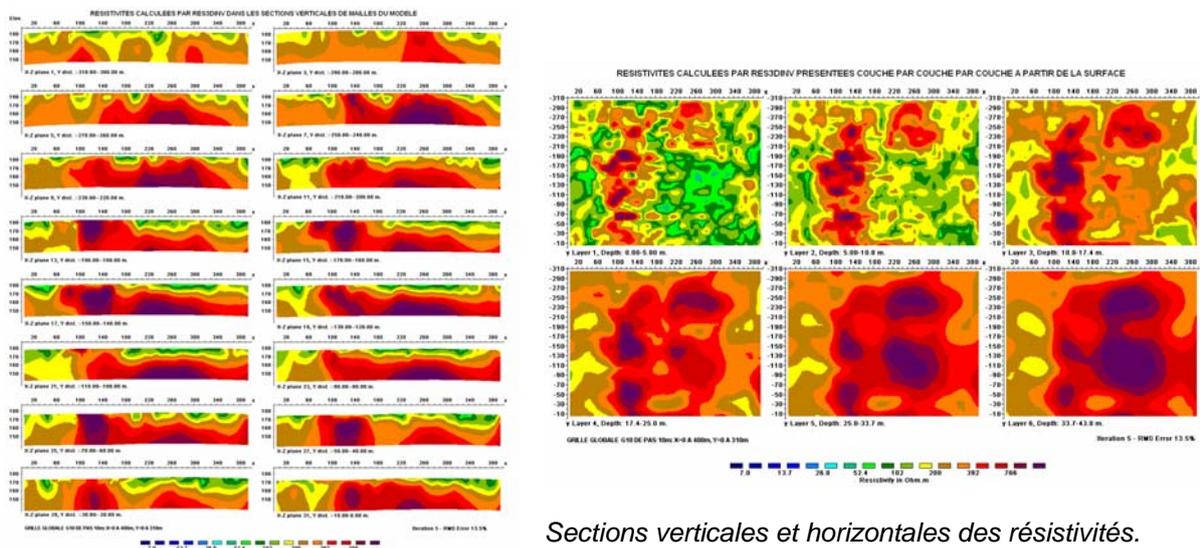
Les panneaux ont été réalisés sur des longueurs de 315 à 400 m de longueur avec un écartement entre électrodes de 5 m en mode Schlumberger pour une profondeur d'investigation maximale de 35 m.

Implantation des 21
panneaux électriques



Les données compilées ont été inversées par RES3DINV afin d'obtenir une représentation en 3 dimensions des résistivités des terrains en place.

De ce traitement, nous avons pu extraire les sections 2D verticales de résistivité mais surtout une interpolation en coupes horizontales des contours d'iso-résistivité à différentes profondeurs.



Sections verticales et horizontales des résistivités.

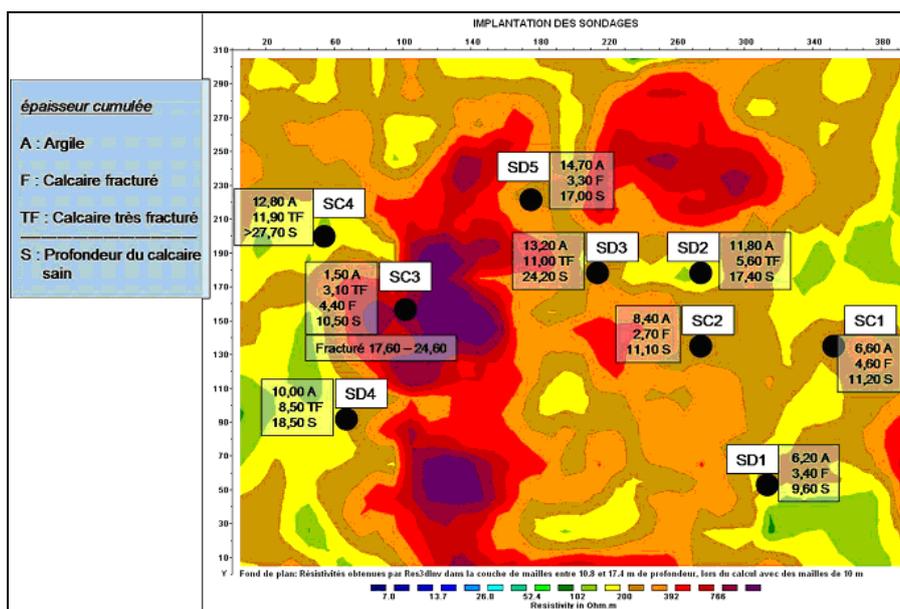
Interprétation

Plusieurs trous à la pelle réalisés sur site avaient montré de fortes variations géologiques avec des zones de calcaire sain affleurant et des terrains argileux présents sur de 3 m d'épaisseur.

Les sections 2D obtenues par panneaux ont bien montré le caractère très hétérogène de la zone, qui présente, entre autre, une faille d'orientation NE-SO sur la partie NO de la zone d'étude.

Suite à cette prospection, 9 sondages de contrôle ont été implantés en ce basant sur le résultat de la cartographie comprise entre 11 et 18 m de profondeur dont les résultats synthétiques sont présentés sur la figure suivante.

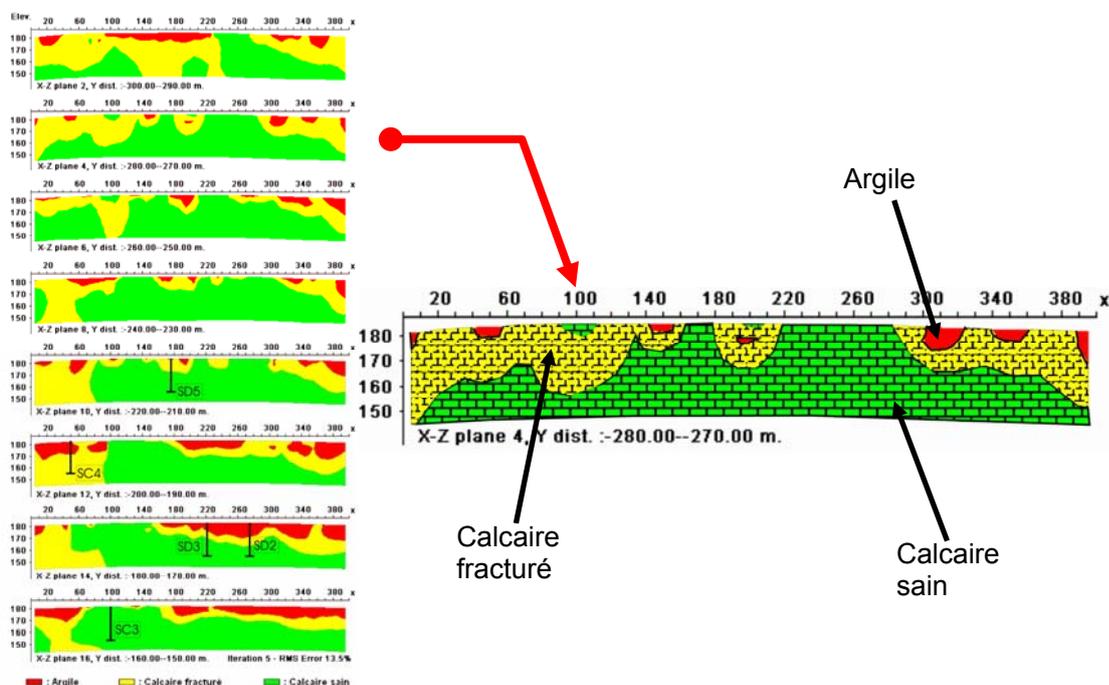
Les résultats de ces sondages de contrôle ont permis de corroborer les fortes variations géologiques observées par panneaux et de caler des résultats obtenus en fixant pour chaque limite de terrain une valeur de résistivité (Argile, Calcaire fracturé et Calcaire sain).



Carte de synthèse des résultats des sondages de contrôle reportés sur la cartographie 11-18 m.

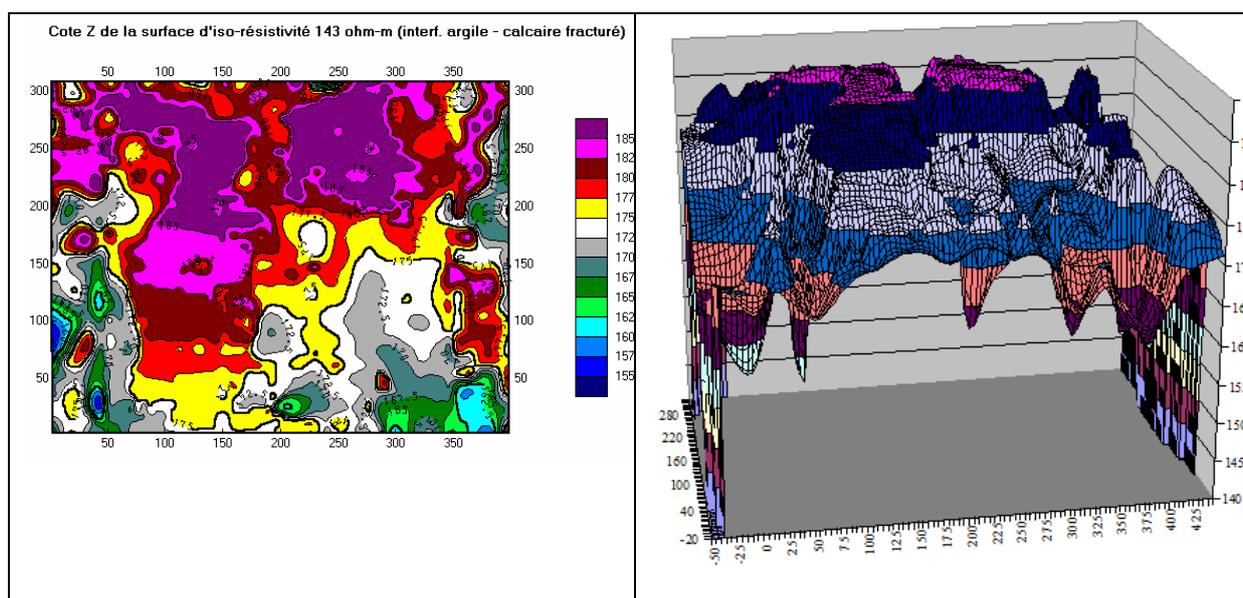
En corrélation avec les résultats de sondages, nous avons estimé que l'interface Argile/Calcaire fracturé pouvait être établie à **140 Ohm.m** alors que la limite Calcaire fracturé/Calcaire sain pouvait correspondre à l'iso-résistivité **280 Ohm.m**.

A partir de cette constatation nous avons pu traduire nos sections et cartes de résistivité en termes géologiques.

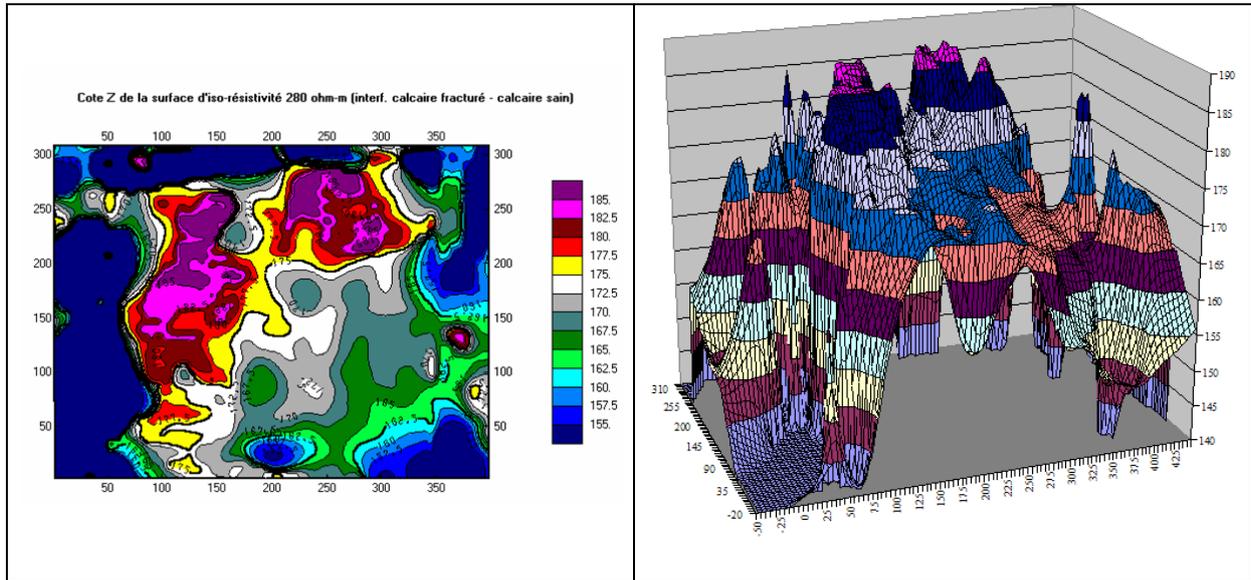


Exploitation des données

Le volume obtenu a été traité par un de nos logiciels permettant de fixer une valeur de résistivité et de délimiter dans ce dernier les valeurs d'altimétrie correspondantes. On obtient ainsi des cartes d'altimétrie d'iso-résistivité traduisant les limites géologiques.



Carte et représentation de l'interface Argile/Calcaire fracturé (143 Ohm.m) doc. E.D.G. et SHE



Carte et représentation de l'interface Calcaire fracturé /Calcaire sain (280 Ohm.m) doc. E.D.G. et SHE

Une fois ces limites géologiques reconnues, il nous a été possible d'estimer les volumes respectifs des différents terrains à extraire en calculant les différences d'altimétrie entre la surface, les différentes limites de couches reconnues et les côtes du projet.

Résultats

En traitant par inversion 3D, avec le logiciel RES3DINV, les panneaux électriques réalisés sur le terrain, nous avons obtenu un modèle de résistivité du sol. Le logiciel E.D.G. Prlsopaq a ensuite permis d'en déduire la géométrie des interfaces à 143 et 280 Ohm.m (valeurs issues du calage des différents sondages). Le calcul de cubature entre ces limites géométriques et celles du projet a été réalisé par le logiciel DTVOLU, qui a donné les résultats suivants :

Nature des déblais	Volume
Argile	422 000 m ³
Calcaire fracturé	375 000 m ³
Calcaire sain	513 000 m ³

Cet exemple d'utilisation des panneaux électriques, suivi d'une chaîne de traitement approprié met en avant l'intérêt particulier de cette méthode pour le calcul de cubature et l'établissement d'un plan de valorisation des déblais.

Extension de carrière : apport de la géophysique dans l'évaluation de l'homogénéité d'un massif calcaire.

Penhouët Yann, y.penhouet@calligee.fr, Calligée Sud-Ouest, Labège Innopole, BP2714, 31312 Labège Cedex,

Bouton Pascal, p.bouton@calligee.fr, **Borne Viviane**, v.borne@calligee.fr, Calligée, Atlanpole, 1, rue de la Noë, BP82118, 44321 Nantes Cedex 3

Abstract

Extensions quarry projects require good knowledge of the homogeneity of the massif in order to assess the economic potential. Study on the village of Salviac combined pure geological approach and electrical and electromagnetic geophysical investigations on the extension project. Karsts observed on the quarry face relates to fractures detected on the extension by geophysical measurements.

Contexte de l'étude

Le projet concerne l'extension de la carrière en roche massive (calcaires) dite « travers de Pechfourque » sur la commune de Salviac (Lot), au Sud-Ouest de la ville de Gourdon. La société Eurovia exploite une surface de 7.57 ha, autorisée par Arrêté Préfectoral jusqu'en 2013. La production représente un total de 60 000 tonnes par an environ. Elle passerait à 200 000 tonnes par an avec la fermeture prévisionnelle de la carrière de Loupiac soit une surface totale de 14 ha. L'extraction sert à la fabrication de granulats utilisés essentiellement pour les travaux publics et le bâtiment.

Le but de la mission était de valider l'homogénéité du massif calcaire par une approche de terrain (étude structurale) complétée par une cartographie géophysique à grand rendement afin de déceler les éventuelles zones inexploitable (failles argileuses ou zones karstiques).

Les moyens mis en œuvre étaient :

- une cartographie géologique par étude des affleurements et sondages à la pelle mécanique ;
- une cartographie géophysique par méthode EM34-3 (Geonics) sur l'extension prévue ;
- un profilage par panneaux électriques (SAS 4000, Abem) ciblé sur les anomalies détectées pendant les deux phases précédentes.

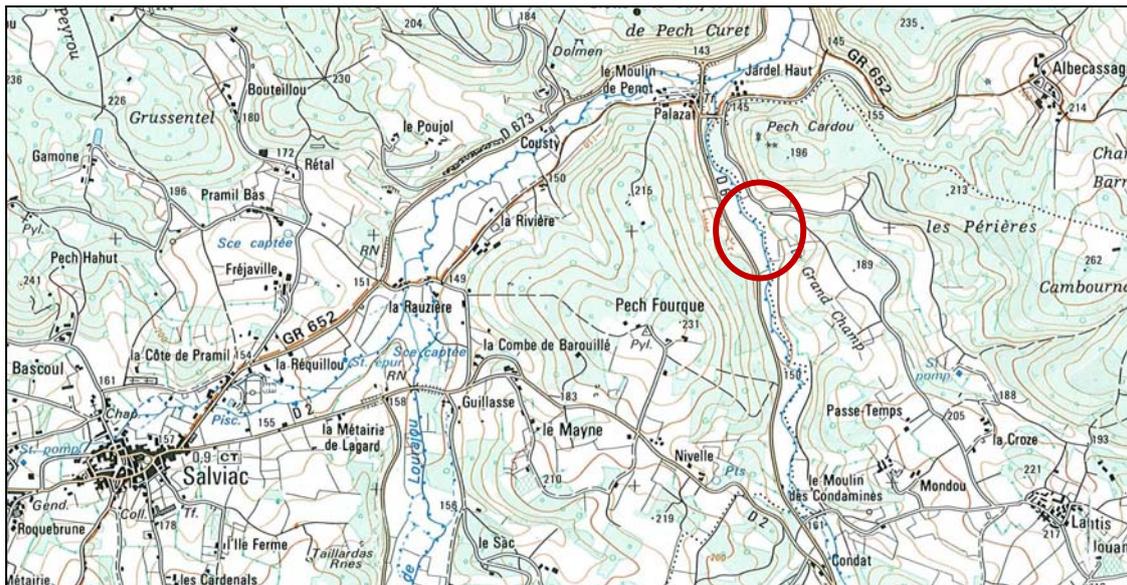


Figure 9 : Situation de la carrière de Pechfourque, sur la commune de Salviac

Géologie du secteur

La carrière exploite deux formations calcaires appartenant toutes deux au Jurassique : la formation de Peyrilles et la formation de Cazals (respectivement Portlandien inférieur et supérieur). Ces deux formations sont des calcaires micritiques. La formation de Peyrilles constitue la plupart du massif exploité. Il se présente sous la forme de bancs décimétriques séparés par des joints de stratification ondulés. La partie supérieure de la carrière est représentée par la formation de Cazals : calcaire en bancs de teinte grise à blanchâtre.

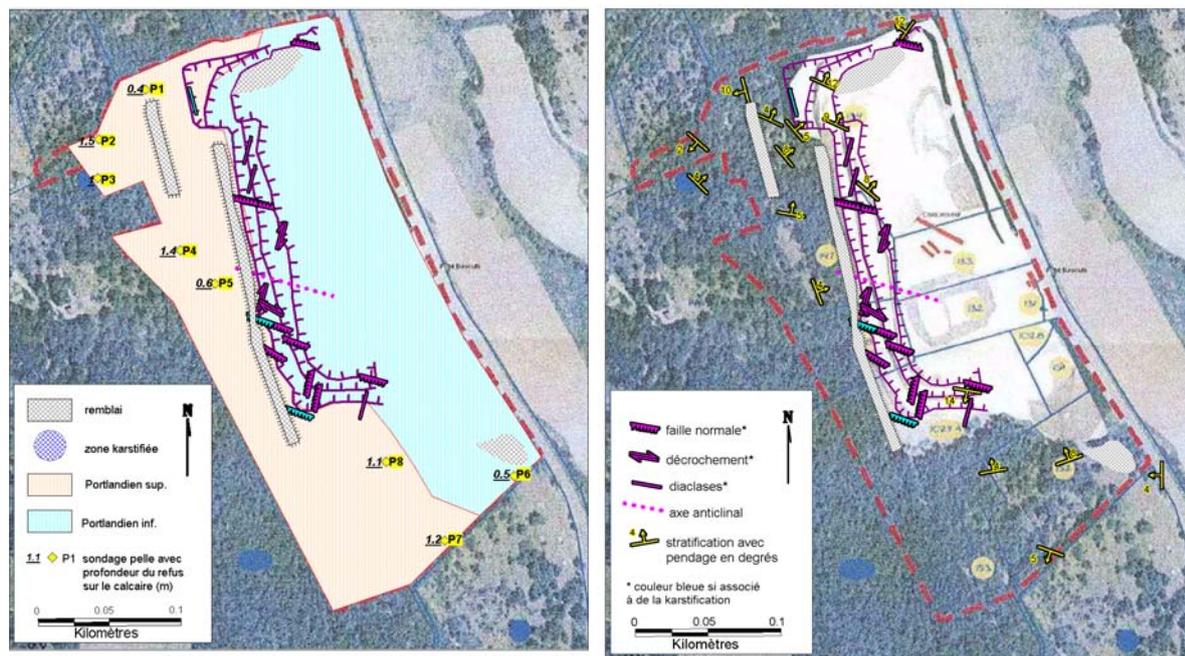
Le plancher du carreau d'exploitation est constitué du Kimméridgien supérieur (marno-calcaire grisâtre). Le projet d'extension est recouvert par des colluvions et des formations de versant peu épaisses.

Les couches ont un pendage dominant et léger vers le nord-est (**figure 2**). Cette organisation est perturbée par des ondulations à grand rayon de courbure, avec notamment une voûture anticlinale visible dans la partie médiane de l'exploitation. Certaines failles entraînent également une déformation locale des strates. Deux types de failles ont été reconnus (**figure 2**) :

- Un système dominant de failles normales de direction moyenne N115°E, avec un jeu maximal de 3 à 4 m. Ces failles sont surtout abondantes dans la partie sud de la carrière.
- Des décrochements subverticaux senestres N20°E (à stries subhorizontales), associés parfois à des décrochements conjugués dextres N120°E.

Enfin, les couloirs de diaclases (fracture sans mouvement identifié) N20°E sont fréquents. Ils sont probablement liés aux décrochements N20°E.

La karstification est assez peu développée en carrière et ne paraît pas devoir l'être beaucoup plus dans l'extension. Elle est liée à deux types de failles, mais localement favorisée par le contact stratigraphique entre les niveaux 1f et 2. La paroi sud-ouest de la carrière a évidé deux anciennes dolines à colmatage d'argile rouge ferrugineuse.



Cadre géologique de la carrière de Pechfourque (Salviac)

Cadre structural de la carrière de Pechfourque (Salviac)

Figure 10 : Cadres géologique et structural de la carrière de Pechfourque.

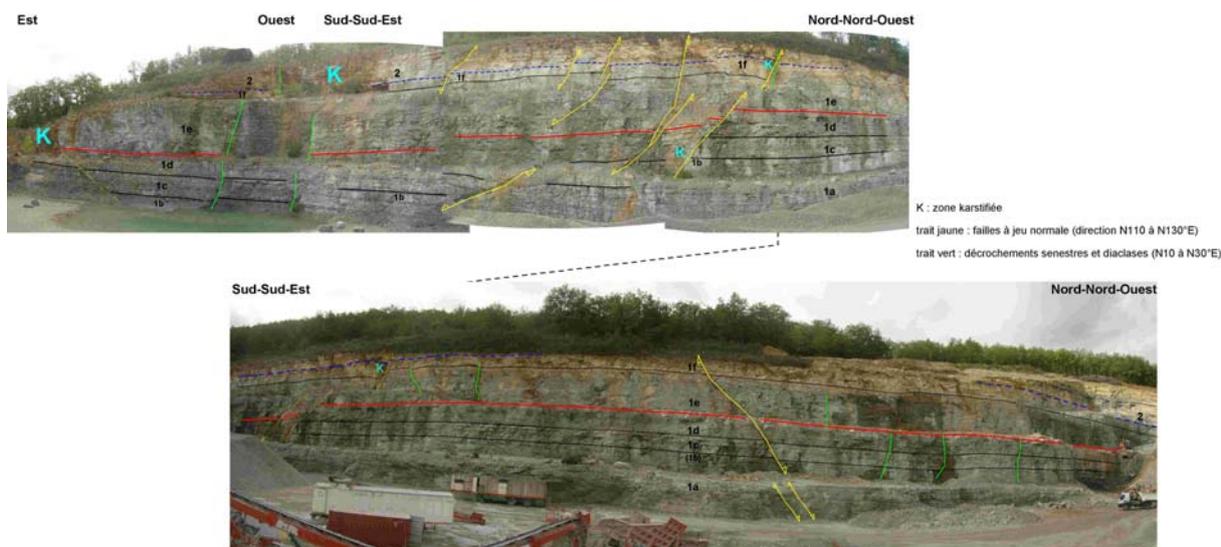


Figure 11 : Interprétations stratigraphique et structurale de la carrière de Pechfourque.

Mesures électromagnétiques

Les mesures ont été réalisées avec un EM34-3 (Geonics) avec quatre dispositifs de mesures (écartement des bobines de 20 et 40 m permettant des profondeurs d'investigation théoriques croissantes de 15, 30, 30 et 60 m).

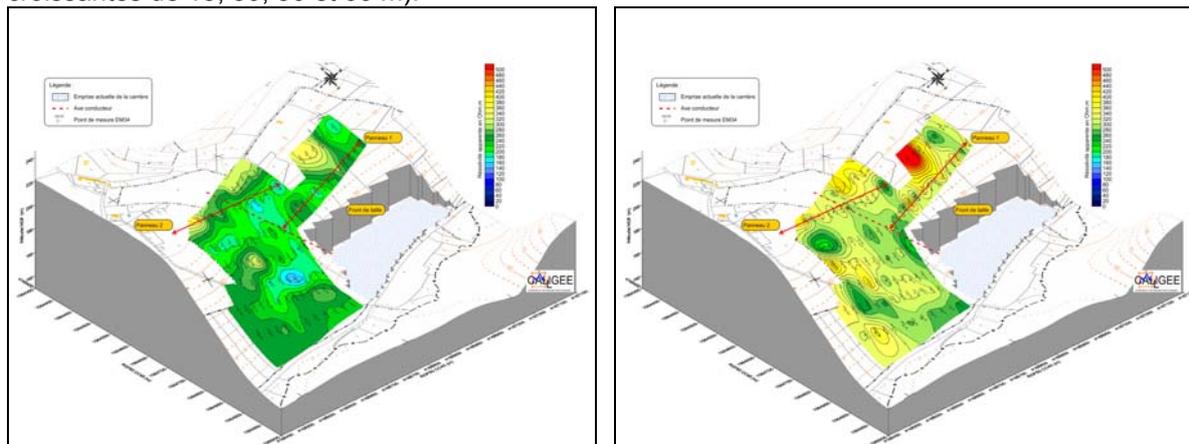


Figure 12 : Cartes de résistivités apparentes produites par la cartographie électromagnétique (dispositifs 20 m horizontal et 40 m horizontal).

Les résistivités se répartissent suivant des axes NNW-SSE, alternant des résistivités moyennes et des résistivités faibles. D'autre part, les résistivités les plus élevées sont rencontrées à l'Ouest du secteur étudié. Cette répartition peut correspondre à la stratigraphie du Portlandien. La pente étant importante, la carte recoupe les bancs calcaires subhorizontaux de compositions minéralogiques différentes. Ces différences de composition s'expriment par des variations de résistivités.

Cette répartition est perturbée au centre de la carte et à partir du coin Sud du front de taille. En effet, la carte présente une zone faiblement résistante mettant en relation deux alignements faiblement résistants NNW-SSE. Il faut rappeler que ce coin Sud est le siège d'une fracturation du calcaire et d'une faible karstification (observations réalisées sur le front de taille).

Les différentes cartes réalisées par EM34-3 révèlent ou confirment plusieurs points :

- La faille au Sud de la carrière visible sur le front de taille a un prolongement sur l'extension prévue (direction NE-SW).

- Les faibles conductivités mesurées conduisent à penser que la karstification est peu développée et qu'il s'agit plutôt d'un « broyage » de matériaux colmaté par de l'argile que de poches d'argiles ou de vides de grandes dimensions.
- La faille pourrait avoir un pendage vers le Sud.
- La faille au Nord de la carrière est détectée jusqu'à environ 30 m de profondeur.
- La largeur des terrains affectés par cette structure est moins importante que celle au Sud de la carrière.

Mesures électriques

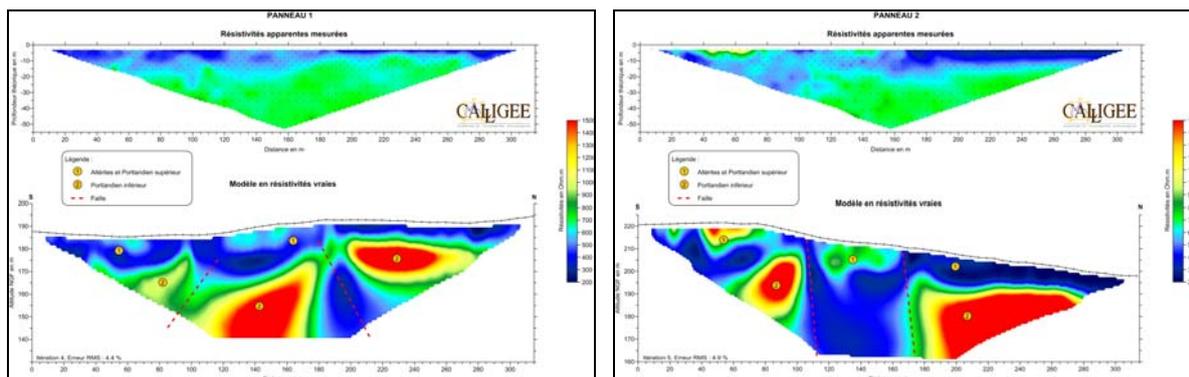


Figure 13 : Résultats des tomographies électriques réalisées sur l'extension.

Les deux zones faillées et karstifiées observées précédemment ont pu être détectées sur les panneaux électriques. Elles montrent des largeurs d'extension importantes notamment au Sud de la carrière. Les épaisseurs de recouvrement du calcaire sont parfois de plusieurs mètres notamment dans la partie centrale de la carrière. Les altérites sont difficilement individualisables du Portlandien supérieur sain.

Le calcaire du Portlandien inférieur semble homogène entre les deux fractures et sur les extrémités Nord et Sud de la carrière. En revanche les pendages sont variables suivant les différentes unités structurales détectées. Le pendage observé au Sud semble être plus important que celui observé sur le front de taille.

Conclusion

Les études d'extension de carrières nécessitent une bonne connaissance des massifs exploités. Le projet d'extension de la carrière de Salviac a été analysé par une approche pluridisciplinaire. Les observations géologiques limitées au front de taille sont prolongées par les interprétations issues de mesures par méthodes géophysiques réalisées sur l'extension de la carrière.

Le faisceau d'informations recueillies a permis de détecter la présence de failles parfois associées à des indices de karstification visibles en front de taille. Les résistivités faibles observées tant sur la cartographie électromagnétique que sur les panneaux électriques mettent en évidence ces structures cassantes au niveau de l'extension de la carrière. Ces résistivités traduisent plutôt une nature de terrains fracturés et peu cohérents. La karstification paraît peu poussée.

Entre ces fractures, le calcaire grisâtre apparaît homogène en bancs décimétriques à métriques. Dans la partie septentrionale, le pendage est de quelques degrés vers le Nord. Dans la partie centrale, les bancs de calcaire sont subhorizontaux. Dans la partie méridionale, le pendage des bancs est fortement marqué vers le Sud.

Les anomalies détectées en géophysique doivent être confirmées par des sondages destructifs jusqu'au toit du Kimméridgien (profondeur d'environ 40 m au niveau du front de taille actuel).

Référence :

BOUTON P., PENHOUE Y. (2006) – Etude géologique et géotechnique, projet d'extension de carrière, Carrière de Pechfourque - Rapport Calligée T06-46078, 32 p.

Mots-clés : carrière, géologie, cartographie électromagnétique, tomographie électrique, karstification.

TOMOGRAPHIES SISMIQUES DIFFÉRENTIELLES : APPLICATION AU SUIVI D'UN PILIER DELIMITÉ PAR DES GALERIES SOUTERRAINES

Philippe COTE¹, Olivier MAGNIN², Jacques MOREL³

1 LCPC, Nantes, France ; 2 TerraSeis, Grenoble, France; 3 ANDRA, Bure, France

INTRODUCTION

Le creusement de galeries souterraines génère l'apparition de ruptures et crée une zone mécaniquement endommagée (Excavated Damaged Zone) au pourtour de la paroi. Par ailleurs, le creusement des ouvrages souterrains génère des reports de contraintes dans leur environnement proche susceptibles de modifier l'état des matériaux dans ces zones. Dans le cadre des études sur la sûreté des stockages souterrains des déchets radioactifs au sein de formations géologiques, il est nécessaire de comprendre et surveiller ces phénomènes autour des excavations, pour prédire leur évolution sur le long terme. L'objectif de cette opération est de suivre l'évolution sur plusieurs années d'un des piliers du laboratoire de recherche souterrain de l'ANDRA à Bure, délimité par 4 galeries (voir localisation et dimension du pilier sur la figure 1).

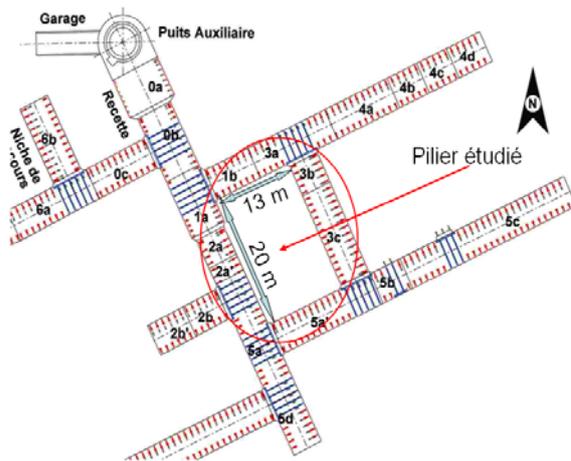


Figure 1 : Localisation et dimension du pilier ausculté

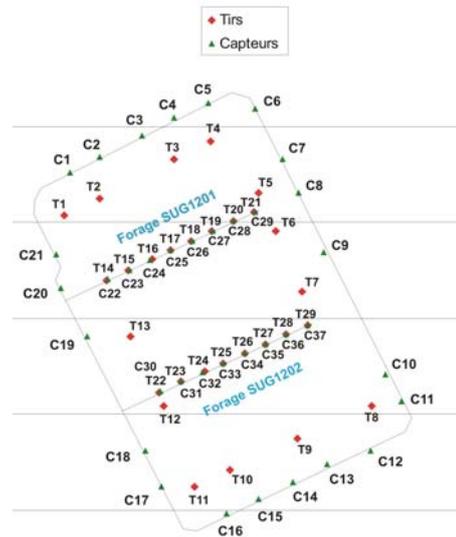


Figure 2 : Géométrie du dispositif d'acquisition

On rappellera que les galeries du laboratoire ont été creusées à la cote - 490 m dans la formation géologique des Argilites de Callovo-Oxfordien. Le pilier a été créé le 8 juillet 2005 (achèvement du creusement de la 4^{ème} galerie).

Cet article présente les résultats des cinq premières tomographies sismiques effectuées respectivement en Juin 2007, Novembre 2007, Avril 2008, Novembre 2008 et Décembre 2009. .

DISPOSITIF DE MESURES

La figure 2 présente la géométrie du dispositif de mesure retenu pour cette étude. Afin de pouvoir réaliser cette tomographie dans les meilleures conditions de taux de couverture possible, il a été réalisé :

- deux forages horizontaux permettant de diviser la surface auscultée en 3 panneaux de dimensions approximativement égales. Ces forages, d'une longueur de 10,5 m, ont été tubés PVC et cimentés par injection de coulis afin de permettre leur mise en eau. Ces sondages ont pu être utilisés

alternativement pour la mise en place de capteurs de type hydrophones, ainsi que pour la réalisation de tirs,

- 21 niches en paroi de galerie afin de pouvoir y installer des capteurs de type accélérométrique,
- 13 forages en paroi tubés et cimentés d'une profondeur de 2 m dans lesquels ont pu être effectués des tirs à l'aide d'allumeurs électriques

Ces aménagements ont permis de réaliser des tomographies avec un nombre total de rais de l'ordre de 800.

Système d'acquisition utilisé :

Tous les capteurs (accéléromètres et hydrophones) sont reliés à une centrale d'acquisition de transitoires Très Haute Fréquence. Cette centrale permet de connecter jusqu'à 30 capteurs. Les signaux sont numérisés à la cadence maximale de 1MHz par voie (1 point toutes les microsecondes), pour une résolution de 12 bits effectifs. Les pointés des premières arrivées sont effectués pour chaque tir relativement au temps 'zero' défini par un dispositif spécifique.

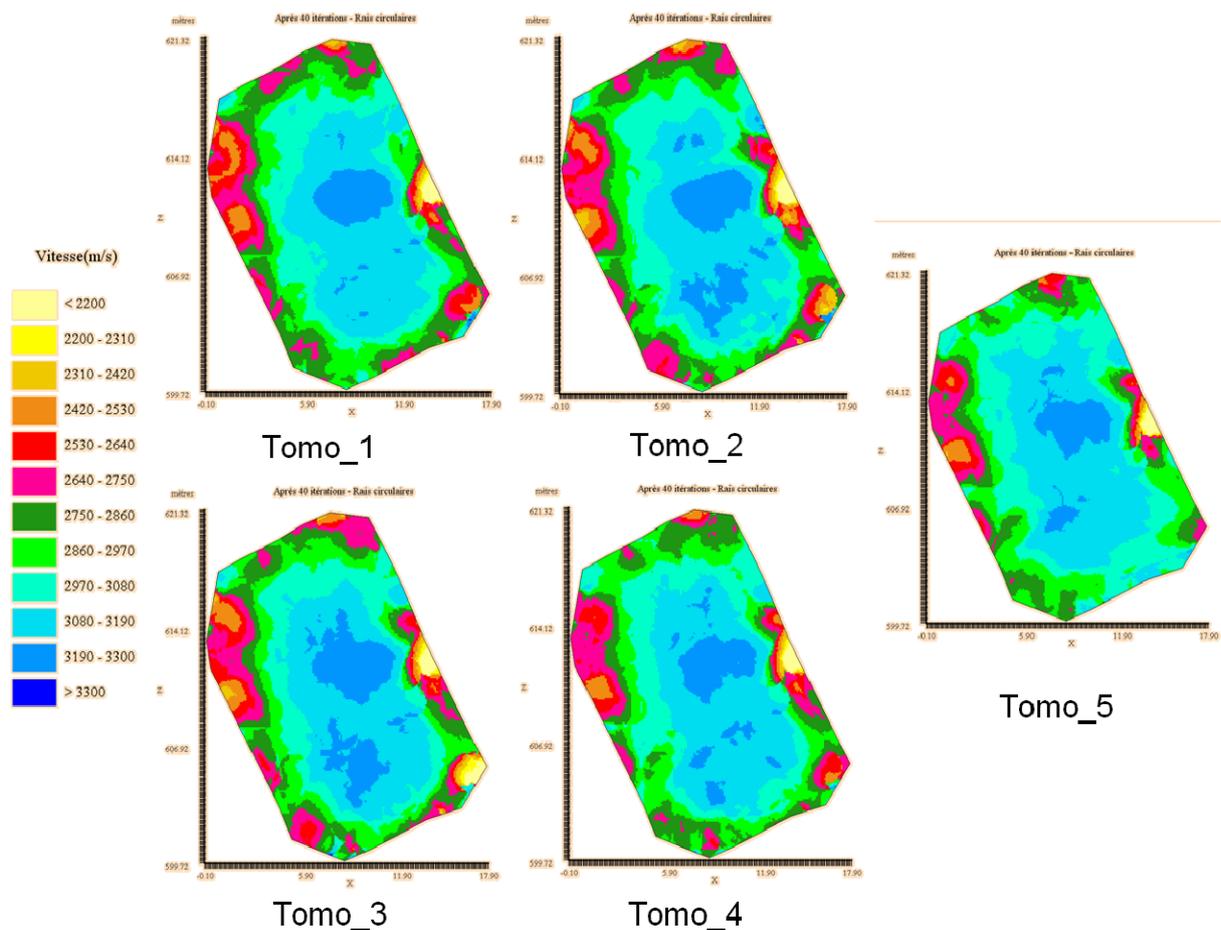


Figure 3 : Comparaison des cartes de vitesses obtenues pour les tomographies N° : 1 (06/07), 2 (11/07), 3 (04/08), 4 (11/08) et 5 (12/09).

RESULTATS

Le logiciel d'inversion utilisé est le logiciel RAI-2D développé par le LCPC. Celui-ci met en œuvre une méthode géométrique itérative qui se caractérise par rapport aux méthodes matricielles, par des temps de calcul beaucoup plus rapides alliés à une très grande souplesse d'utilisation, permettant ainsi de multiplier les inversions et d'optimiser les résultats en choisissant au mieux les paramètres

d'inversion et le modèle initial utilisé. Un des paramètres importants de réglage de cet algorithme est le rayon d'influence (équivalent d'une résolution spatiale déterminée a priori) qui définit en quelque sorte le « lissage spatial » opéré par le processus.

La version utilisée tout en restant essentiellement un programme d'inversion 2D, prend en compte la non appartenance à un même plan des sources et des récepteurs. Elle autorise ainsi une mise à profit des relevés topographiques avec prise en compte des coordonnées X, Y et Z des points d'émission et réception.

La figure 3 permet de comparer les cartes de vitesses obtenues pour les cinq tomographies. Comme on peut le constater, on n'observe pas de variations significatives des cartes de vitesses entre les 5 tomographies.

La différenciation pixel à pixel des images tomographiques V5 et V1 reste confinée dans une plage de l'ordre de +/- 2%. L'image de cette différence est illustrée Fig. 4-Gauche. L'image obtenue n'est pas reliée à une réalité 'terrain' mais plutôt à de fines variations locales de l'état du processus d'inversion. Des variations de cet ordre de grandeur ne sauraient donc être interprétées par ce type de différenciation.

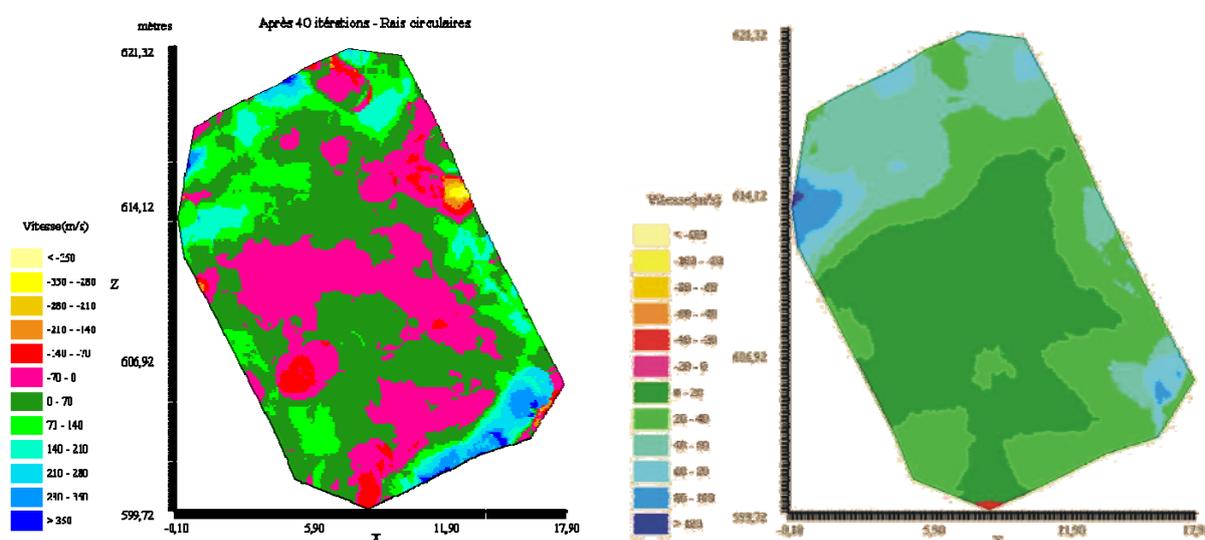


Figure 4 : à Gauche, Différenciation pixel à pixel des tomographies de 1 et 5 ; A droite, inversion différentielle des mêmes tomographies.

TOMOGRAPHIE DIFFERENTIELLE

Les statistiques des inversions de 1 à 5, tant sur les données que sur les vitesses calculées restent confinées dans des gammes très faibles (inférieures à 2 %). En conséquence, toutes les images portant sur des différences illustrent principalement ce type de gamme de variation. Il convient donc d'examiner ces informations différentielles en ayant en tête que les variations sont très faibles.

Les différenciations pixel à pixel n'ayant pas de sens dans ces gammes de variations, pour tenter de détecter d'éventuelles variations fines des vitesses dans certaines parties du pilier, il convient de partir des données (pointés temporels), de les différencier et d'inverser ces différences en calculant la carte des variations de vitesse dans le pilier (Inversion des différences). Un algorithme spécifique a été développé dans ce sens.

Les différences des données sont illustrées sur la figure 5. L'essentiel des variations des mesures globales entre juin 2007 et décembre 2009 se situent dans un intervalle de l'ordre de +/- 2%. Ces variations incluent d'une part l'ensemble des erreurs liées à la répétition des protocoles expérimentaux (positionnement capteurs et sources, détermination des origines temporelles, pointés des arrivées premières) et d'autre part la contribution d'éventuelles variations internes dans le pilier. La forme seule

de cette distribution ne permet pas d'identifier l'origine de ces variations même si un léger décalage vers des temps plus courts semble perceptible.

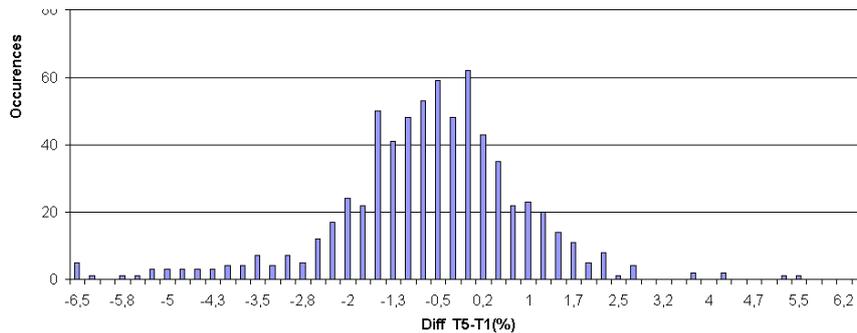


Figure 5 : Différenciation des données des acquisitions N°5 et N°1.

L'inversion de cet arrangement de données conduit à la tomographie différentielle T5-T1 qui est illustrée sur la Figure 4-Droite. Cette image laisse apparaître une certaine structuration spatiale qui explique une partie des données. Cet arrangement est très différent d'un simple bruit spatial aléatoire comme cela avait été observé sur les différenciations précédentes. Cet apparent *arrangement interne* des modifications des vitesses est faible. Comme on peut le constater sur la représentation avec une échelle de +/- 100 m/s, le niveau de variation moyen dans la partie qui semble affectée est de l'ordre de +50 m/s soit une augmentation d'environ 1,7 % des vitesses dans la zone. Le reste des données ne trouve pas d'arrangement spatial cohérent, il s'agit donc de la part d'incertitude liée à la répétition du protocole.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces observations différentielles confirment donc le très haut niveau de précision atteint dans la reproductibilité de ces opérations qui prend en compte : la réinstallation de tout le dispositif ; les tirs avec leur mesure du temps 0 ; les numérisations et enregistrements des capteurs accéléromètres et hydrophones ; les pointés ; les inversions directes ou différentielles.

Par ailleurs, l'inversion différentielle semble mettre en évidence un certain arrangement de variations du milieu entre Tomo1 et Tomo5. Ce sont de très faibles variations comparées au niveau d'incertitude des mesures absolues, cependant au vu de la stabilité des précédentes opérations, il est possible d'avancer qu'en l'absence d'autres informations (liées par exemple à d'éventuelles modifications de la géométrie des sites d'émission et/ou de réception, ou à des modifications ou intrusions internes) les vitesses d'une partie du pilier ont augmenté d'une proportion de l'ordre de 1,7%.

Ces observations montrent donc que des variations de célérité avec des amplitudes dépassant quelques pourcents, qui sont éventuellement générées par la reprise des creusements dans l'environnement proche du pilier (creusement de nouvelles galeries), sont caractérisables par ces investigations.

RÉFÉRENCES

- B. Gaudin , O. Magnin , O. Abraham (2002), *Contribution de la tomographie sismique à la conception et à l'optimisation des fondations d'un ouvrage exceptionnel en site difficile : le pont sur Le Bras de la Plaine à l'île de la Réunion*, Journées AGAP Qualité de Nantes
- Abraham O., Ben Slimane K., Côte Ph., *Seismic tomography : factoring anisotropy into iterative geometric reconstruction algorithms*, International Journal of Rocks Mechanics and Mining Sciences, 35(1), 9931-41, 1998.

Imaging near-surface feature using cross-correlation analysis of surface-waves

Kévin. Samyn*, Adnand. Bitri, Gilles. Grandjean (1)

(1) BRGM, Natural Risks and CO2 Storage Security Division, France

**Corresponding author : BRGM, Risks and CO2 Storage Security Division, 3 Avenue Claude Guillemin BP36009 45060 Orléans Cedex 2, France. Tel.: +33 (0)2 38 64 34 54; fax: +33 (0)2 38 64 36 89. E-mail: k.samyn@brgm.fr (K. Samyn).*

Abstract

The detection of shallow objects such as tunnels, karsts, mines and other local heterogeneities is an important but difficult issue in near surface studies. In general, their positions are not known, either because they are not recorded in a database or because location maps are not available. In such cases, geophysical methods can provide a cost-effective solution to detect them from the surface. Classical surface wave imaging has shown great results for detecting caves, voids, old galleries, and bedrock surface. An extension of this imaging technique of lateral variations in near surface shear (S) waves velocity has required a unique approach incorporating the multichannel recording of seismic waves and cross-correlation analysis. The paper reports methodology and results of non destructive near surface investigation using common-receiver gather (CRG) cross-correlation analysis of surface waves (CCASW). The method is based on the extraction of near surface perturbations, by correlating, trace by trace, each shot gather on a seismic line with a pilot shot. Resultant correlation traces having a common receiver are gathered and stacked in the time domain. Finally, a 2D surface waves section is reconstructed. Continuous tracing of surface waves dispersion patterns, without estimating the phase velocity variations is then obtained. Numerical modelling and Field applications have been performed with the purpose of studying the feasibility of detecting near-surface features (void, karsts, structural heterogeneities) using CCASW method. Amplitude and phase contrast of the surface waves structure, demonstrate the capability of the method to detect near surface mechanical properties perturbations of a medium. A designed surface waves migration algorithm then permits to retrieve the real position of a diffracting event on the CCASW section.

Methodology of the CCASW

Acquisition for field experiments

Data were acquired along linear profiles. To increase the speed and efficiency of data recording and thereby keep acquisition costs down, a multichannel seismic cable has been designed and manufactured. It consists of 24 takeouts at fixed 2m intervals. Each takeout is attached to a single self-orientating, gimbals-mounted, vertical geophone. To help ensure proper coupling, each gimbal geophone is housed in a heavy casing (~1 kg). To damp the motion of the sensor around its rotational axis, the inside of the casing is filled with viscous oil. The seismic cable is towed behind a vehicle. A 24-channel Geometrics Stratavizor seismograph was used to record impacts of a weight drop GISCO electronic seismic source. The source-to-nearest-receiver offset was 2m, while the source stations were separated by 10m along the seismic line (Figure. 2). In this way, measurements are realized with multiple covering to optimize the signal to noise ratio.

Data processing

The classical surface wave processing, is the same as in seismic reflection method; First steps of the processing workflow are then (1) killing noisy traces, (2) amplitude correction, (4) low-pass filtering with 50 Hz cut-off frequency to keep only surface waves and remove high frequency body waves and (5) applying static time corrections to correct for triggering delays. After that, dispersion curves for each shot are calculated using the slant-stack method in a common-shot gather, followed by a 1D Fourier transform over the intercept time (McMechan & Yedlin, 1981; Moktar et al., 1988). A dynamic linear moveout (DLMO) is applied using the velocity functions estimated in the previous step, in order to flatten the surface waves. Traces of common-receiver are the stacked to produce a 2D surface waves image. For the CCASW method, the DLMO correction is replaced by a trace-by-trace correlation process of the entire gather, with supplied filter. The pilot shot is chosen, assuming that it has been recorded at a location of unperturbed medium. Correlation traces are then sorted in CRG before to be stacked in the time domain. In this way, perturbations of the medium are extracted without estimating dispersion curves. Figure. 3 shows a comparison between image stacks obtained over a buried built cavity using classical surface waves processing and CCASW. The diffraction is clearly

resolved using CCASW method which presents a better resolution in imaging relative lateral variations of near-surface feature along the seismic line. Seismic Unix program is used for the entire data processing.

Theory

The perturbation in the medium can be retrieved from the cross-correlation of the surface wave recorded before and after the perturbation. The unperturbed wave field $u_{unp}(t)$ can be written as a Feynman path summation (Snieder, 1999) over all possible paths P

$$u_{unp}(t) = \sum_P A_P S(t - t_p) \quad (1)$$

Where t_p is the traveltime along path P, A_p is the corresponding amplitude, and $S(t)$ is the source wavelet. The dominant effect of the perturbation on the waveform arises from the change in the travel time T_p of the wave that travels along each path

$$u_{per}(t) = \sum_P A_P S(t - t_p - T_p) \quad (2)$$

The time-windowed correlation coefficient which gives the quality of a least squares fitting to the original data (pilot shot) is computed from

$$R^{(t,T)}(t_s) \equiv \frac{\int_{t-T}^{t+T} u_{unp}(t') u_{per}(t'+t_s) dt'}{\left(\int_{t-T}^{t+T} u_{unp}^2(t') dt' \int_{t-T}^{t+T} u_{per}^2(t') dt' \right)^{1/2}} \quad (3)$$

Where the time window is centered at time t with record length 2T and t_s is the time shift used in the cross-correlation. When (1) and (2) are inserted in (3), double sums $\sum_{PP'}$ over all paths appear. In these double sums, the cross terms with different paths ($P \neq P'$) are incoherent and average out to zero when the mean of the source signal vanishes. In this approximation we have

$$R^{(t,T)}(t_s) \approx \frac{\sum_{P(t,T)} A_P^2 C(\tau_p - t_s)}{\sum_{P(t,T)} A_P^2 C(0)} \quad (4)$$

Where $\sum_{P(t,T)}$ denotes a sum over the paths with arrival time within the time window of the cross-correlation, and the auto-correlation of the source signal is defined as

$$C(t) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} S(t'+t) S(t') dt' \quad (5)$$

For time shifts ϵ , a second-order Taylor expansion gives $C(\tau) = C(0)(1 - 1/2 \omega^2 \tau^2)$, where ω^2 is the mean-squared frequency of the perturbed wave field that arrives in the time window. Using this gives

$$R^{(t,T)}(t_s) = 1 - \frac{1}{2} \omega^2 \langle (\tau - t_s)^2 \rangle_{(t,T)} \quad (6)$$

Where $\langle \dots \rangle_{(t,T)}$ denotes the average for the wave paths with arrivals in the time interval (t-T, t+T). The time-shifted cross-correlation $R^{(t,T)}(t_s)$ then has a maximum when $t_s = \langle T \rangle_{(t,T)}$, where $\langle T \rangle_{(t,T)}$ is the mean travel time perturbation of the arrivals in the time window. The value of the cross-correlation at its maximum is given by

$$R^{(t,T)}_{\max} = 1 - \frac{1}{2} \omega^{-2} \sigma^2_{\tau} \quad (7)$$

Where σ^2_{τ} is the variance of the travel time perturbations for waves arriving within the time window. Therefore, the mean travel time and amplitude perturbation of the waves arriving in the time window can be extracted from the recorded data using cross-correlation analysis with a repeatable source and multiple receivers. These perturbations can then be distinguished among others on the basis of the time-shifted cross-correlation. A constant change δv in the velocity for fixed location of the defect will create a perturbation of the medium. The mean travel time perturbation is given by $\langle \tau \rangle_{(t,T)} = -(\delta v/v)t$. The velocity change follows from the time of the maximum of the time-shifted cross-correlation function

$$\frac{\delta v}{v} = - \frac{\langle \tau_{t,T} \rangle}{t} \quad (8)$$

Numerical modelling

In the numerical example (Figure. 1a), the wave field for a medium consisting of constant velocity ($V_s=600\text{m/s}$), perturbed with a low-velocity ($V_s=400\text{m/s}$) vertical dyke situated at the centre of the model is computed with the use of a finite-difference velocity-stress time domain formulation (Virieux 1986; Levander 1988) of the viscoelastic wave equations (Robertsson et al. 1994). 57 channels spaced by 1m were computed and source stations were separated by 2m along the seismic line. A CCASW is realized on the synthetic data and the time of the maximum of the time-shifted cross-correlation function is used in equation (8) to retrieve the inferred change δv of the dyke in the constant velocity of the medium and shown in Figure. 1b as a function of the distance at the surface. The change δv in the velocity of the medium does not depend on the center time of the window used for the cross-correlation. The value of $|\delta v/v|$ obtained from CCASW of the 50 seismic records is well correlated with the true value of -33% velocity change at the surface location of the defect. This provides a consistency check of the method. The positive time-shifted cross-correlation between surface locations 140 and 157 is due to a boundary effect.

Results of field experiments

Void

A field test over a known collapsed cavity (Fig. 4a) has been carried out at the top of a levee of the "Loire" river (France) as an application test of the CCASW method. Surface waves are dispersive, this means that each frequency component of the wave travels at a different velocity, in the sense that smaller and larger wavelengths are respectively influenced by the seismic properties of the shallower and deeper parts of the media. A second high-pass frequency filtering (20Hz-40Hz) is then applied according to the expected shallow depth of the target. Figure. 4b shows the obtained image stack using CCASW. At the position X~330, the cross-correlation section presents an attenuation event corresponding to the void effect. We note that no strong diffracted field is visible, compared to the built cavity case (Figure. 3). The observed amplitude contrast corresponds to an area of low mechanical properties probably due to weathered materials in the levee below the location of the collapsed cavity.

Karst structure

A field test over a supposed karst structure has been carried out in the region "centre" (France) where karst events, due to water flows in limestones, are quite common. This time, a second low-pass frequency filtering (5Hz-25Hz) has been applied to data before cross-correlation because of the high depth of the target (around 20m), according to available data bases. Figure. 5 shows the image stack obtained using CCASW. One can see that a defect is clearly resolved, with a time-shifted cross-correlation between locations X~630 and X~800. It probably corresponds to the expected karst structure below the observed surface disorders which are given by the available data bases and reported on the cross-correlation section.

Conclusion and discussion

This paper presents a quite novel approach to seismic imaging, based on CCASW method which permits to extract the perturbations of a medium without estimating the dispersion of surface waves. Its overall performance, developed in this study, proves that it is a simple, reliable, and very sensitive technique to lateral variations of near-surface mechanical properties. It is applicable to the detection of

a variety of defects (voids, karsts, structural heterogeneities etc.). The area of its feasible applications includes also the characterisation of material property, assessment of integrity, and surface profile control for many kinds of geotechnical and environmental studies. The main improvement to bring to this method is the definition of an accurate depth position of seismic events on the CCASW section. On a matter of fact, CCASW only provides qualitative information about depth, according to the frequency range used as an input of the cross-correlation process.

References

- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology: W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Debeglia, N., Bitri, A., and Thierry, P., 2006, Karst investigations using microgravity and MASW; Application to Orléans, France.
- Dorman, J., and Ewing, M., Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and Crust-Mantle structure in the New York-Pennsylvania area: *J. Geophys. Res.*, 67, 5227-5241.
- Foti, S., (2000) Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves, Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica.
- Grandjean, G., and Bitri, A., (2006) 2M-SASW: inversion of local Rayleigh wave dispersion in laterally heterogeneous subsurfaces: application to Super-Sauze landslide (France). *Near Surface Geophysics*, 367-375.
- Hermann, R.B., 1987. Computer programs in seismology. Saint-Luis University, USA.
- Levander, A., 1988, Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, 53, 1425-1436.
- McMechan G. A., and Yedlin M. J., 1981, Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics* vol. 46 p. 869-874.
- Moktar, T.A., Herrmann R.B. and Russel, D.R., 1988 Seismic velocity and Q model for the shallow structure of the Arabian shield from shot-period Rayleigh waves. *Geophysics* 53, 1379–1387.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J., 2000. Multichannel seismic surface-wave methods for geotechnical applications. Proc. of the First Int. Conf. on the App. of Geophys. Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, December 11–15.
- Robertsson, J., Blanch, J. & Symes, W., 1994, Viscoelastic finite-difference modelling, *Geophysics*, 59(9), 1444-1456.
- Stokoe, K. H., II, and Nazarian, S., 1983, Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves: Proceeding of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland.
- Stokoe, K. H., II, Rix, G. J., and Nazarian, S., 1989, In situ seismic testing with surface wave: Processing, XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 331-334.
- Virieux, J., 1986, P-SV wave-propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, 51, 889-901.
- Xia, J., Miller, R. D., and Park, C. B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, 64(3), 691-700.

Figures

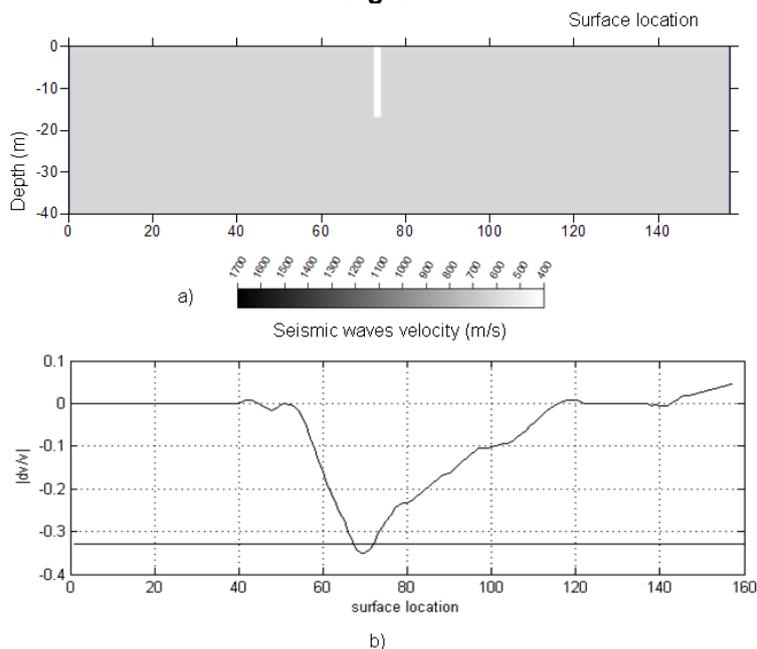


Figure. 1. a) synthetic medium for numerical modelling of surface waves and b) the value of $|dv/v|$ obtained from the CCASW of synthetic data. The true velocity change inferred by the low-velocity dyke $|dv/v| \sim -0.33$ is shown by horizontal black solid line.

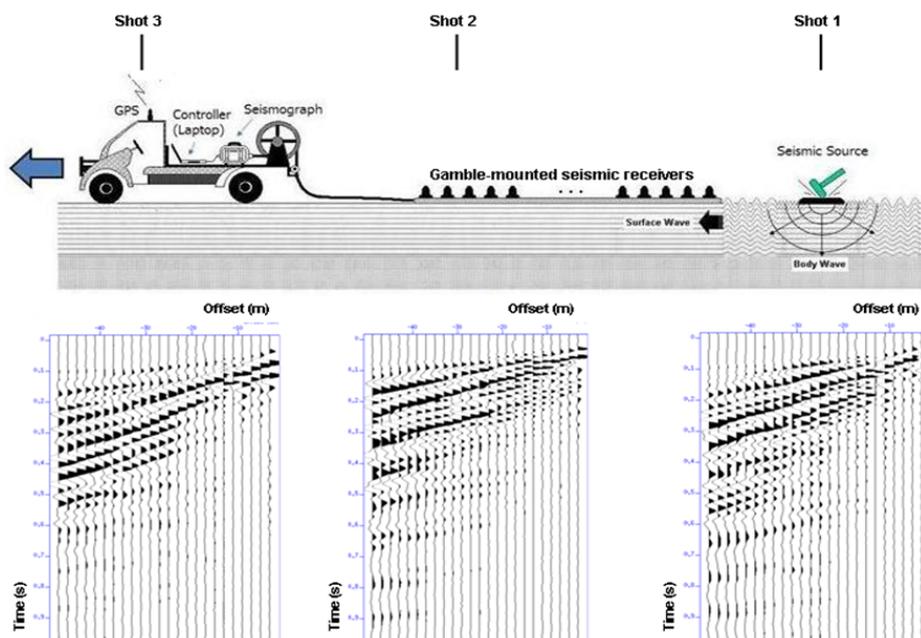


Figure. 2. Example of raw field data recorded with a 24 gimbals geophones streamer towed behind a vehicle.

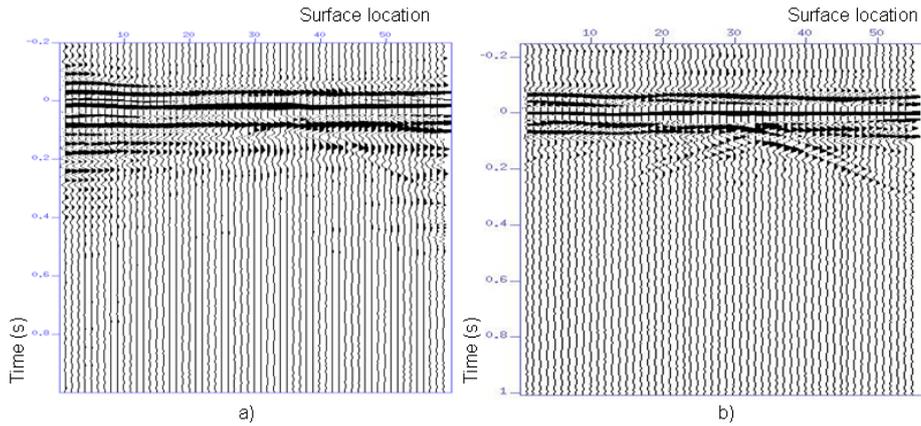


Figure. 3. Comparison between surface wave image stack of a buried built cavity, obtained with a) classical dmo processing of surface waves and b) CCASW. The diffraction is more clearly resolved using CCASW.

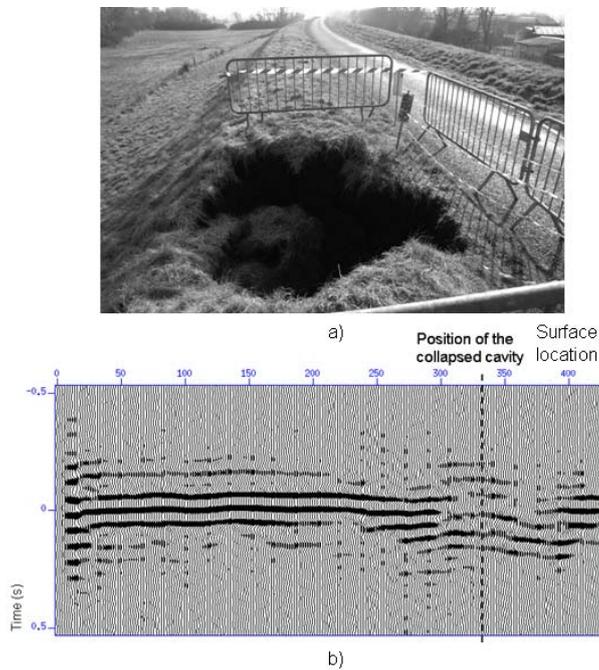


Figure. 4. a) Photography of the investigated collapsed cavity. b) image stack obtained using CCASW. A strong amplitude attenuation is visible between positions X~310m and X~360m and centered on the position of the cavity.

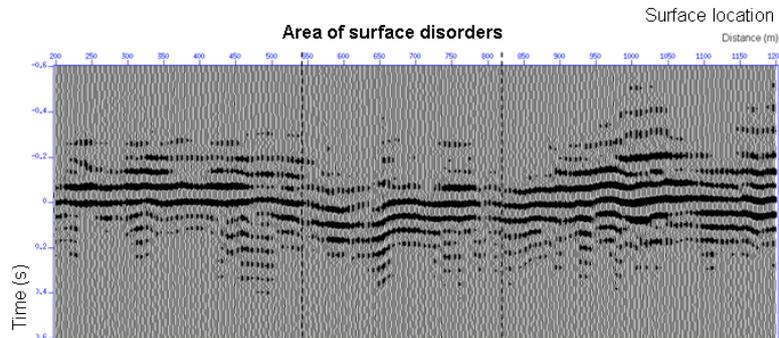


Figure. 5. Image stack obtained using CCASW over a suspected karst structure. A time-shifted cross-correlation is visible at the location of observed surface disorders.

Keywords

Cross-correlation; Surface waves; Time-shift; Diffraction; Migration

Potentiel de l'inversion des formes d'ondes élastiques pour l'imagerie 2D quantitative de la proche surface.

Francois BRETAUDEAU^{1,2}, Donatienne LEPAROUX¹, Romain BROSSIER³, Odile Abraham¹

¹ LCPC, Nantes, France, donatienne.leparoux@lcpc.fr

² IRSN, Fontenay-aux-Roses, francois.bretauudeau@irsn.fr

³ LGIT, Grenoble, France, romain.brossier@obs.ujf-grenoble.fr

Abstract

Elastic Full Waveform Inversion (FWI) has a great potential to sharply image elastic parameters of 2D heterogeneous structures in the context of near surface geophysics. Application to field data is not yet easy, and the difficulties are not well understood. We present here the application of this method on synthetic data and experimental data generated on a perfectly controlled medium. We show FWI is able to build simultaneously 2D velocity models for both V_p and V_s from experimental data, even when neither surface wave dispersion nor refracted or reflected body waves can be used.

Introduction

Les méthodes d'imagerie sismique classiques ne permettent pas une imagerie quantitative haute résolution des premiers mètres du sous-sol. L'inversion des formes d'ondes sismiques est une approche très prometteuse, permettant d'exploiter toute la complexité des sismogrammes, d'en extraire un maximum d'information, et d'en tirer des images complètes de plusieurs paramètres (par exemple V_p et V_s). Toutefois, l'application de l'inversion des formes d'ondes sur le terrain n'est pas sans poser quelques difficultés, liées notamment aux problèmes de couplage des sources et récepteurs, à la nécessité d'un bon modèle initial, ou encore au choix de la stratégie d'inversion et de régularisation.

Afin de résoudre progressivement les problèmes rencontrés lors de l'application de l'inversion des formes d'ondes sur le terrain, nous avons développé un laboratoire d'expérimentation contrôlée, permettant la génération de données sismiques calibrées sur des modèles réduits parfaitement contrôlés (Bretauudeau 2010, Leparoux et al. 2010). Nous présentons ici, un exemple d'application de l'inversion des formes d'ondes élastiques sur un milieu 2D à faibles contrastes, pour des données dominées par des ondes de surface. Les résultats doivent notamment permettre d'identifier des difficultés liées au caractère expérimental des données, et d'en rechercher des solutions.

L'inversion des formes d'ondes sismiques

La plupart des méthodes sismiques reposent sur des hypothèses simplificatrices fortes, permettant de sélectionner et exploiter un seul type d'information, comme le temps d'arrivée de l'onde P réfractée, les temps d'arrivées des ondes réfléchies, ou encore la dispersion de l'onde de surface. Les méthodes basées sur l'inversion du champ d'onde total visent au contraire à utiliser un problème direct le plus réaliste possible, afin d'exploiter toute la complexité des données sismiques lors de l'inversion (Virieux et Operto 2009). Pour cela, et afin de considérer pleinement l'hétérogénéité des milieux naturels ou anthropiques, le problème direct consiste à calculer par modélisation numérique la totalité du champ d'onde se propageant dans le milieu, pour chacune des positions de source.

Selon l'approche fréquentielle proposée par Pratt (Pratt et Worthington 1990, Pratt 1999), et qui est celle que nous utilisons, les problèmes direct et inverse sont calculés et résolus à chaque fois pour une unique fréquence. La résolution du problème inverse est ensuite obtenue par optimisation locale, en cherchant à minimiser une fonction coût C , fonction de l'erreur entre les données calculées $\mathbf{d}_{calc}(\mathbf{m})$ pour le modèle de paramètre et les données $\mathbf{d}_{obs}(\mathbf{m})$ observées pour chacun des couples source-récepteur :

$$C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \sum_i^{N_{src}} \sum_j^{N_{rec}} (d_{calc,i,j}(\mathbf{m}) - d_{obs,i,j})^* (d_{calc,i,j}(\mathbf{m}) - d_{obs,i,j}) .$$

À chaque itération, la fonction coût est linéarisée autour d'un modèle de départ \mathbf{m}_k , et un nouveau modèle de paramètre est obtenu :

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k - \mathbf{H}^{-1} \nabla_{\mathbf{m}_k} C(\mathbf{m}_k) .$$

$\nabla_{\mathbf{m}_k} C(\mathbf{m}_k)$ est le gradient de la fonction coût C , et \mathbf{H} le Hessian. Le gradient est calculé par un problème direct supplémentaire grâce au formalisme de l'état adjoint. Il peut être vu comme

l'intercorrélation du champ incident avec le champ diffracté calculé par la rétropropagation des résidus à partir des récepteurs. Le Hessien \mathbf{H} n'est généralement pas calculé intégralement et est plutôt remplacé par une approximation du premier ordre ou par une simple constante (Pratt et al. 1998).

Le nouveau modèle de paramètre m_{k+1} est ensuite utilisé comme modèle initial pour une nouvelle itération. Le résultat de la dernière itération est finalement utilisé comme modèle initial pour une nouvelle inversion à une autre fréquence. Plusieurs stratégies pour l'introduction hiérarchique des données en fonction de la fréquence ont été proposées (Virieux et Operto 2009), mais la plus courante consiste à introduire séquentiellement les informations des basses vers les hautes fréquences, de façon à intégrer progressivement dans l'image les nombres d'ondes de plus en plus hauts sans discontinuités (Sirgue et Pratt 2004).

Le modèle initial doit contenir les plus bas nombres d'onde, et peut par exemple être déterminé par tomographie des temps de trajet (Pratt et al. 1996) ou par inversion dans le domaine de Laplace (Shin et Cha, 2008).

Dans les algorithmes que nous utilisons (Brossier 2009), le problème direct est résolu par modélisation viscoélastique 2D en éléments finis, et la recherche de la solution par gradient conjugué. Seuls les paramètres V_p et V_s sont recherchés, les coefficients d'atténuation et la densité étant considérés suffisamment connus.

Modélisation numérique et expérimentale

Afin de pouvoir évaluer les performances de l'inversion des formes d'ondes élastiques sur une application de la proche surface, un milieu à 3 couches horizontales à vitesses croissantes avec la profondeur et une inclusion ovoïdale rigide dans la première couche est construit en résine pour la modélisation expérimentale à l'échelle ultrasonore (figure 1 et 2). Un équivalent numérique est créé pour la modélisation numérique (figure 2). Les dimensions du milieu réel (quelques dizaines de cm) sont présentées ici à l'échelle de la subsurface après application d'un facteur d'échelle de 1/2 sur les vitesses, de 2000 sur les temps (de 1/2000 sur les fréquences), et de 1000 sur les distances. Dans les deux modèles, les vitesses vont donc pour V_p de 1150m/s à 1400m/s et pour V_s de 540m/s à 713m/s. Dans la première couche, on a $Q_p=55$ et $Q_s=22$. L'inclusion rigide est située entre 15 et 20m de profondeur, et ses vitesses sont celles du milieu le plus rapide ($V_p=1400$ m/s, $V_s=713$ m/s), ce qui implique que les contrastes d'impédance sont très faibles, avec des coefficients de réflexion inférieurs à 0.13. Le dispositif de mesure s'étend en surface sur 180m. Il est composé de 37 points de tir et 180 récepteurs uniformément répartis en surface (figure 1). Des données sismiques multioffsets sont ainsi générées sur le milieu réel grâce au laboratoire d'ultrasons MUSC, ainsi que par modélisation numérique. La source utilisée, simule une source de type chute de poids ou masse (force normale), et génère des signaux centrés sur 50Hz, dans la bande 15-125Hz.

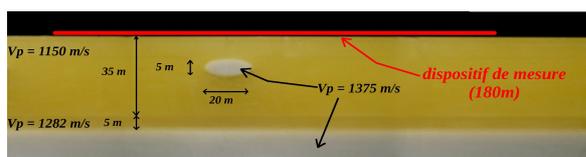


figure 1: Zone d'investigation du modèle réduit en résine. La ligne rouge représente l'emplacement des 37 sources et des 180 récepteurs (dimension ramenée en m).

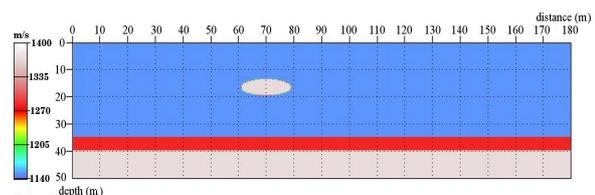


figure 2: Modèle numérique de la zone d'investigation du modèle en résine de la figure 1. Les propriétés mécaniques et les dimensions y sont reportées.

Un exemple de sismogramme obtenu sur chacun des modèles à partir d'un même point de tir est présenté figure 3. Les deux séries de données sont très proches à la fois en terme de temps d'arrivées et d'amplitudes. Chacun des évènements observés sur les données expérimentales est bien reproduit par la modélisation numérique : ondes P et Rayleigh directes (1-2), réflexions et conversions des ondes de volume P et S sur les interfaces (3-4), diffractions par l'inclusion (5), ainsi qu'une diffraction de l'onde de Rayleigh lors de son passage au dessus de l'inclusion (6). Les différences restantes entre les deux jeux de données sont soit du bruit, soit des erreurs d'amplitude liées à l'approximation 2D des codes de modélisation numérique, ou encore un manque de précision des paramètres du milieu utilisés pour la modélisation numérique.

Dans cet exemple, il est à noter qu'il n'y a pas d'ondes réfractées en raison des faibles contrastes et de la grande profondeur des interfaces (35m) au regard des offsets les plus grands (180m), ce qui exclut la possibilité d'utiliser la sismique réfraction ou la tomographie de surface pour imager le milieu. D'autre part, nous observons que l'onde de Rayleigh n'est pas dispersive, ici encore en raison de la profondeur des premières interfaces, ce qui rend inadapté l'inversion de la dispersion des ondes de

surface (Park et al. 1998). Les réflexions des ondes de volume P et S et leurs multiples, de très faibles amplitudes en raison des faibles contrastes, sont masquées par le train d'onde de surface très énergétique, et sont donc difficiles à exploiter par des techniques comme la migration. Enfin, on voit que l'essentiel de l'information sur l'inclusion se trouve dans les diffractions de l'onde de surface, et est également difficilement accessible par les méthodes d'imagerie sismique classiques.

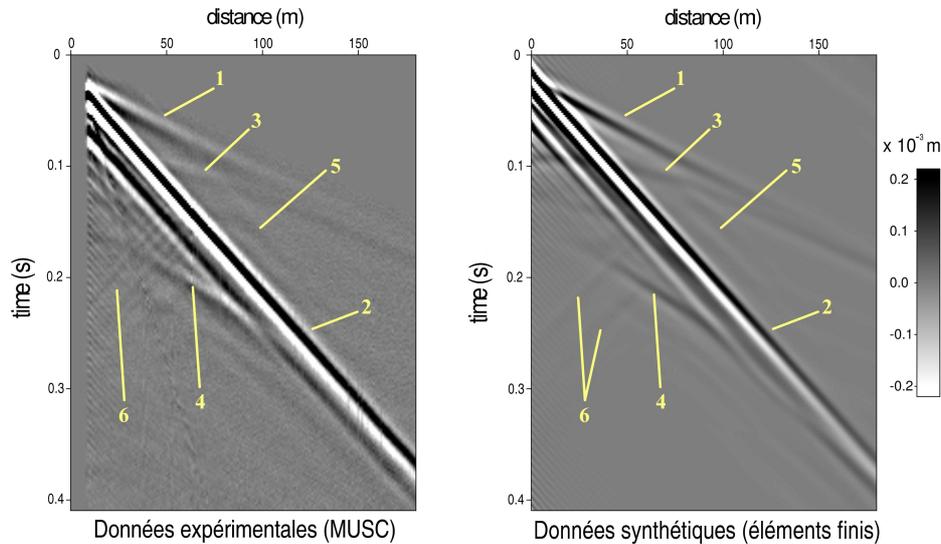


figure 3: Sismogramme obtenu par modélisation expérimentale et numérique. (1) onde P directe, (2) onde de Rayleigh non dispersive (3-4) réflexions P et S sur les interfaces des couches inférieures, (5) diffraction en onde P par l'inclusion, (6) diffraction de l'onde de surface par l'inclusion. Les données expérimentales et synthétiques sont en très bonne adéquation à la fois en terme de temps d'arrivées et d'amplitude.

Résultats

L'utilisation de l'inversion des formes d'ondes élastiques doit permettre, en prenant en compte la totalité des sismogrammes, de tirer parti des informations contenues dans les réflexions et diffractions des ondes de volume, ainsi que dans les diffractions de l'onde de surface, et d'en obtenir des informations quantitatives sur les hétérogénéités du milieu. Les données ultrasonores et synthétiques qui viennent d'être présentées sont inversées suivant une même procédure. Le modèle initial choisi pour cet exemple est un milieu à gradient obtenu par lissage du modèle exact sans l'inclusion rigide. Le modèle initial (figure 4) contient donc les bas nombres d'onde du milieu, le problème est ainsi suffisamment bien contraint pour permettre l'étude du comportement de l'inversion dans notre gamme de fréquences. Les données à 15 fréquences différentes entre 15Hz et 78Hz sont inversées séquentiellement en procédant des plus basses vers les plus hautes fréquences. Les résultats sont présentés sur les figures 4 à 6. Sur ces figures, la courbe noire représente le profil de vitesse vertical passant par le centre de l'inclusion, et la courbe blanche le profil de vitesse exact.

La figure 4 présente les modèles de vitesses initiaux lisses. La figure 5 présente le résultat final d'inversion obtenu avec les données synthétiques. Ces données ayant été générées avec le même algorithme que celui utilisé pour le calcul du problème direct, les données sont parfaitement explicables par l'inversion. Ce résultat montre donc le meilleur résultat auquel l'on peut s'attendre avec cette stratégie d'inversion et ce dispositif de mesure. À la fréquence finale (78Hz), la résolution théorique est $\lambda_p/2=7.4\text{m}$ pour le modèle de V_p , et $\lambda_s/2=3.5\text{m}$ pour le modèle de V_s . L'ensemble du milieu est bien reconstruit, avec toutefois une résolution qui décroît avec la profondeur. La forme ainsi que les vitesses à l'intérieur de l'inclusion sont bien déterminées. Les couches profondes sont détectées, mais la résolution y est insuffisante pour parfaitement imager l'intérieur de la plus petite couche. Quelques oscillations subsistent dans les deux images, en particulier celle de V_s , et témoignent d'une couverture limitée en nombres d'onde verticaux, définie par le couple fréquence-offset. L'image pourrait être améliorée avec un dispositif plus grand ou une gamme de fréquences plus large.

La figure 6 présente le résultat d'inversion obtenu cette fois avec les données expérimentales générées par le laboratoire MUSC. Le résultat pour les deux paramètres est globalement similaire, même si la convergence vers la solution est plus lente, et l'amplitude des paramètres reconstruits est plus éloignée des amplitudes recherchées. Ces différences s'expliquent notamment par la présence de bruit dans les données. Nous observons également l'apparition de plusieurs artéfacts, essentiellement concentrés à proximité du dispositif de mesure. Nous savons en effet que la surface libre augmente la non-linéarité du problème, et que l'imagerie est par conséquent moins stable à proximité de la surface. De petites erreurs entre les données numériques et expérimentales se traduisent alors rapidement par des artéfacts localisés autour du dispositif de mesure.

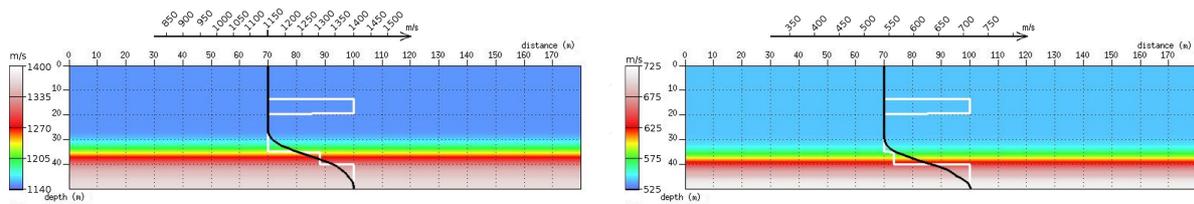


figure 4: Vp (gauche) et Vs (droite) : Modèles de vitesses de départ.

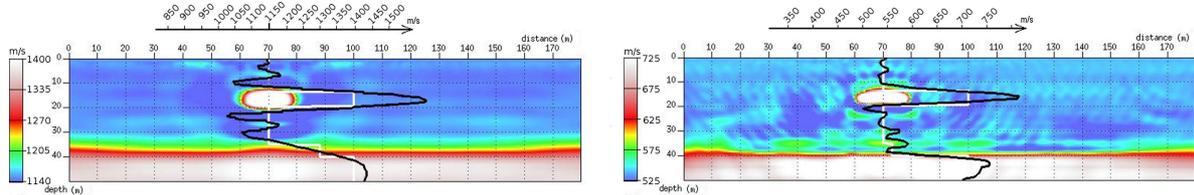


figure 5: Vp (gauche) et Vs (droite) : Résultat final d'inversion (15 fréquences) à partir des données synthétiques.

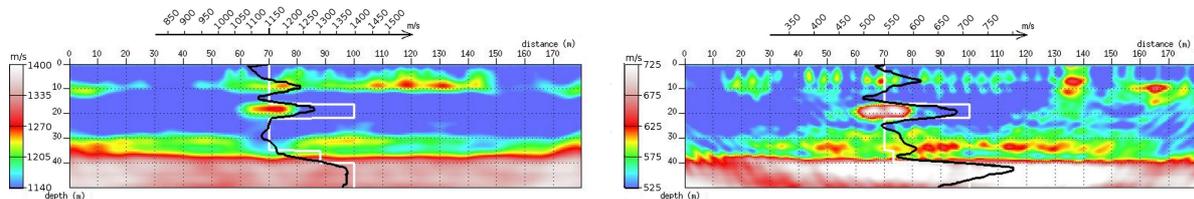


figure 6: Vp (gauche) et Vs (droite) : Résultat final d'inversion (15 fréquences) à partir des données expérimentales ultrasonores MUSC.

Conclusion

Ce travail a permis de mettre en évidence le potentiel l'inversion des formes d'ondes dans le domaine élastique pour la détermination quantitative d'un milieu hétérogène à l'échelle de la proche surface, dans une configuration où l'utilisation d'autres méthodes est inadaptée. En particulier, nous montrons sur des données expérimentales comment il est possible de reconstruire une image haute résolution d'un objet proche de la surface en exploitant les diffractions de l'onde de surface. En outre, la comparaison de résultats obtenus avec des données expérimentales et numériques a permis d'identifier l'apparition d'artéfacts localisés proche de la surface inhérents aux conditions expérimentales.

Références

- Brossier R., 2009, Imagerie sismique à deux dimensions des milieux viscoélastiques par inversion des formes d'ondes: développements méthodologiques et applications, Thèse de l'Université de Nice-Sophia Antipolis.
- Brethaud F., 2010, Modélisation physique à échelle réduite pour l'adaptation de l'inversion des formes d'ondes sismiques au génie civil et à la subsurface, Thèse de l'Université de Nantes.
- Leparoux D., Brethaud F., Laguerre L., Treysede F., Côte P., 2010, Modélisation sismique expérimentale à échelle réduite à l'aide d'un Banc de Mesures Ultrasonore Sans Contact (MUSC) – application à l'analyse de la dispersion des ondes de surface, 11ème Journées de l'AGAP Qualité 2010 à Saint Briec (ce numéro).
- Park C.B., Miller R.D. and Xia J., 1998, Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**(3), 800-808.
- Pratt R.G., 1999, Seismic waveform inversion in the frequency domain, part I: Theory and verification in a physical scale model, *Geophysics*, **64**(3), 888-901.
- Pratt R.G, Song Z.M., Williamson P.R. et Warner M., 1998, Two-dimensional velocity model from wide-angle seismic data by wavefield inversion, *Geophysical Journal International*, **124**(2), 323-340.
- Pratt R.G, C. Shin and Hicks G.J., 1998, Gauss-Newton and Full-Newton methods in frequency-space seismic waveform inversion. *Geophysical Journal International*, **133**(2), 341-362.
- Pratt R.G et Worthington M.H. 1990, Inverse theory applied to multi-source cross-hole tomography. 1-Acoustic wave-equation method. *Geophysical Prospecting*, **38**(3), 298-310.
- Shin C. et Cha Y.H., 2008, Waveform inversion in the Laplace domain, *Geophysical Journal International*, **173**(3), 922-931.
- Sirgue L. et Pratt R.G., 2004, Efficient waveform inversion and imaging : A strategy for selecting temporal frequencies, *Geophysics*, **69**(1), 231-248.
- Virieux J. et Operto S., 2009, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics , *Geophysics*, Vol. 74, No. 6, pp WCC1-WCC26.

Développement et application de méthodes d'imagerie sismique pour la détection des cavités souterraines en milieu urbain

Cyrille Balland¹, Arkadiusz Kosecki¹, Bogdan Piwakowski²

(1) Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, 54042 Nancy cedex, France,

arkadiusz.kosecki@ineris.fr, cyrille.balland@ineris.fr

(2) Ecole Centrale de Lille, BP 48, Cité Scientifique, 59651 Villeneuve d'Ascq, Bogdan.Piwakowski@ec-lille.fr

Contexte et objectifs

L'existence dans le sous-sol de cavités souterraines d'origine anthropique et abandonnées ou naturelles représente un risque potentiel d'effondrement particulièrement sensible en milieu urbain. Dans le cas où la position de ces cavités est connue, la prévention consiste avant tout à cartographier le risque sur un plan d'urbanisation, via un Plan de Prévention des Risques Naturels. Dans le cas contraire, la cartographie des zones d'aléas peut être établie en utilisant des méthodes de reconnaissance. C'est précisément dans ce cas qu'il apparaît essentiel de mettre en œuvre des moyens de reconnaissance du sous-sol appliqués aux cavités souterraines. Leur détection et leur localisation constituent un enjeu technique et scientifique capital dans le processus de gestion du risque.

Dans la plupart des cas, la recherche de cavités s'effectue à l'aide de méthodes destructives, typiquement des réseaux de sondages pour les galeries ou des décapages de surface pour les puits. Le décapage est cependant impossible à appliquer avec un tissu urbain trop important ou avec des remblais trop épais. Par ailleurs, lorsque les cavités sont plus profondes, remblayées ou de petite taille, un maillage de sondages, même dense, ne garantit plus leur détection. Ces différentes conditions défavorables se retrouvent logiquement dans les zones urbanisées où les enjeux et les risques sont les plus élevés. Des travaux de recherche ont donc été conduits pour choisir et affiner des méthodes géophysiques capables de détecter les cavités plus profondes ou sous bâti.

Des travaux récents ont montré qu'en dehors de l'application « classique » pour l'imagerie de la stratigraphie des couches peu profondes, la Sismique Réflexion Haute Résolution est utilisée avec succès pour la détection et la localisation des cavités souterraines (Kosecki et al., 2010, Driad et Piwakowski, 2002; Piwakowski et Leonard, 2000). Cependant, le retour d'expérience de ces nombreuses applications a montré certaines limites. Les sources sismiques haute fréquence excitent fortement les couches proches de la surface, générant différents types d'ondes caractérisées par de fortes amplitudes (ondes de surface, ondes réfractées, ondes aériennes...). Ces signaux constituent un bruit perturbateur de l'analyse des ondes réfléchies (exploitées en sismique réflexion) dont les amplitudes sont en général plus faibles. La source doit donc être à la fois puissante génératrice de hautes fréquences, idéalement légère, maniable et répétitive. Les sources capables de répondre à certaines de ces conditions sont essentiellement destructives, par conséquent, elles ne peuvent être utilisées en milieu urbain. L'analyse de l'état de l'art sur l'évolution récente de la SHR indique clairement que le « type » et les paramètres de la source sismique constituent le facteur principal de progrès dans ce domaine (Piwakowski, 2004b, Portolano et Odin, 2004).

La caractérisation du sous-sol par tomographie sismique est étudiée depuis 1971 (Bois et Coll.). La première arrivée des ondes P est la plus souvent utilisée dans l'inversion tomographique, mais d'autres paramètres du train d'onde peuvent être utilisés pour augmenter la résolution (Khalil et al., 1993). Plus récemment, la tomographie sismique a été appliquée à la recherche de cavités. Louis et al (2005) ont utilisé la tomographie sismique pour détecter des vides peu profonds sous les ruines d'un site archéologique. Il s'avère cependant que la méthode est peu efficace lorsque les cavités sont trop petites par rapport à la taille du dispositif, la fréquence des ondes ou la couverture des rais. Il faut aussi que le contraste entre la cavité et l'encaissant puisse perturber l'image tomographique plus fortement que les autres hétérogénéités du sous-sol. Enfin, au même titre que la SHR, la tomographie sismique est souvent lourde et coûteuse de par sa mise en place ou son traitement long et complexe.

Le travail de recherche présenté ici avait donc pour objectif d'améliorer la performance de ces deux méthodes d'imagerie sismique. Pour la SHR, il s'agissait de concevoir, piloter et appliquer une source non destructive et puissante, capable de générer des ondes de haute fréquence pour optimiser la résolution et la qualité de l'image sismique. Pour la tomographie sismique, il fallait d'abord concevoir

un dispositif capable de détecter sous bâti des puits verticaux de petite section et remblayés depuis le XVIII^{ème} siècle. Ils ne présentent plus qu'une faible anomalie sismique demandant alors une sensibilité et une résolution suffisamment élevée. L'enjeu de ces travaux était aussi de réduire le temps d'acquisition et de traitement de ces deux méthodes pour les rendre plus simples d'utilisation et ainsi plus performantes en terme de coût bénéfice.

Résultats

Sismique réflexion Haute Résolution

Une nouvelle source a été conçue sur la base d'un vibreur électromagnétique industriel. Un système de pilotage de la source vibratoire comprenant un logiciel permettant d'optimiser le signal source a été élaboré, testé et validé (Kosecki, 2009). Cette nouvelle source a été appliquée en aveugle sur une marnière (Fauville en Caux, Normandie). L'analyse de deux profils SHR a permis de constater que la source produit un signal de bonne qualité (rapport signal/bruit élevé) en comparaison avec le signal produit par une chute de poids (masse). Les deux sismogrammes (

Figure 14) mettent en évidence des ondes de surface très fortes, propres au contexte géologique rencontré en Haute-Normandie. Le contenu fréquentiel des signaux obtenus avec le vibreur est plus élevé, avec des fréquences dominantes dépassant 100 Hz.

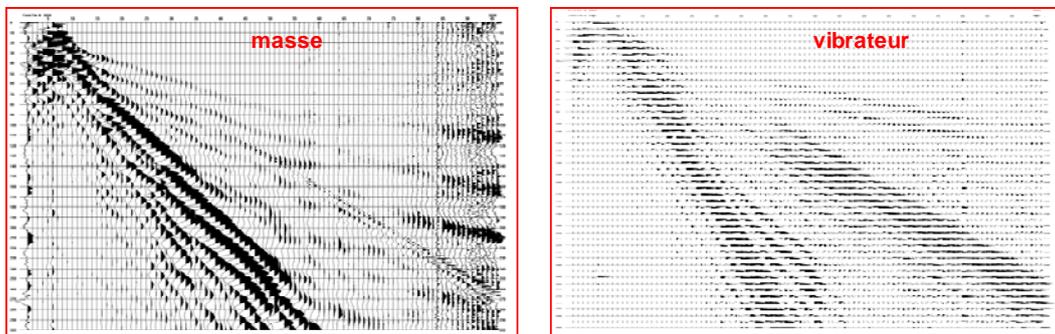


Figure 14 : Exemple de sismogrammes bruts obtenus avec la masse et avec le vibreur.

Après comparaison des anomalies sismiques détectées avec les caractéristiques de la marnière inconnue jusque là, il s'avère que la méthode SHR est capable de détecter clairement des galeries de moins de 15 m de largeur situées à 29 m de profondeur. A contrario, la méthode dans ce contexte n'a pas permis d'identifier les vides de 5 m de large situées à la même profondeur. Par exemple, la zone E de la section sismique illustrée Figure 15 correspond à une galerie de 15 m de large, les réflecteurs supérieurs sont distinctement affectés d'une forte atténuation tandis que les réflecteurs de la zone F ne semblent pas affectés par des galeries de plus petite taille. La non-détection dans la zone F est aussi probablement liée à des variations de couverture instrumentale due à la limitation de la taille des profils. Cette expérimentation a aussi permis de mettre en évidence la différence de signature des cavités. En effet, la zone G montre une perturbation de tous les réflecteurs auscultés. Cette zone correspond à une partie effondrée de la marnière, à comparer avec la galerie vide de la zone E. L'autre section a montré deux anomalies sismiques dont une à la verticale d'une galerie de grande taille et l'autre en dehors de la marnière connue. Des sondages de reconnaissance réalisés par le CETE de Rouen ont découvert à cet endroit des vides correspondant sans doute à une autre marnière.

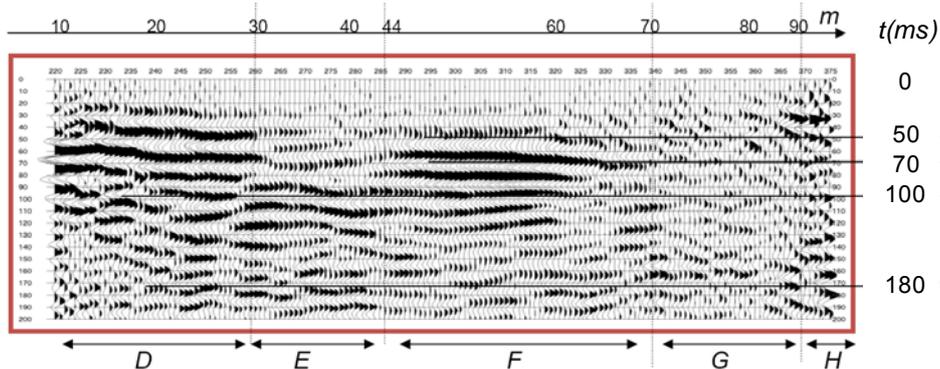


Figure 15 : Section sismique obtenue avec le vibreur.

Tomographie sismique

La résolution de la tomographie sismique est largement dépendante de la précision avec laquelle le temps de parcours des ondes est déterminé. L'estimation de ce temps par simple observation du signal est subjective, imprécise et nécessite une longue analyse, d'autant plus longue que le nombre de rais sismiques utilisés est élevé. C'est pourquoi il est crucial d'améliorer cette précision ainsi que le temps de traitement des données. Lorsque les signaux enregistrés proviennent de la même source et s'ils traversent (approximativement) le même matériau, il est possible d'estimer le temps d'arrivée en utilisant l'opération de corrélation croisée. Un programme informatique sous l'environnement LabView™ a été développé spécifiquement pour réaliser les pointés par corrélation, simplifiant et améliorant ainsi le traitement (Figure 16). La corrélation comprend trois étapes : le choix du signal de référence pour la corrélation, le pointage manuel du signal de référence et la corrélation croisée de tous les signaux avec le signal de référence. Ce traitement habituellement fastidieux permet de diminuer le bruit de mesure et de mettre en évidence les variations de temps d'arrivée les plus ténues. Cette technique augmente ainsi les chances de détection des anomalies de vitesse du milieu. Cette méthode a été utilisée sur le site de Fresnes-sur-Escaut (Nord). Un plan de tomographie traversait une zone suspectée d'abriter un vieux puits remblayé. L'inclinaison du dispositif était de 45° pour augmenter les chances de sectionner le puits et obtenir le meilleur contraste de vitesse possible. Le dispositif était composé de 48 hydrophones espacés de 0,5 m dans un sondage avec une série de 45 tirs (détonateur unique) dans un autre forage parallèle situé à 13 m du premier (Figure 17). La densité de rais importante et l'utilisation de la corrélation croisée ont permis de reconstituer une image avec une résolution inférieure à 0,4 m. Le dispositif était donc capable ainsi de mettre en évidence des anomalies sismiques de très faible contraste (Figure 17). Après vérification à la pelle mécanique, il s'avère cependant que l'anomalie détectée ne correspondait pas à un puits de mine, mais à un chemin préférentiel de dissolution provoqué par une cuvette en surface. Cela illustre bien la difficulté qu'ont les méthodes d'imagerie sismique à déterminer la présence de cavités avec un degré de confiance en adéquation avec les impératifs de gestion du risque.

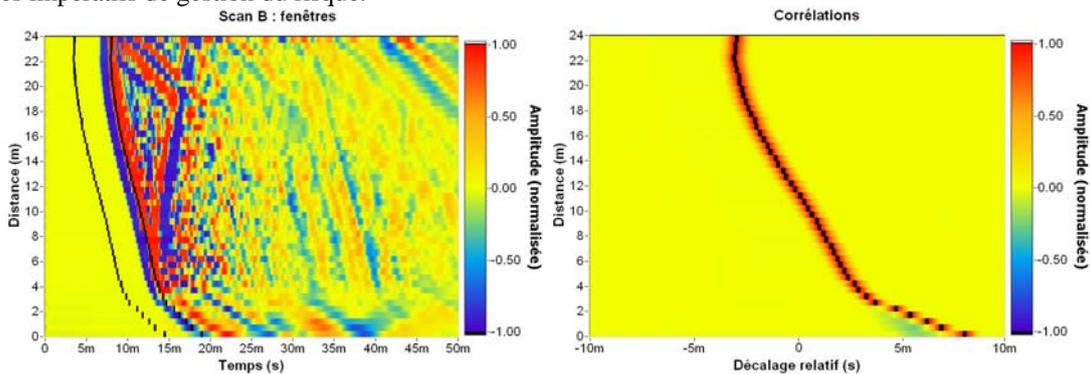


Figure 16 : A gauche ; signaux avec l'indication de positions des fenêtres de corrélation; à droite ; corrélations croisées de tous les signaux avec le signal de référence.

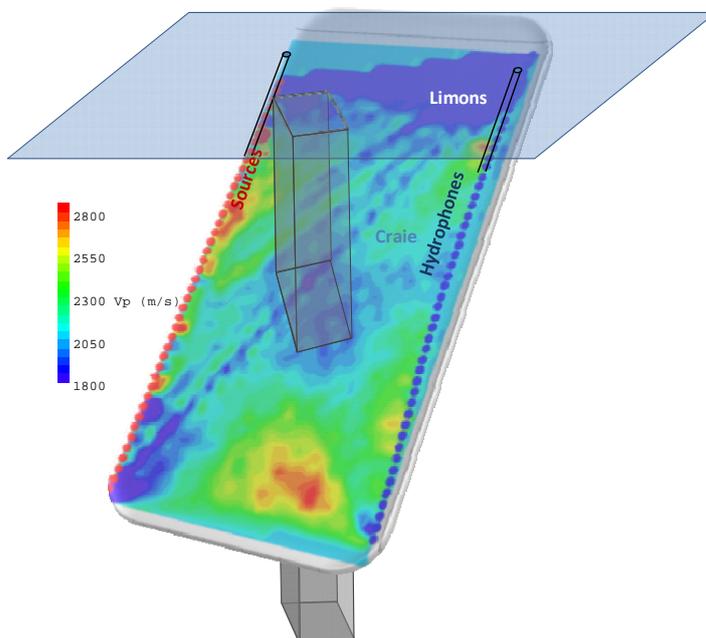


Figure 17 : Image tomographique corrélée avec les indices supposés de puits en surface.

Conclusion

Ces deux expérimentations d'imagerie sismique montrent combien il est important d'améliorer à la fois la couverture spatiale des rais sismiques et la précision temporelle de l'acquisition afin d'optimiser la qualité des images sismiques. Pour la SHR, une source vibratoire portable s'avère pouvant être facilement adaptée à chaque type de terrain et de cavité. Pour cela, il faut pouvoir piloter la source avec un signal optimisé pour le contexte donné et contrôler la réponse du sous-sol en temps réel. Par ce biais, les capacités de la SHR sont améliorées et permettent de détecter les cavités dans un plus grand nombre de cas à des profondeurs que peu de méthodes peuvent atteindre. L'expérimentation de Fauville-en-Caux en aveugle a permis de déterminer plus précisément les limites de la caractérisation des cavités par la SHR, à la fois de par leur nature (vide, remblayée, bordée de piliers) ou par leur taille. Elle a mis en évidence la qualité supérieure des sismogrammes obtenus avec la source vibratoire portable par rapport à une source impulsionnelle classique non-destructive.

Pour la tomographie sismique, le simple fait d'incliner le dispositif à 45° a amélioré géométriquement les chances de détecter des puits de mines verticaux. En parallèle, les développements pour la corrélation des signaux permettent d'augmenter à la fois le volume d'informations et la précision des mesures tomographiques. Par ces moyens, il est alors envisageable d'effectuer une imagerie sismique en « quasi temps réel » (sur site) pour apporter une réponse rapide pour la détermination du risque et éventuellement pour son traitement avec les moyens déjà déployés. Cependant, quelle que soit la résolution de la méthode, la présence d'une anomalie sismique n'est pas la garantie de la présence de l'objet recherché. Les résultats de l'imagerie sismique ne peuvent donc pas affirmer à coup sûr la présence ou l'absence d'une cavité souterraine. Les prochains travaux de recherches, notamment sur la problématique des puits abandonnés, auront pour objectif de développer des outils de traitement capables d'estimer plus précisément cette probabilité dans un contexte donné.

L'amélioration du temps d'acquisition et du traitement de la tomographie sismique comme de la SHR se traduit logiquement par une diminution du coût d'application qui constitue le principal inconvénient de ces méthodes. Une fois qu'elles en seront débarrassées, elles pourront être utilisées plus systématiquement pour la recherche de cavités en milieu urbain, d'autant qu'elles sont capables de les détecter directement sous bâti pour l'une ou à des profondeurs importantes pour l'autre.

Références

- Bois et al., 1971 P. Bois, M. La Porte, M. Lavergne and G. Thomas, Essai de détermination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits, *Geophys. Prospect.* 19 (1971), pp. 42–83
- Driad L., Piwakowski B., 2002: Detection and characterisation of underground cavities using high resolution seismic reflection (HRSR). *Environment Engineering Geophysics*, Aveiro (Portugal), Septembre 2002
- Khalil et al., 1993 A.A. Khalil, R.R. Stewart and D.C. Henley, Full-waveform processing and interpretation of kilohertz crosswell seismic data, *Geophysics* 58 (1993), pp. 1248–1256
- Kosecki A 2009. Optimisation d'une source vibratoire pour la détection des cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille.
- Kosecki A. Piwakowski B. Driad-Lebeau L., 2010, High resolution seismic investigation in salt mining context. *Acta Geophysica* 58(1), 15-33.
- Louis F. I., Clark R. A., Louis I. F., and Makropoulos C. C., Nondestructive imaging of small size voids at Akrotiri archaeological site, Thera Island, Greece, by seismic inversion techniques, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 57, Issue 4, July 2005, Pages 306-326
- Piwakowski B., Leonard C., 2000: High resolution seismic imaging as a NDT tool for the shallow subsurface survey, Vth Meeting of International Symposium on Nondestructive Testing Civil Engineering, NDT CE 2000, Japan
- Portolano, P., Odin D.: Application of a new seismic source to shallow surface imaging, Extended abstracts (4pp), EAGE 66th conference & exhibition, Paris, France, June 2004

Mots clés

cavités souterraines, tomographie sismique, sismique réflexion, haute résolution, vibreur, corrélation croisée

Modélisation sismique expérimentale à échelle réduite à l'aide d'un Banc de Mesures Ultrasonore Sans Contact (MUSC) – application à l'analyse de la dispersion des ondes de surface

Donatienne LEPAROUX (1), Francois BRETAUDEAU (1,2), Laurent LAGUERRE (1), Fabien TREYSSSEDE (1), Philippe COTE (1), O. Abraham (1)

1 LCPC, Nantes, France, donatienne.leparoux@lcpc.fr, laurent.laguerre@lcpc.fr,
fabien.treysse@lcpc.fr, philippe.cote@lcpc.fr, odile.abraham@lcpc.fr
2 IRSN, Fontenay-aux-Roses, francois.bretau@irsn.fr

Introduction

Le développement des méthodes d'imagerie sismique demande généralement une phase de validation expérimentale qui est difficile à réaliser sur des sites naturels, souvent hétérogènes et mal connus. Pour cette raison, l'approche expérimentale, sur site contrôlé et plus particulièrement en modèle réduit, intéresse la recherche en géophysique depuis la première partie du vingtième siècle, tout d'abord à l'aide de techniques photographiques ultra rapide (Rieber, 1936) puis plus tard à l'aide d'hydrophones en immersion (Howes et al, 1953) et des premiers éléments piézo-électriques surmontés d'atténuateur (e.g ; Press et al., 1954). Ces premiers travaux ont porté sur la reproduction qualitative des phénomènes de propagation d'onde observés en sismologie. Les travaux expérimentaux à échelle réduite pour la validation des méthodes d'imagerie par migration apparaissent dans les années 70 (e.g., Hilterman, 1970). Dans les années 80 puis dans les années 90, des simulations expérimentales, fondées notamment sur des expériences en cuve acoustique, ont pour but de reproduire des mesures pour valider l'inversion quantitative entre puits ou le développement de matériel d'auscultation (e.g. Valéro, 1997). Des bancs de mesures sophistiqués ont également permis de réaliser des mesures en réflexion, à l'aide d'émetteur et de récepteurs piézo-électriques en surface. Très récemment, la technique par interférométrie laser a été utilisée comme mode d'enregistrement des ondes sismiques afin de s'affranchir de l'influence du couplage des capteurs (Bodet et al., 2005; Dewangna et al., 2006; Draganov et al., 2007). Lors de ces expérimentations, le modèle est déplacé alors que l'interféromètre laser est fixe. La source sismique, simulée par un transducteur piézo-électrique fixé sur le modèle, n'est pas ponctuelle à l'échelle du modèle et a une directivité différente des sources du type explosion ou chute de poids, utilisées lors des campagnes d'acquisition sismique. Ainsi, l'état de l'art dans le domaine de la modélisation expérimentale en sismique démontre l'engouement pour ce domaine. Cependant, les avancées récentes en matière de modélisation numérique, conséquence directe de l'augmentation de la puissance de calcul, ménagent une marge de progression certaine pour l'approche expérimentale en laboratoire, notamment en ce qui concerne l'aspect quantitatif des simulations. Nous présentons ici un laboratoire de Mesures Ultrasonores Sans Contact (MUSC) innovant mis au point au LCPC pour contribuer ainsi à palier ce manque dans le domaine de la recherche appliquée en sismique.

Banc de Mesures Ultrasonores Sans Contact

Dans le sens des besoins identifiés par l'état de l'art et pour contribuer au progrès en modélisation expérimentale pour la validation des méthodes d'imagerie sismique en amont de la mesure sur le terrain, le LCPC s'est doté d'éléments ultrasonores qui ont permis la réalisation d'un banc de Mesures Ultrasonores Sans Contact (MUSC). Il s'agit d'un laboratoire expérimental dédié d'une part au contrôle non destructif pour l'évaluation mécanique des bétons (Chekroun, 2008) et d'autre part à la modélisation physique à échelle réduite pour la simulation de mesures sismiques de surface. Concernant ce deuxième champ d'application, les spécifications du banc permettent des configurations d'acquisition multi-sources et multi-récepteurs nécessaires aux méthodes d'imageries sismiques. En effet, deux bras de positionnement soutiennent l'émetteur et le récepteur et permettent un déplacement automatisé à l'aide de moteurs asservis, respectivement en x et en (x,y) avec une précision de 10 micromètres pour un incrément minimal de 100 micromètres (fig 1). L'ensemble est composé de (fig 2) :

- un interféromètre laser permettant de mesurer, sans contact, le déplacement particulière vertical à la surface du modèle au passage d'une onde sismique dans la gamme ultrasonore. Dans nos contextes de modélisation sismique, nous utilisons la gamme de fréquence

comprise entre 80 et 800 KHz (le système est capable d'enregistrer des signaux compris entre 10KHz et 1MHz);

- une source piézo-électrique ponctuelle au contact;
- un générateur de forme et un amplificateur pour générer le pulse d'excitation vers la source piézo-électrique;
- une table de positionnement associée aux bras de positionnement et pouvant supporter un modèle de 1m² de surface, de hauteur maximale 50 cm et de poids maximum = 270 kg.

Les particularités innovantes du laboratoire de mesure ultrasonore sans contact (MUSC) résident à la fois dans la précision du banc de mesure supportant le récepteur et dans l'utilisation de sources ponctuelles, sans couplage à 100 KHz. Les différents éléments ont été testés, caractérisés et validés (Bretaudeau, 2010). Le bruit du système de mesure a ainsi pu être défini comme un bruit blanc dans la gamme de fréquence [10 KHz-1MHz]. L'amplitude du bruit est telle qu'après sommation de 512 signaux, le rapport signal à bruit est de 100 dB pour les plus fortes amplitudes, c'est à dire dans la gamme de déplacement de quelques milliers de nanomètres. De plus, un module expérimental de caractérisation de la source (fig.4) permet de mesurer sa directivité et donc sa capacité à simuler une source ponctuelle isotrope en fonction de la fréquence (Bretaudeau, 2010), élément essentiel pour la simulation quantitative à échelle réduite et la reproduction de la répartition de l'énergie dans l'espace. L'intérêt d'un tel laboratoire pour la modélisation physique à échelle réduite repose sur 1) la capacité à enregistrer le déplacement particulière sans contact, 2) la maîtrise et reproductibilité du signal source, 3) le positionnement précis de la source et du récepteur en surface, 4) l'accès à des mesures complémentaires pour la connaissance du milieu de propagation. Il est donc possible de caractériser les capacités d'imagerie par application sur des données expérimentales avec une maîtrise des conditions de mesures et une connaissance du milieu alors que ces informations sont difficilement accessibles sur le terrain.

Application aux ondes de surface

La modélisation expérimentale à échelle réduite permet actuellement d'étudier l'applicabilité de l'inversion de la forme d'ondes aux problématiques de subsurface (Bretaudeau et al., 2010) ou encore d'étudier la faisabilité de l'analyse de la dispersion des ondes sismiques de surface pour des applications du génie civil, telle que l'auscultation de la couche de forme de chaussées en sols traités (dont l'épaisseur est environ 30 cm). Pour ce dernier champ d'application par exemple, la modélisation expérimentale à échelle réduite permet de réaliser des expérimentations parfaitement cadrées reproduisant le milieu à ausculter. Les résultats pourront être comparés aux solutions analytiques ainsi qu'aux tests de mesures réalisés sur le terrain. En effet, l'auscultation de couches de forme des chaussées réalisées par des sols traités posent le problème de la caractérisation mécanique in-situ. Pour cette raison, la dispersion de la vitesse de phase des ondes sismiques de surface pourrait être une technique d'auscultation adaptée. Cependant, la couche de forme de chaussée constitue une couche superficielle de vitesse sismique élevée par rapport au milieu sous-jacent. Un tel contexte met en jeu des ondes guidées plutôt que des ondes de Rayleigh ou pseudo-Rayleigh à proprement parler. Les mesures sur le terrain (fig. 5 et 6) montrent la présence de diffractions multiples liées à la présence de silex générant des données temporelles peu cohérentes. Cependant, le diagramme de dispersion associé permet de pointer un mode principal – dont on remarque l'inversion de courbure due à l'inversion du profil de vitesse. Ce mode principal peut être inversé en profil de vitesse d'ondes S à l'aide de méthodes classiques (Hermann, 2002). Cependant, si on cherche à affiner l'information en utilisant par exemple d'éventuels modes supérieurs, le diagramme de dispersion est alors difficilement analysable. En effet, des événements semblent apparaître (flèches 2 et 3, fig.6) mais restent très peu énergétiques et pourraient être associés aux diffractions ou plus généralement au bruit des données. L'analyse des courbes de dispersion théoriques (fig. 8) ne permet pas de fournir une réponse en terme de modes effectivement mesurés car elles ne font pas intervenir les aspects énergétiques liés aux pertes par fuite dans les milieux inférieurs et à la présence d'une source ponctuelle en surface. Par contre, en reproduisant l'expérimentation à échelle réduite sur un modèle bi-couche en résine à l'aide du banc de mesure MUSC, on peut étudier le diagramme de dispersion associé (fig. 9) qui ne sera pas affecté par les diffractions multiples. Le facteur d'échelle, lié au rapport des vitesses d'ondes de surface, est de 0.57 pour l'axe des vitesses et de 0.01 pour l'axe des fréquences. On retrouve le mode principal déjà visible sur les mesures terrain (fig. 6). Par ailleurs, on peut identifier des événements liés à des modes supérieurs (flèches 2 et 3, fig. 9) qui peuvent être associés aux événements de la figure (6). Cette comparaison tend à confirmer la présence de modes supérieurs porteurs d'information sur le milieu dans les diagramme de dispersion des mesures de terrain. Par ailleurs, comme évoqués précédemment, plusieurs des courbes théoriques (fig.8) ne sont

pas visibles dans les données expérimentales (fig. 9) ce qui montre l'intérêt de l'analyse à travers la modélisation expérimentale à échelle réduite.

Conclusion

La validation des méthodes d'imagerie sismique requière des données en milieu connu et une parfaite connaissance de paramètres expérimentaux. Face à ce besoin, depuis le début du 20ème siècle, différentes équipes cherchent à reproduire à échelle réduite les signaux sismiques au laboratoire. Ces dernières années, le LCPC a mis au point un banc de Mesures Ultrasonores Sans Contact (MUSC) par interférométrie laser qui permet de simuler quantitativement des mesures sismiques de surfaces générées par une source ponctuelle en surface. Ce banc de mesure est actuellement utilisé pour l'imagerie par inversion de la forme d'onde mais aussi pour l'analyse de la dispersion des ondes de surface dans des contextes particuliers tels que l'auscultation de couche de forme de chaussées présentée ici. Les résultats montrent l'intérêt de ce type de modélisation en complément aux modèles analytiques et à la faisabilité terrain.

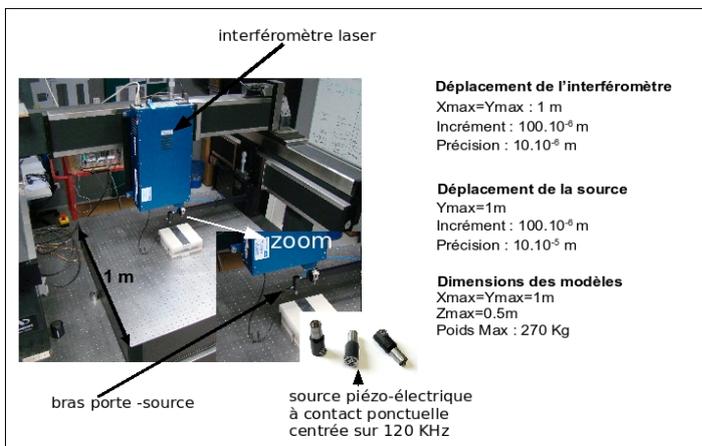


Figure 1 : photographie et spécifications du banc de mesures ultrasonores sans contact MUSC

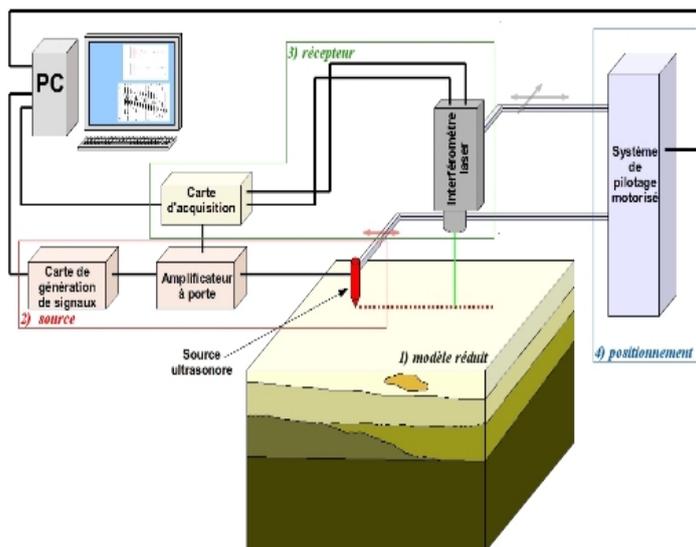


Figure 2 : schéma de la chaîne de mesures MUSC (d'après le document de thèse de F. Bretaudeau)

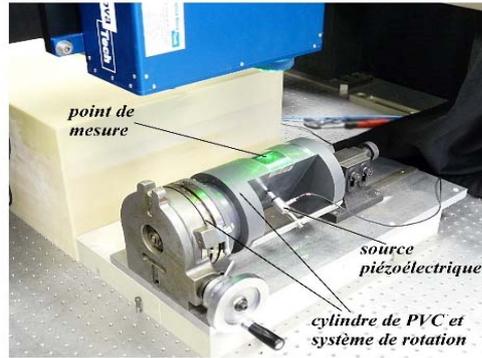


Figure 3 : photographie du dispositif de mesures annexe pour caractériser le diagramme de rayonnement de la source piézo-électrique.



Figure 4 : Dispositif de mesures sur couche de forme de chaussée

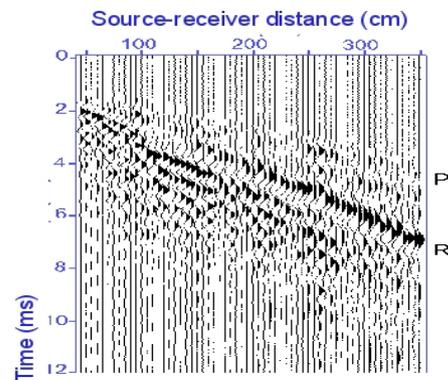


Figure 5 : tir sismique sur site

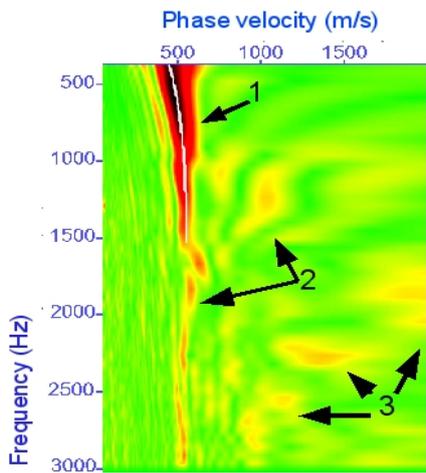


Figure 6 : diagramme de dispersion des mesures sur site

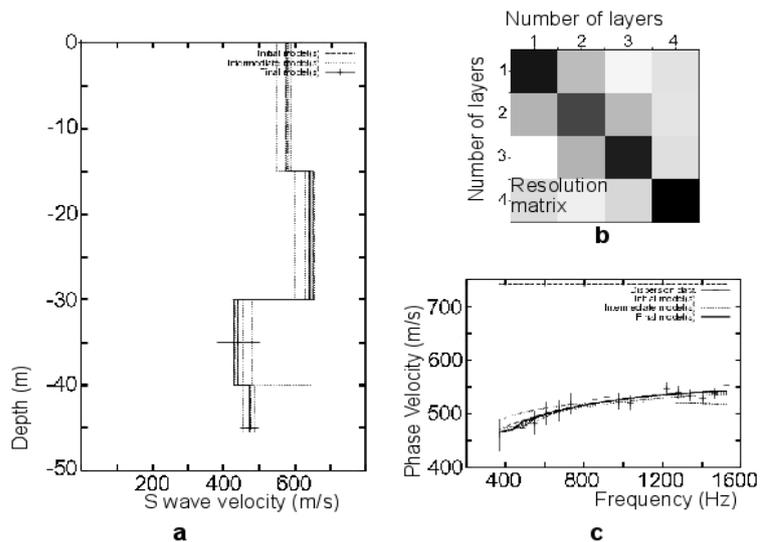


Figure 7: inversion de la dispersion de la vitesse de phase extraite des mesures sur site

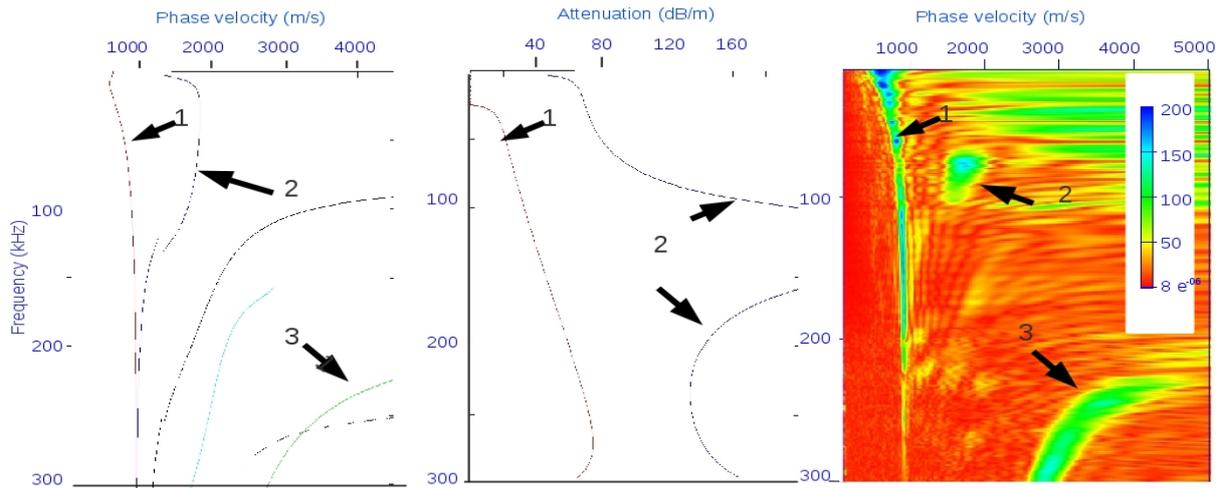


Figure 8 : courbes de dispersion théorique et atténuation par fuite associés au modèle réduit Figure 9 : diagramme de dispersion des mesures à échelle réduite

Références

- Bodet L., Van Wijk K., Bitri A., Abraham O., Grandjean G., Côte Ph. and Leparoux D., 2005, Surface wave dispersion inversion when the 1D assumption breaks down, *J.EEG*: Vol. 10, No. 2, pp. 151–162
- Bretaudeau, 2010, Modélisation physique à échelle réduite pour l'adaptation de la forme d'onde sismique appliquée au génie civil et à la subsurface, PhD thesis, Université de Nantes.
- Bretaudeau, Leparoux D., Brossier R., Abraham O., 2010-b Potentiel de l'inversion des formes d'ondes élastiques pour l'imagerie 2D quantitative de la proche surface, journées AGAP-2010, Sainty Briec, Fr.
- Chekroun M., 2008, Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton par ondes de surface, PhD thesis.
- Dewangna P., Tsvankin I., Batzle M., Van Wijk K. and Haney M., 2006, PS-moveout inversion for tilted TI media : A physicam-modeling study. *Geophysics*, vol 71 n° 4
- Draganov D. Wapenaar K., Thorbecke J. and Nishizawa O., 2007, Retrieving reflection responses by crosscorrelating transmission responses from deterministic transient sources : Application to ultrasonic data, *JASA Express letters*, 122.
- Hilterman F.J., Three-dimensional seismic modeling, 1970, *Geophysics*, 35
- Howes E.T., Tejada-Flores and Randolph, 1953, Seismic model study, *J. of the Acoustical Society of America*, vol 25.
- Press F., Olivier J. and Ewing M., 1954, Seismic model study of refractions from a layer of finite thickness, *Geophysics*, 19
- Rieber F., 1936, Visual presentation of elastic wave patterns under various structural conditions, *Geophysics*, vol. 1.
- Valéro H.P., 1997, Endoscopie sismique, *PhD thesis*, Geosciences Rennes, Université de Rennes I, France, 276 p.
- Herrmann, 2002, Computer Programs in Seismology, Department of Earth and atmospheric Sciences of Saint Louis, GB.



GPR & ERT sur une chaussée montréalaise : étude de cas et autopsie primaire

Carole Kaouane^{1,2} & Michel Chouteau¹

¹ Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

² CETE Normandie Centre, Rouen, France.

Abstract

We conducted an experiment on a mixed paved street of Montreal (Canada) where pavement needed complete rehabilitation. GPR surveys were performed before the destruction and removal of the pavement. Then we sampled asphalt and concrete from the demolition rubble. A resistivity imaging was carried out on the subgrade layer. We measured dielectric constant and electrical resistivity for wet and dry samples in the lab. This provided a range of values encompassing the climatic conditions for the whole year. With additional information from the geotechnical records of the city council with input the laboratory data into numerical modelling. The modelled responses fit nicely with the survey.

Introduction

Les méthodes GPR (Ground Penetrating Radar) et de résistivité électrique sont communément répandues pour leur potentiel et leur utilisation dans l'auscultation des structures du Génie Civil [1, 2]. Cependant une bonne interprétation des données géophysiques nécessite des informations externes (géotechniques, hydrogéologiques, etc.). Au Québec, il est rare que la structure initiale ainsi que l'historique des travaux sur la chaussée soient connus. Il en va de même pour la composition et l'âge des matériaux de la chaussée. Ce manque d'informations peut être pallié avec l'utilisation combinée de deux méthodes géophysiques [3]. Néanmoins, un calibrage approprié est nécessaire. Ce calibrage peut être réalisé à travers la détermination des propriétés physiques des matériaux de la chaussée [4].

Le but de l'expérimentation présentée est de définir une plage de valeurs prises par la constante diélectrique et la résistivité électrique de l'asphalte et du béton des chaussées. Les réponses des méthodes GPR et de résistivité électrique dépendent grandement de ces propriétés physiques. Cependant, ces dernières varient en fonction de l'état de saturation en eau des matériaux. La variation de la teneur en eau dans les matériaux de la chaussée étant liée aux variations climatiques au cours de l'année [5], les plages de valeurs obtenues devraient être représentatives des valeurs prises au cours d'une année. L'obtention de ce type de données permettrait de calibrer correctement les appareils ainsi que contraindre l'inversion et l'interprétation des données. Nous avons donc:

- 1) Fait des mesures sur une chaussée.
- 2) Récupéré des matériaux de cette chaussée.
- 3) Fait des mesures en laboratoire sur ces matériaux lorsqu'ils sont saturés et secs.
- 4) Comparé les mesures réalisées avec les réponses modélisées à partir des valeurs obtenues en laboratoire.

Mesures GPR & ERT

Grâce à la collaboration de la Ville de Montréal, nous avons eu accès au chantier d'une chaussée destinée à destruction et réhabilitation complète. Nous avons réalisé des mesures GPR avec un Pulse EKKO 1000 (Sensors&Software) équipé de 2 antennes (450 MHz & 900 MHz) sur une ligne de 40 m. La Ville de Montréal a aussi fourni les rapports d'analyses en forages antérieurs au chantier. La figure 1 montre la structure de la chaussée déduite de ces rapports.

Une ERT (Electrical Resistivity Tomography) est réalisée sur la fondation de la chaussée après sa reconstruction et avant la pose de la couche d'asphalte. Connaissant les matériaux utilisés pour la nouvelle fondation, cette ERT permet d'analyser l'influence du sol encastrant sur les mesures.

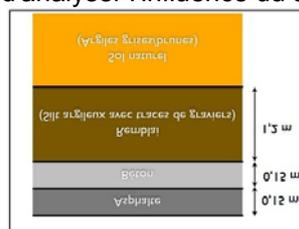


Figure 1. Structure de la chaussée d'après les rapports géotechniques de la Ville de Montréal.

Gestion des blocs

Des blocs d'asphalte et de béton sont sélectionnés lors du chantier de démolition. Ils sont ensuite transférés au laboratoire pour les mesures de constante diélectrique et de résistivité électrique. Comme les mesures de constante diélectrique nécessitent des surfaces planes et les mesures de résistivité électrique nécessitent des carottes, le processus total est destructif et réalisé en deux étapes. Chaque étape est faite avec des échantillons dits «humides» et des échantillons dits «secs». Un échantillon «humide» est un échantillon qui a été immergé pendant 1 à 3 semaines dans de l'eau. Un échantillon «sec» de béton est un échantillon séché au four (100°C pendant 16h) et un échantillon sec d'asphalte est séché au ventilateur pendant 3 jours.

Constantes diélectriques

Les mesures sont réalisées avec une sonde diélectrique coaxiale à terminaison ouverte (fig.2) développée par le département de Génie Civil de l'Université de Sherbrooke [6]. Les mesures sont intégrées sur un volume d'approximativement 30 cm³, ce qui permet de prendre en compte la contribution des granulats et de la matrice des matériaux à la constante diélectrique. Le signal est généré par un VNA (Vectorial Network Analyser) dans l'intervalle de 50 MHz - 900 MHz. Pour réduire les effets d'anisotropie, on réalise les mesures sur 3 faces de chaque bloc puis on calcule la moyenne. Le bruit étant assez fort pour les fréquences comprises entre 50 MHz et 200 MHz, on ne présente les résultats qu'à partir de 200 MHz (fig.3).



Figure 2. VNA, sonde et bloc.

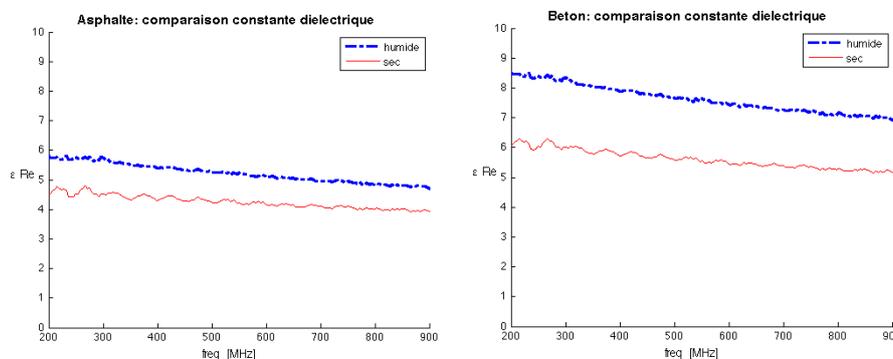


Figure 3. Constante diélectrique pour l'asphalte (à gauche) et le béton (à droite).

Résistivité électrique

Nous avons développé un système dit «de 4-points» pour les mesures de résistivité électrique sur des carottes de béton et d'asphalte (fig.4). Ce système consiste en 2 plaques de métal (points d'injection de courant) et 2 colliers de serrage (points de mesure du potentiel). Le courant est injecté avec le résistivimètre Syscal Jr (Iris Instrument) et du gel électrolytique est utilisé pour réduire les résistances de contact entre les plaques, les colliers et les carottes.

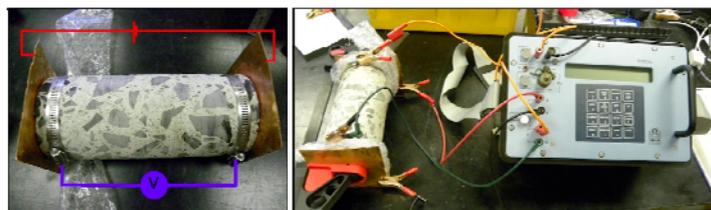


Figure 4. Système 4-points pour les mesures de résistivité électrique.

On réalise 10 mesures sur chaque carotte (3 carottes d'asphalte et 4 de béton). On obtient une excellente répétitivité des mesures avec des erreurs relatives entre 0,2% et 5%. Les mesures ont pu être faites sur les carottes de béton sec et humide et seulement sur les carottes d'asphalte humide. Les carottes d'asphalte font 10 cm de diamètre et 13 cm de long. Celles de béton font 10 cm de diamètre et 20 cm de long. Le courant injecté était approx. 0,2 mA pour l'asphalte et entre 0,5 mA et 1 mA pour le béton. Au final, on mesure une résistivité pour le béton humide entre 145 et 275 $\Omega.m$ et entre 944 $\Omega.m$ et 2630 $\Omega.m$ en condition sec. L'asphalte humide montre une résistivité entre 1510 $\Omega.m$ et 2980 $\Omega.m$.

Validation

On modélise ensuite les traces radar correspondantes aux valeurs extrêmes trouvées lors des études en laboratoire pour les comparer avec les mesures faites sur la chaussée. Les épaisseurs assignées aux différentes couches de la chaussée sont celles de la figure 1. Les valeurs utilisées pour la fondation sont déduites de la littérature [7], des observations faites avec l'ERT, de précédent sondages CCR (Capacitively-Coupled Resistivity) faits dans une rue de Montréal et des informations géotechniques. On récapitule les valeurs utilisées pour la modélisation dans le tableau I. On remarque sur la figure 5 que les réflexions obtenues avec les données de terrain sont comprises entre les réflexions de la modélisation « humide » et de la modélisation « sec ». Finalement, les résultats obtenus en laboratoire correspondent assez bien aux mesures de terrain.

Traces de terrain (900 MHz) Vs modélisation (700 MHz) avec les données de laboratoire

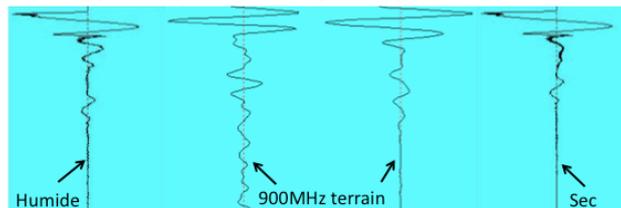


Figure 5. Comparaison des traces de terrain avec les traces modélisées. La modélisation a été réalisée avec le logiciel GPRMAX2D avec les paramètres géométriques et physiques décrits dans le tableau I.

Materiaux	épaisseur	Humide		Sec	
		Resistivité ($\Omega.m$)	Constante diélectrique	Resistivité	Constante diélectrique
Asphalte	0.13 m	2000	5	5000	4
Béton	0.17 m	200	9	1500	5
Fondation	0.50 m	20	15	50	10

Tableau I. Valeurs utilisées pour la modélisation des traces GPR de la figure 5.

Discussion et conclusion

Les propriétés physiques déterminées pour les matériaux asphalte et béton concordent avec la littérature [8-14] et avec les données de terrain. Dans un souci d'aspect pratique, on remarque:

- L'énergie réfléchiée à l'interface asphalte/béton sera plus facilement mesurable lorsque les matériaux sont humides (figure 6).

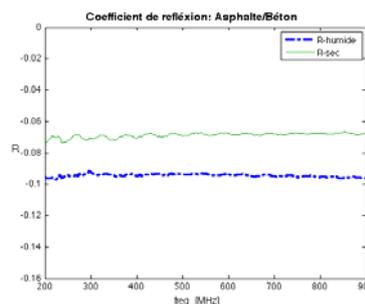


Figure 6. Coefficient de réflexion à l'interface asphalte /béton.

- On en déduit qu'il doit exister une période préférentielle pour l'auscultation des chaussées mixtes [5].
- La présence d'argiles dans la fondation (phénomène géologique à l'échelle de Montréal) est fortement nuisible à résolution du GPR. La méthode électrique peut pallier à ce problème si un calibrage approprié est utilisé compte tenu de la forte résistivité électrique de la couche d'asphalte.

Nous envisageons actuellement de poursuivre ces études avec un site instrumenté sur un cycle annuel. Ces études consisteraient à l'application combinée des méthodes CCR et GPR associée à des systèmes de mesure de teneur en eau. Comme une automatisation complète de l'auscultation non destructive des chaussées n'est pas réaliste [15], nous souhaitons fournir à travers ce projet une amélioration de l'interprétation des auscultations à travers l'étude des caractéristiques des matériaux et leur influence sur l'auscultation non destructive.

Remerciements

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration de la Ville de Montréal, le prêt gratuit de la sonde par Mr Filali de l'U. de Sherbrooke et l'aide du laboratoire d'hyperfréquences Polygrammes (École Polytechnique de Montréal).

Références

- [1] M. Chouteau, *et al.*, "A multi-dipôle mobile array for the non-destructive evaluation of pavement and concrete infrastructures: a feasibility study.", in *International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003 (NDT-CE 2003)*, Berlin, Germany, 2003.
- [2] X. Derobert, *et al.*, "Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete", *NDT and E International*, vol. 41, pp. 44-52, 2008.
- [3] D. Breyse, *et al.*, "How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures", *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 783-793, 2008.
- [4] C. Fauchard, *et al.*, "GPR performances for thickness calibration on road test sites", *NDT and E International*, vol. 36, pp. 67-75, 2003.
- [5] M. A. Kestler, "Techniques for Extending the Life of Low Volume Roads in Seasonal Frost Areas.", *Transportation Research Record*, vol. 2, pp. 275-284, 2003.
- [6] B. Filali, *et al.*, "Measurement of the dielectric properties of concrete by a broad open ended coaxial probe", *Canadian Journal of Physics*, vol. 84, pp. 365-79, 2006.
- [7] L. Nielsen, *et al.*, "Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 62, pp. 1-15, 2007.
- [8] E. J. Jaselskis, *et al.*, "Dielectric properties of asphalt pavement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15, pp. 427-434, 2003.
- [9] A. M. Neville, *Properties of concrete*, Fourth ed. Edinburgh: Longman, 1998.
- [10] A. Robert, "Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, pp. 89-94, 1998.
- [11] Z. M. Sbartaï, *et al.*, "Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 62, pp. 361-374, 2007.
- [12] J. Q. Shang, *et al.*, "Measurement of complex permittivity of asphalt pavement materials", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 125, pp. 347-356, 1999.
- [13] W. Shao-peng, *et al.*, "An improvement in electrical properties of asphalt concrete", *Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition*, vol. 17, pp. 69-72, 2002.
- [14] M. N. Soutsos, *et al.*, "Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing", *NDT & E International*, vol. 34, pp. 419-425, 2001.
- [15] T. Saarenketo and T. Scullion, "Road evaluation with ground penetrating radar", Lawrence, KS, USA, 2000, pp. 119-138.

Faisabilité de la reconnaissance de structures archéologiques grâce à un radar multi-antennes bi-fréquence, bi-polarisé et une navigation assistée par ordinateur

Michel Dabas(1), Gianfranco Morelli (2), Alexandre Novo (2), René Ruault (3)

(1) *GEOCARTA, 16 rue du Sentier, 75002 Paris dabas@geocarta.fr*

(2) *Geostudi Astier srl, Via Nicolodi 46, Livorno – Italy info@geostudi.it*

(3) *ABEM France, BP56, 35310 info@abemfrance.eu*

Résumé : Sur le site archéologique gallo-romain du Vieil-Evreux (Conseil Général de l'Eure) a été testé pour la première fois un radar multi-antennes à double polarisation à des fins de validation du système développé par IDS (Italie) : le STREAM. L'acquisition a été faite en tirant l'ensemble par un Quad sur une surface de 0,6 ha avec des profils tous les 12cm à la fréquence de 200MHz. La navigation a été réalisée grâce à un système utilisant un GPS RTK centimétrique et un logiciel spécifique de pilotage assisté par ordinateur. La structure enterrée (temple romano-celtique) a pu être parfaitement identifiée et la comparaison avec les meilleures images électriques acquises depuis plus de 15 ans sur cette même structure-test montre le gain apporté par ce radar en terme de définition spatiale des structures et surtout en terme de productivité (un seul passage dans une seule direction, 16 profils simultanés). Cette validation sur un objet très complexe permet de généraliser son utilisation pour d'autres types de structures plus simples comme les réseaux enterrés par exemple.

Abstract : For the first time was tested over the gallo-roman archaeological site of Vieil-Evreux (Conseil General of Eure, France) a new multi-antenna, dual-polarization antenna designed by IDS: STREAM. Acquisition was performed by pulling the array of antennas over the whole area (0.6 ha) with inter-profiles spacing of 12cm and using a 200MHz frequency. Navigation was done using a RTK-GPS (centimeter accuracy) and specific navigation software. The main buried structure (a romano-celtic temple) was clearly identified and mapped. Comparison with the best electric images acquired since 15 years over this same test-structure show a clear increase in terms of spatial definition, but also in terms of productivity (a single profile in only one direction, 16 profiles in a single swath). This demonstration over a complex structure enables us to generalize this result for simpler structures like the one encountered in utility mapping for example.

Introduction

L'utilisation du radar en prospection archéologique n'est pas encore très répandue par rapport à l'utilisation désormais classique de la méthode électrique ou magnétique. Ces deux types de prospection ont récemment subi des évolutions technologiques importantes permettant aux opérateurs de couvrir de larges surfaces dans des délais raisonnables tout en maintenant la résolution spatiale nécessaire à un échantillonnage correct des deux premiers mètres voire dans la majorité des cas en Archéologie du premier mètre du sous-sol (profils séparés au maximum de 50cm et échantillonnage le long des profils de quelques dizaines de centimètres). Cette évolution est apparue suite à plusieurs bonds technologiques : apparition de systèmes de positionnement précis (DGPS, RTK-GPS, Station totale robotisée), capteurs magnétiques peu chers et de bonne résolution (fluxgate à 0,01nT) qui permettent de multiplier le nombre d'acquisitions sur un même porteur, et enfin moyens d'acquisition et de traitement de l'information temps réel à grande vitesse (système ARP en électrique, Dabas et al. 2005).

L'évolution de la prospection géophysique appliquée à l'Archéologie est donc en train de subir la même évolution que l'Archéologie elle-même dans ses champs d'application : de l'étude quasi-punctuelle d'une structure dans un site (quelques centaines de mètres carrés) il y a quelques années, il est possible maintenant de cartographier par les méthodes électriques et magnétiques plusieurs dizaines d'hectares soit la totalité d'un site et même de restituer celui-ci dans son environnement. Cette évolution est donc la même que celle qu'a subie l'Archéologie dans le passage entre l'Archéologie programmée et l'Archéologie préventive en France. Si l'on continue l'analogie, il est fort à parier que l'image de la géophysique appliquée au secteur archéologique va en ressortir complètement modifiée dans les dix prochaines années.

Concernant le radar, bien que celui-ci apporte des informations très importantes pour l'Archéologue comme la connaissance sur les profondeurs et donc la stratigraphie, il n'a pas encore été utilisé de manière 'industrielle' bien que la faisabilité ait pu être démontrée par quelques équipes : (Leckebuch, 2005), (Neubauer et al., 2002), (Trinks et al., 2010). Les hautes fréquences utilisées en Archéologie (>400MHz) impliquent des distances entre profils très faibles, distances qui ne sont que rarement appliquées dans des études commerciales. La polarisation des antennes généralement utilisées implique aussi souvent un passage dans deux directions perpendiculaires, multipliant le temps d'acquisition mais surtout de traitement par un facteur 2 au moins. De plus les radargrammes généralement utilisés dans la détection des servitudes sont rarement utilisés en détection archéologique où la notion de coupe-temps/profondeur est plus porteuse d'information à l'instar de ce qui se pratique déjà en électrique ou en magnétique. Ces coupes nécessitent aussi de manipuler une grande quantité d'information qui peut devenir rapidement non manipulable par de simples PC (plusieurs Gigaoctets). Tous ces points font que le prix de revient d'une carte radar peut rapidement atteindre dix fois le prix d'une carte électrique ou magnétique.

Le système STREAM

Afin de lever une partie de ces inconvénients, nous avons décidé de tester un nouveau système radar développé par la société italienne IDS : le STREAM (*Subsurface Tomographic Radar Equipment for Assets Mapping*) qui comme son nom l'indique a été développé pour la détection des réseaux enterrés et présenté à la conférence GPR 2010 de Lecce, Italie. Le système complet est composé de 3 ensembles d'antennes de 2 m de large tirées par un véhicule. L'ensemble du centre correspond à 4 antennes bi-fréquence (200 et 600MHz) séparées de 40cm avec des polarisations horizontales (dipôles perpendiculaires à la direction d'avancement). Le deuxième ensemble correspond à 15 antennes en parallèle assemblées chacune en 2 modules et séparées de 12cm travaillant à 200MHz. Leur polarisation est verticale (dipôles orientés dans le sens d'avancement). Le troisième ensemble est identique au second mais les centres des antennes sont décalés de 6cm assurant donc au total 30 profils tous les 6 cm.

Le système utilisé sur le site de Vieil-Evreux (Dabas et al., 2005) est une version simplifiée appelée STREAM-X spécifiquement créée pour rouler sur des sols rugueux (un seul module de 16 antennes espacées de 12cm). Les antennes ont été protégées dans une caisse qui glisse sur le sol. L'ensemble est tiré par un quad. L'opérateur utilise le GPS pour positionner les mesures mais aussi comme aide à la navigation pour suivre la direction des profils et respecter la distance entre chaque profil. Un logiciel spécifique a été développé à cette fin (Snail'Nav, sous-ensemble d'un SIG développé par Geocarta-IDS) et ce logiciel tourne en parallèle avec celui permettant l'acquisition des signaux radar. Le GPS utilisé est de type RTK avec la correction différentielle reçue par radio à partir d'une base fixe.



Fig 1 : Système STREAM-X sur le site de Vieil-Evreux

Résultats

L'acquisition a été faite pour plus de sécurité en prenant les profils toujours dans le même sens ce qui a augmenté le temps d'acquisition par 2. La surface de 0,6 ha a été couverte par 29 passages en 1 heure et demi avec des profils de 150m maximum orientés Est-Ouest. Malgré l'absence de toute topographie préalable, les profils ont été acquis par le même opérateur grâce à des couches d'information existantes et introduites dans le SIG (Snail'Nav). La qualité des données sur certaines antennes est testée en temps réel dans le logiciel d'acquisition GRED-HD3.

Sur la coupe-profondeur à 1,05m (hypothèse d'une vitesse constante de 10cm/ns), les murs extérieurs du temple romano-celtique (*fanum*) apparaissent clairement aussi bien dans la direction des profils que dans la direction perpendiculaire (effet de la double polarisation). Au centre du fanum on peut observer une partie de la cella (pièce centrale où était généralement placée la statue du Dieu vénéré). Une allée ou un mur semble relier le mur extérieur et la cella. Les coupe-temps (figure 2) ont été générées pour des intervalles de profondeur de 2cm et quelques coupes sont sélectionnées sur la figure 3.

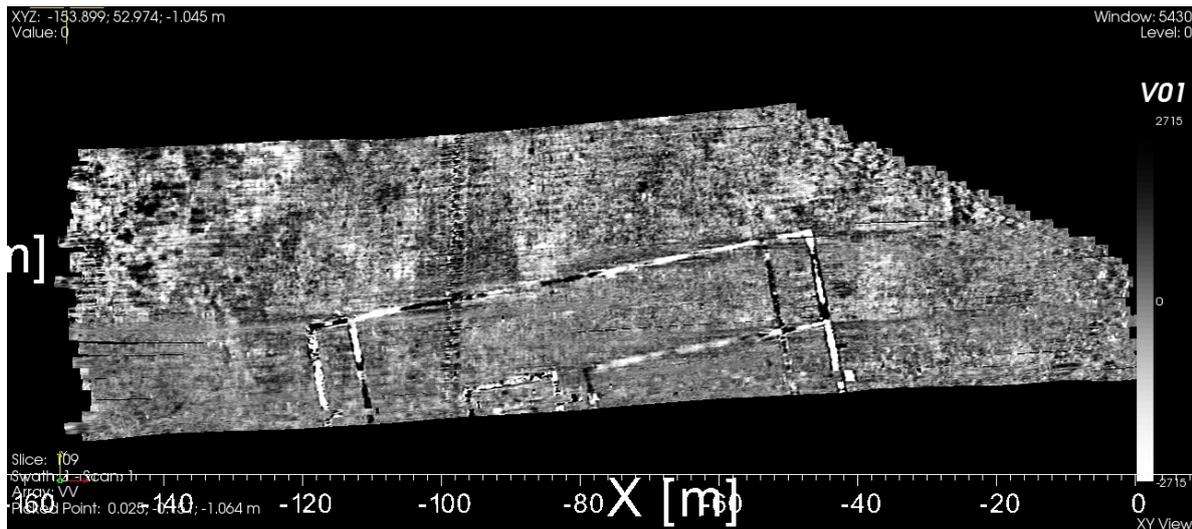


Figure 2 : Coupe-temps à la profondeur de 1,05m

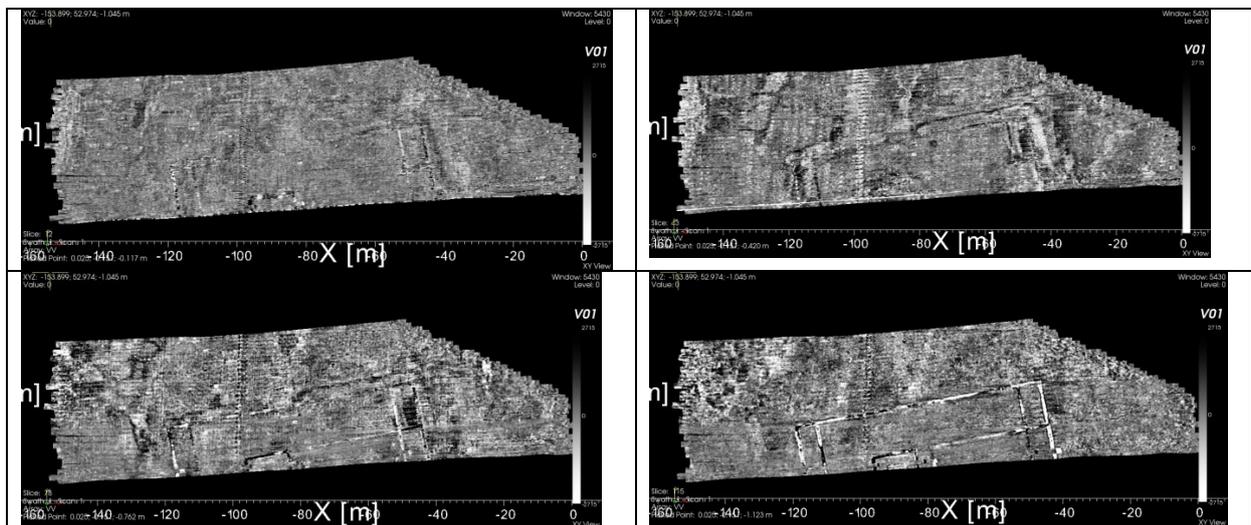


Figure 3 : Coupe-temps/ profondeurs de 11cm et 41 cm (ligne supérieure) ; 75 cm et 1,10m (bas)

Discussion et Conclusions

A fin de comparaison (Fig. 4), est reproduite la meilleure image électrique (en 15 ans de tests) obtenue sur cette même structure par le procédé ARP© (*Automatic Resistivity Profiling, GEOCARTA*). On retrouve bien toutes les structures détectées par le radar. Une analyse plus fine de détails sur les coupe-temps montre même plusieurs structures non détectées en électrique. Il est intéressant de noter aussi que le temps d'acquisition en radar est maintenant du même ordre de grandeur qu'en

électrique ou magnétique tracté. Même s'il est difficile de généraliser à partir d'un seul exemple, nous pensons que ce test montre que la méthode radar peut être maintenant utilisée en standard dans l'étude de sites archéologiques si le prix de vente de telles prestations diminue. Il reste aussi à tester l'influence du couplage de l'antenne avec le sol dans le cas de terrains où la surface est très rugueuse. La productivité du système actuel est estimée à 5 hectares par jour dans le cas d'un terrain simple (grands profils et surface lisse).

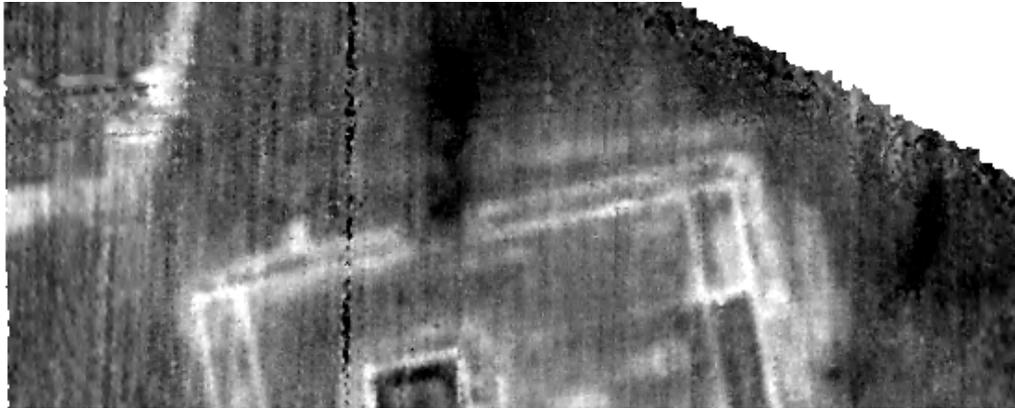


Figure 4 : Résistivité électrique (procédé ARP© voie 2, profondeur théorique d'investigation 0 à 1m)
Nous tenons à remercier Laurent Guyard pour son accueil toujours aussi enthousiaste sur la structure du fanum du Vieil-Evreux (Conseil Général de l'Eure), Simi Alessandro (IDS) pour son travail en commun.

Biblio :

Dabas M., Blin O., Benard C., 2000. Les nouvelles techniques de résistivité électrique employées dans la prospection de grandes surfaces en archéologie, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, **101**, 4, 24-32.

Dabas M., Guyard L., Leppert T., 2005. Gisacum revisité : croisement géophysique et archéologie, in *Dossiers de l'Archéologie*, n° spécial « Géophysique et archéologie », **308**, Nov. 2005, 52-61, 79p.

Trinks I., Johansson B., Gustafsson J., Emilsson J., Friborg J., Gustafsson C., Nissen J., Hinterleitner A., 2010. Efficient, large-scale archaeological prospection using true three-dimensional GPR Array System, *Archaeological Prospection*, **17**, 175-186.

Leckebruch J., 2005. Use of antenna arrays for GPR surveying in Archaeology, *Near-Surface Geophysics*, **3**, 107-115.

Neubauer W., Eder-Hinterleitner A., Seren S., Melichar P., 2002. Georadar in the Roman Civil Town of Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, **9**, 135-156.

Mots-clefs : radar, archéologie, ensemble d'antennes, RTK-GPS, multi-fréquence, bi-polarisation.

Application du radar-sol aux sites d'ambiance humide. Exemples des habitats littoraux lacustres du Jura et des mardelles de Lorraine.

***Christian Camerlynck, **Gilles Bossuet, **David Etienne,
Clément Laplaige, **Jean-Pierre Simonet, *Jean-Michel Friedt, *Michel Dabas.**

**UMR 7619 Sisyphe, Paris, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI (christian.camerlynck@upmc.fr)*

*** UMR 6249 Chrono-environnement, Besançon, Université de Franche-Comté*

**** UMR FEMTO, Besançon, Université de Franche-Comté*

Summary

In marsh or lacustrine context, and with low electrical conductive subsoil, ground-penetrating radar is a smart tool for characterization of inundated sites. Low propagation velocity and antenna focusing improve both vertical and horizontal resolution for an easy interpretation of stratigraphic deposits. Two examples illustrate such results of GPR prospecting over lake or water body in Jura and Lorraine.

Habitats littoraux lacustres du Jura

Les rives du lac de Chalain (Jura) ont été le siège d'une importante occupation humaine à l'époque Néolithique. Plusieurs profils radar à 100 MHz ont été acquis sur le lac de Chalain, afin de reconnaître de manière non destructive des niveaux anthropiques repérés ponctuellement par sondages. Leur géométrie est précisée grâce aux nombreux réflecteurs radars. Les sondages carottés permettent de corrélérer ces réflecteurs avec des niveaux d'occupation conservés sous forme de strates de matière organique, intercalées dans les craies lacustres. Le niveau néolithique le plus ancien, contemporain de la culture Horgen (XXXII^e siècle av. J.-C.), matérialisé dans la stratigraphie par une couche très ténue (5 cm), est détecté (figure 1). Cet essai ouvre la voie à une cartographie non destructive en 3 dimensions de la géométrie des différents corps sédimentaires accumulés depuis le Néolithique moyen sur les rives du lac de Chalain.

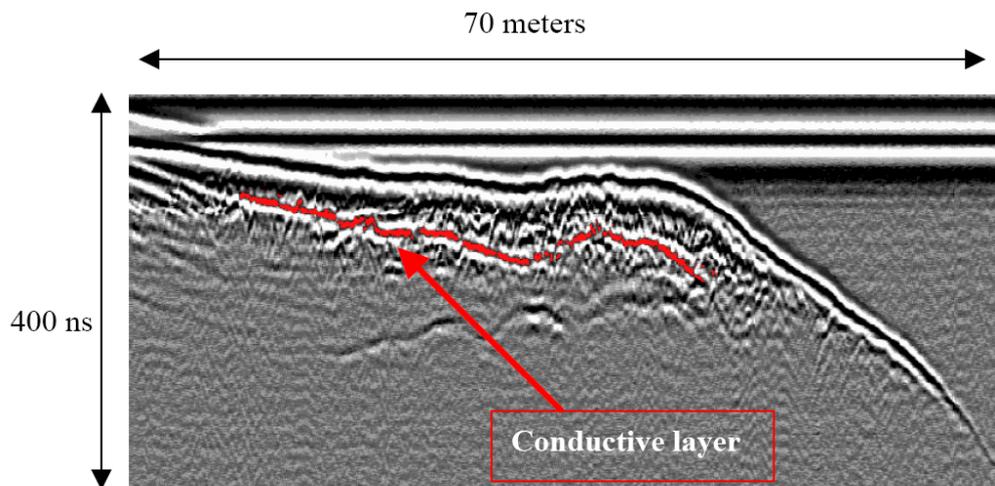


Figure 18 : Radargramme 100 MHz au-dessus du Lac de Chalain

Les mardelles de Lorraine

Dans les forêts de plaine en Lorraine, dans des contextes paysagers ruraux ou lourdement marqués par d'anciennes et puissantes industries (sel, fer), on trouve de très nombreuses mares tourbeuses ou « mardelles ». Ces mares occupent une surface de quelques ares ou dizaine d'ares. Elles sont couvertes par une végétation oligotrophe acidophile de sphaignes et bouleaux, tandis que les zones qui les entourent sont occupées par des taillis de charme sous futaie de chêne, typique de sols

neutres. Ces mardelles constituent des énigmes pédologiques et archéologiques dans la mesure où l'origine de ces dépressions n'est pas assurée : carrières de chaux (marnières) antiques, puits de rouissage du chanvre (*Cannabis sativa*), abreuvoirs ou citernes, entonnoirs naturels de dissolution de gypse ou sel gemme ? Ces structures représentent par ailleurs des conservatoires remarquables de biodiversité du fait de leur richesse spécifique et des archives extraordinaires de l'occupation des sols et de ses conséquences en termes de biodiversité forestière depuis plusieurs millénaires.

Dans le cadre d'un programme de recherche² consacré spécifiquement à leur étude³, nous avons prospecté, à titre expérimental, plusieurs de ces mardelles à partir des méthodes de la géophysique appliquée afin de reconnaître précisément leur morphologie et la géométrie de leurs remplissages sédimentaires. Ces structures excavées d'une trentaine de mètres de diamètre et de plusieurs mètres de profondeur, apparaissent sur différents types de substrat (grès, calcaires, marnes) en position topographique haute ou basse. Une reconnaissance LIDAR aéroportée effectuée en Lorraine préalablement à la construction de la ligne TGV, a permis d'en repérer plusieurs centaines (figure 2.), apparues soit sur sol nu soit sous couvert forestier, et dont une grande partie, en phase finale de comblement sont encore entièrement occupées par l'eau et la végétation (figure 3). Dans ce dernier cas, leur reconnaissance s'avère impossible à réaliser à partir des seuls moyens mécaniques de sondage justifiant le recours à une méthode d'exploration non destructive, capable de restituer en 3 dimensions la stratigraphie du milieu de dépôt.

Les résultats préliminaires obtenus sur plusieurs mardelles montrent que le radar-sol, moyennant une adaptation de l'équipement aux conditions de prospection (figure 3), est un outil pertinent pour la caractérisation de sites inondés.

Sur le site de Dolving (Moselle), la prospection radar a été effectuée à la fréquence de 200 Mhz, à partir de profils transversaux espacés de 1 mètre et couvrant les 3/4 de la dépression préalablement déblayée des nombreux bois qui l'encombraient (figure 4). La représentation volumique (Figure 5) du milieu de dépôt permet de restituer avec une excellente résolution la géométrie des dépôts argileux à organiques ainsi que leur mise en perspective. Des opérations de forage planifiées dans les prochains mois permettront de caler définitivement les coupes radar et d'apporter les éléments de datation des différentes couches repérées sur les radagrammes.

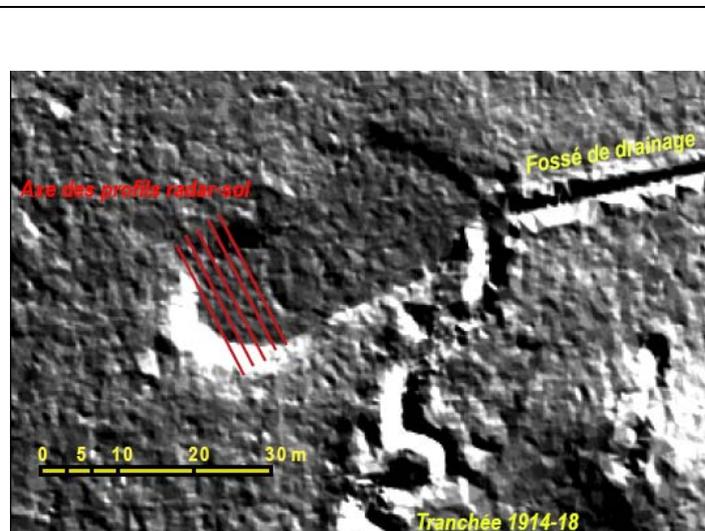


Figure 2 : Dolving (57) : Modèle de relief LIDAR (ombrage N315°, élévation 45°)



Figure 3 : Radeau et antennes GPR 200 MHz

² Programme « IFB Biodiversité et Changement Global. Variations de biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées et pérennité ». Ce programme fait l'objet d'une collaboration entre l'Unité de Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers de l'INRA Nancy (E. Dambrine), l'Equipe Phytoécologie de l'INRA Nancy (J.L. Dupouey), le Laboratoire de Chrono-environnement de l'Université de Besançon (P. Ruffaldi), l'Office National des Forêts (F. Ritz) et la Direction Régionale d'Archéologie de Lorraine (M. Leroy) et le CRPG (J. Carignan)

³ Histoire anthropique des forêts lorraines : archives sédimentaires, palynologiques et métalliques des mardelles forestières (Thèse de doctorat en cours de David Etienne)

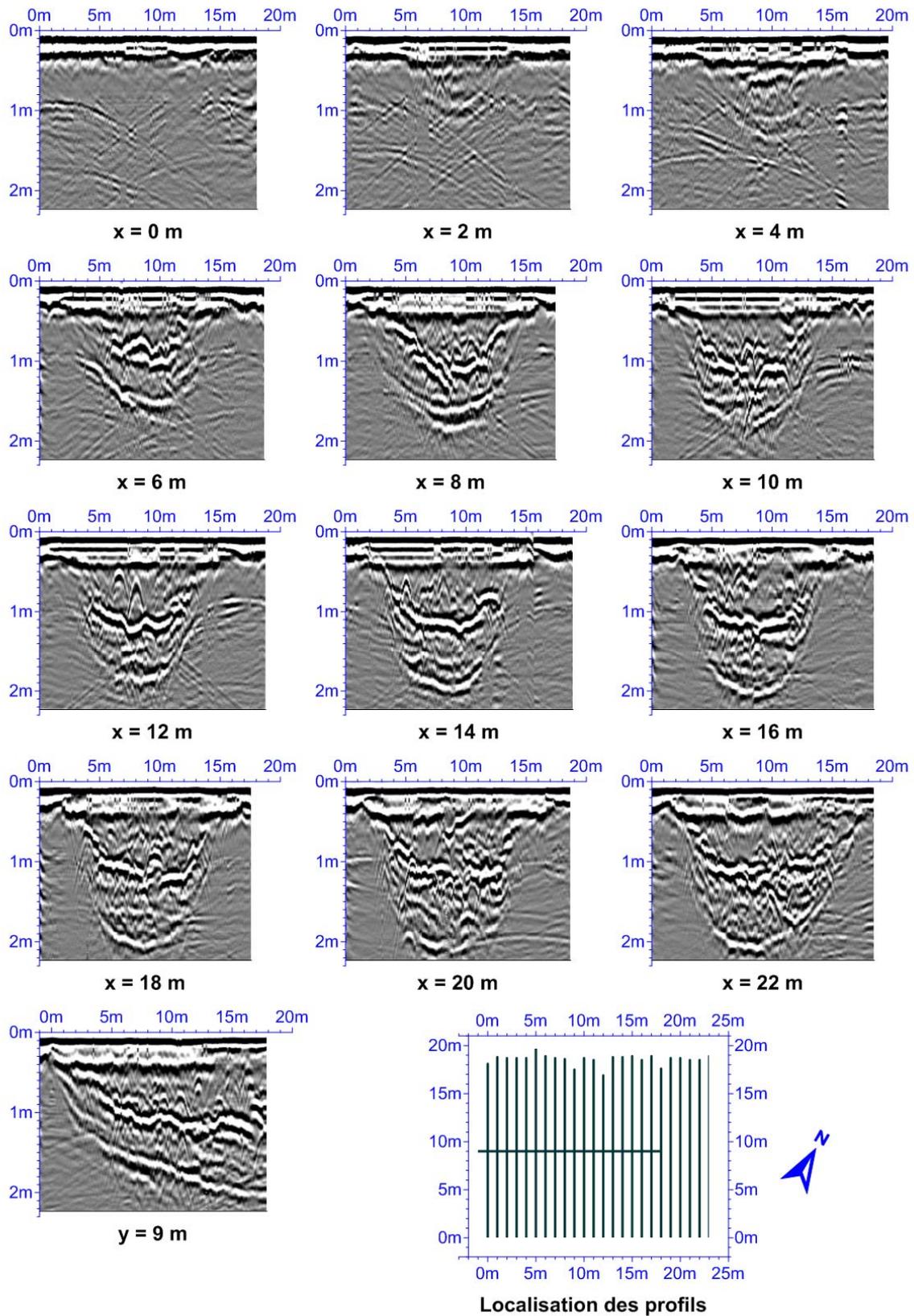


Figure 4 : Dolving (57) : profils GPR 200MHz

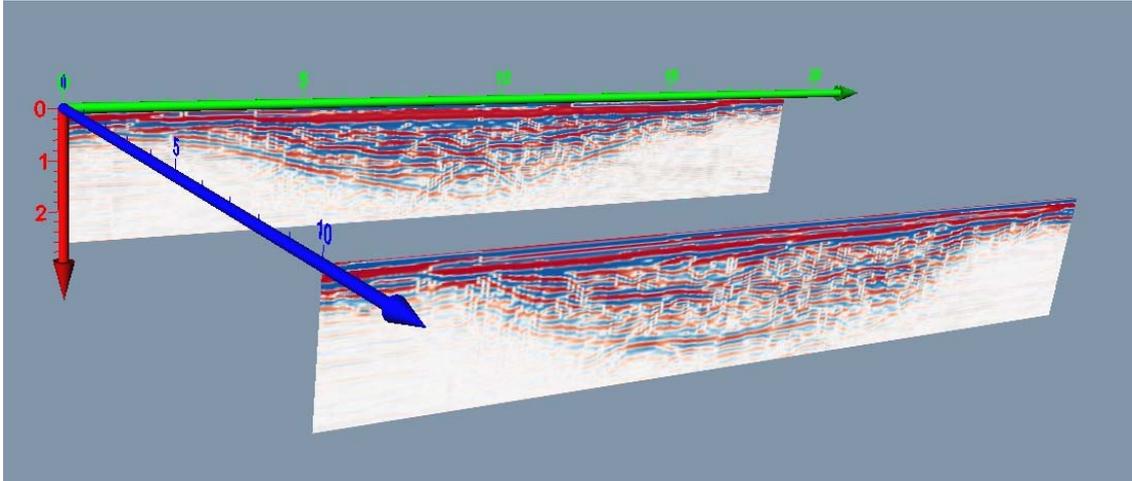


Figure 5 : Dolving (57) : reconstitution volumique de deux profils parallèles.

Caractérisation de l'endommagement d'une argile au sein d'un glissement de terrain par mesures sismiques

Grégory Bièvre^{1,2}, Florence Renalier^{1,3}, Guénoé Mainsant¹, Luc Valldosera⁴, Denis Jongmans¹, Etienne Flavigny⁴ & Eric Larose¹

1. ISTerre-LGIT, Université de Grenoble, France

2. CETE de Lyon, Laboratoire d'Autun, France

3. Européenne de Géophysique, France

4. 3S-R, Université de Grenoble, France

Abstract

Landslides in clay generate internal damage in the slope. Laboratory and *in situ* tests have shown that Vs (shear wave velocity) measurements allowed the clayey material damage to be characterized and the area affected by the landslide to be imaged. Furthermore, first results of the characterization of the transition between solid to liquid state with the measure of Rayleigh surface waves in the laboratory are presented.

Introduction

La vitesse des ondes de cisaillement (V_s) est devenue un paramètre géophysique essentiel pour caractériser les sols et les roches en géotechnique. Par rapport à la vitesses des ondes de compression, V_s présente les avantages d'investiguer les milieux avec une plus petite longueur d'onde (meilleure résolution) et d'être peu sensible à la présence d'eau. De nombreuses méthodes permettent de mesurer V_s in-situ : essais en forage, essais de sismique réfraction ou réflexion (ondes SH), inversion des ondes de surface générées par des sources actives (limitées à une profondeur de pénétration de quelques dizaines de mètres) ou passives riches en basses fréquences. Le but de cette étude est de montrer l'intérêt du paramètre V_s pour caractériser et imager les glissements de terrain affectant des argiles, avec comme objet d'étude le grand glissement d'Avignonet situé dans la région du Trièves (France). Après une présentation de ce glissement, la relation entre l'endommagement résultant de l'instabilité gravitaire et V_s est étudiée à partir d'essais en laboratoire et d'acquisitions sur le terrain. L'applicabilité des différentes méthodes de mesure de V_s est évaluée pour imager cette structure géologique d'extension latérale kilométrique caractérisée par une épaisseur de l'ordre de 50 m. Finalement, une étude de laboratoire est présentée, qui a pour objectif de caractériser la transition glissement-coulée à l'aide de la mesure de V_s obtenue à partir des ondes de Rayleigh.

Le glissement de terrain argileux d'Avignonet (Isère, France)

Le grand glissement d'Avignonet (40.10^6 m^3) est localisé dans la région du Trièves au Sud de Grenoble (Fig. 1a). Cette zone de 300 km^2 est recouverte par une épaisse couche d'argile quaternaire, pouvant atteindre 250 m, qui résulte de la sédimentation dans un lac créé par le barrage glaciaire de la vallée du Drac lors de la dernière glaciation. Ces dépôts argileux reposent sur un substratum constitué de calcaire marneux et de formations alluvionnaires anciennes, compactes et localement cimentées (Fig. 1a,b). Après la fonte du glacier, les rivières ont rapidement incisé les formations géologiques et ont déclenché de très nombreux glissements de terrain dans ces argiles litées. Le glissement d'Avignonet a été reconnu par de nombreux essais géotechniques et géophysiques étalés sur différentes périodes (Jongmans et al., 2009). Cinq forages (B_0 à B_4) ont été conduits dans la partie Sud du glissement (Fig. 1c). L'analyse des forages et des données inclinométriques a mis en évidence la présence d'au moins trois niveaux de surfaces de rupture qui peuvent éventuellement se dédoubler (5 m, 10-20 m et 40-50 m). Selon les mesures piézométriques, la nappe phréatique est très superficielle (1 à 3 m sous le niveau du sol). Des relevés GPS réalisés depuis 1995 ont montré que le pied du glissement était plus actif (7 à 15 cm/an) que le sommet (1 à 2 cm/an), avec la présence de deux zones plus actives à proximité des forages B2 et de B4 (Fig. 1c).

Le glissement d'Avignonet a fait l'objet de plusieurs campagnes de reconnaissance sismique entre 2006 et 2009 (P1 à P9 ; Fig. 1c). Ces profils, de longueur variable, ont été réalisés avec des géophones 4,5 Hz et une source constituée d'un marteau frappant une poutre (enregistrements horizontaux) ou une plaque (enregistrements verticaux). Seuls les profils P6 et P7, plus longs, ont été

acquis avec une source explosive. Les valeurs de V_s le long de ces profils ont été obtenues à partir de la méthode de sismique réfraction SH ou à partir de l'inversion des ondes de surface. Un réseau de six stations sismologiques a été déployé à proximité du profil P5 en 2007 (RPO ; voir Fig. 1c pour la localisation). Le bruit sismique a été enregistré durant 1 heure pour trois ouvertures croissantes avec un rayon de 20 m, 40 m et 60 m. Enfin, un réseau de onze stations sismologiques d'ouverture kilométrique (A_0 à A_{10} ; Fig. 1) a été installé durant 15 jours en 2007.

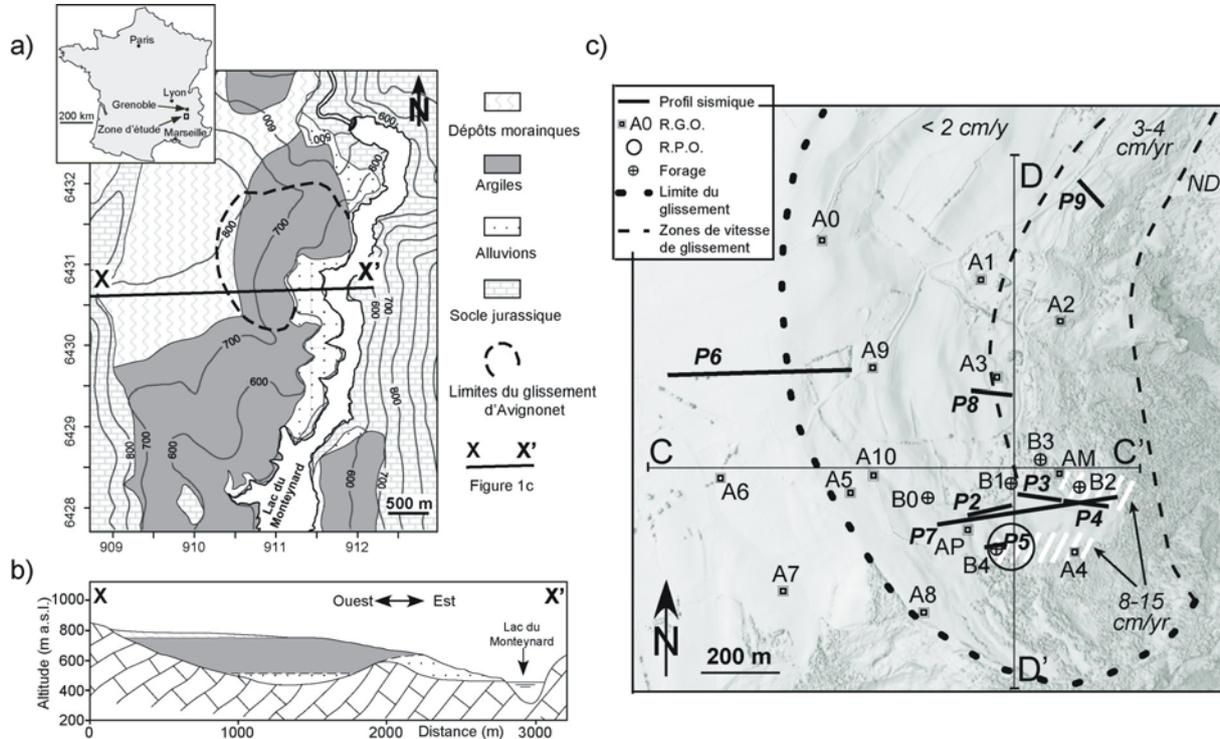


Figure 1. Description du site d'étude et des investigations géophysiques. **a)** Carte géologique de la vallée du Drac et localisation du glissement de terrain d'Avignonet (pointillés). **b)** Coupe X-X' (localisation en a). **c)** Position des acquisitions réalisées sur le glissement d'Avignonet, délimité par la ligne épaisse en pointillés. P2 à P9 : profils sismiques (P1 est en dehors de l'aire représentée, environ 300 m à l'ouest du haut de la figure). B0 à B4 : forages, A0 à A10 : stations sismologiques du réseau de grande ouverture (RGO). Cercle : réseau de petite ouverture (RPO). 3 zones présentant des taux de déplacements différents (ND : pas de déplacement, <2cm/yr et 3-4 cm/yr) sont délimitées par les lignes en pointillés fins, les deux zones très actives sont indiquées par des hachures blanches.

Stratigraphie V_s et endommagement du matériau

Un essai down-hole de 17 m de long a été réalisé à proximité du forage B4 (Fig. 2) dans une zone très perturbée qui a aussi été investiguée avec le profil P5. Les deux méthodes présentent des résultats cohérents, avec une couche superficielle à faible vitesse ($V_s < 200$ m/s) au-dessus de la première surface de rupture à 5 m de profondeur. En dessous de cette interface, V_s est de l'ordre de 250 m/s et augmente jusqu'à 400 m/s à 15 m de profondeur, au niveau d'une autre surface de rupture mise en évidence dans le forage. Ces résultats mettent en évidence l'endommagement du matériau par la déformation gravitaire générée au niveau de deux des surfaces de rupture rencontrées dans le forage. La tomographie sismique en ondes S montre en particulier l'épaississement vers l'est de la couche superficielle à faible vitesse. Par contre cette méthode n'offre pas une pénétration suffisante (même avec des profils de 100 m de long) pour imaginer le sol jusqu'à la surface de rupture profonde qui a été trouvée à 42 m de profondeur dans B4.

Les valeurs de V_s mesurées à 10 m de profondeur le long de tous les profils sismiques P1 à P9 sont reportées sur la figure 3a, en fonction de la vitesse de déplacement mesurée en surface. Les valeurs de V_s montrent une forte diminution en fonction du taux de déplacement, de 630 m/s en dehors du glissement jusqu'à atteindre 225 m/s dans les zones les plus affectées par le glissement. Ces résultats, obtenus pour des longueurs d'onde métriques, suggèrent que le glissement le long des surfaces de rupture à plusieurs profondeurs affecte fortement la valeur de V_s dans l'ensemble du

matériau argileux, en le fissurant intensément à différentes échelles. Cette fissuration intense augmente l'indice des vides et la teneur en eau du matériau saturé, qui peut alors se rapprocher de sa limite de liquidité.

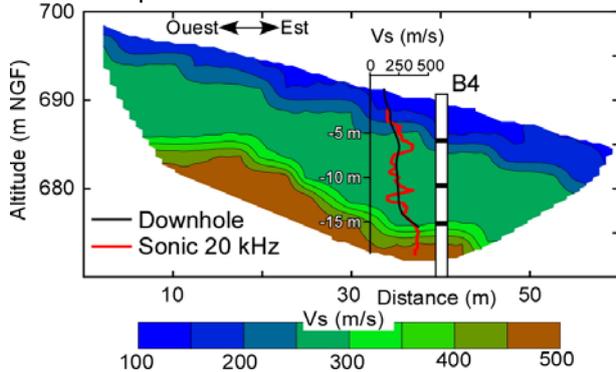


Figure 2. Tomographie sismique en ondes SH le long du profil P5 (cf. Fig. 1). L'inversion a été réalisée à partir d'un modèle tri-couche déduit de la sismique réfraction (erreur RMS inférieure à 5%). Les profils Vs verticaux obtenus lors d'un essai down-hole et d'une diagraphie sonique sont aussi reportés, ainsi que la profondeur des surfaces de rupture superficielle (5 m) et intermédiaires (10,3 m et 15 m) observées dans le forage B4.

Des essais de laboratoire ont été réalisés pour étudier la relation entre les valeurs de Vs dans l'argile et l'indice des vides. Trois échantillons de 40 cm de long (deux laminés, un non laminé), prélevés à 8,3 m, 9,8 m et 15,5 m de profondeur, ont été placés dans une cellule triaxiale et soumis à des contraintes isotropes croissantes, de 0 à 400 kPa. Des mesures de Vs ont été réalisées en conditions saturées (avec des longueurs d'onde centimétriques) et la figure 3b montre l'évolution de Vs en fonction de l'indice des vides (e) et de la teneur en eau correspondante. Les valeurs de Vs décroissent de façon significative avec l'accroissement de l'indice des vides, passant de 300 m/s pour $e=0,52$ à 70 m/s pour $e=0,92$. Dans le forage, des valeurs de Vs de 180 m/s et 250 m/s ont été respectivement obtenues à 5 et 10 m de profondeur, pour des indices de vide de 0,79 et 0,62. Ces deux couples de valeur sont en accord avec les mesures sismiques réalisées en laboratoire. Même si les échantillons ont pu être légèrement remaniés lors de leur extraction, ces résultats suggèrent que l'argile est autant fissurée à l'échelle centimétrique qu'à l'échelle métrique, et que l'endommagement résultant de la déformation gravitaire est pénétratif.

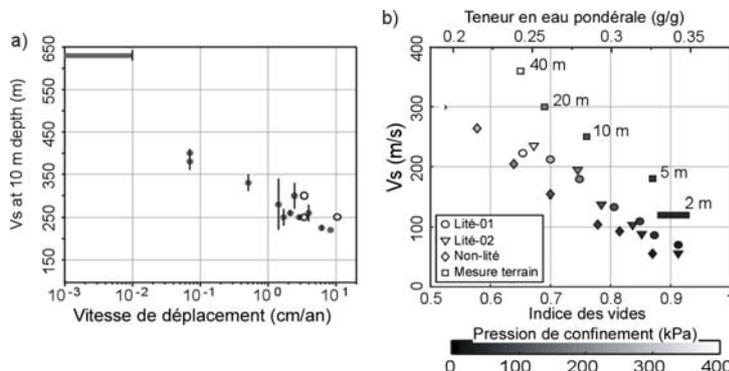


Figure 3. Variations de Vs sur le terrain et en laboratoire. **a)** Évolution de Vs à 10 m de profondeur (ondes de surface, réfraction SH), en fonction du taux de déplacement en surface. Une valeur arbitraire de déplacement a été attribuée au point le plus à gauche, situé en dehors du glissement. **b)** Évolution de Vs en fonction de l'indice des vides et de la teneur en eau pour 3 échantillons d'argile saturée. Deux points correspondant à des mesures en forage avec mesure de la teneur en eau sont reportés.

Inversion des ondes de surface

La technique d'inversion de la dispersion des ondes de surface a également été appliquée pour obtenir Vs au niveau du forage B4. La partie haute fréquence de la courbe de dispersion (non présentée ici) des ondes de Rayleigh (entre 9 et 18 Hz) a été obtenue par sismique active sur le profil P5. La partie basse fréquence, entre 3 et 8 Hz, a été estimée à partir des mesures de bruit ambiant réalisées successivement sur les trois cercles concentriques du réseau de petite ouverture. La combinaison des mesures de sismique active et passive a ainsi permis de retrouver la courbe de dispersion sur une large gamme de fréquence pour atteindre des profondeurs plus importantes que la sismique réfraction SH. Cependant, cette méthode ne permet de retrouver que localement le profil vertical de Vs. Caractériser l'ensemble du glissement de terrain par cette technique demanderait un gros effort à la fois en termes d'acquisition sur le terrain et de traitement des données.

Pour contourner cet inconvénient, la technique des inter-corrélations a été appliquée au bruit ambiant enregistré par les treize stations sismologiques du réseau de grande ouverture (Fig. 1). Afin d'estimer la qualité des fonctions de propagation reconstruites par inter-corrélation, des tirs à l'explosif ont été réalisés à chacune des stations. Pour chacun des couples de stations, les courbes de

dispersion ont été estimées en combinant les informations données par les tirs (en général entre 3 et 7 Hz) et les corrélations (environ entre 1,5 et 5 Hz). A chaque fréquence entre 1,5 et 7 Hz, une inversion tomographique des temps correspondant a permis de retrouver des cartes fréquentielles de la vitesse de groupe des ondes de Rayleigh. Des courbes de dispersion locales ont ainsi pu être reconstruites en chacun des points de la grille tomographique. Leur inversion, réalisée en supposant l'existence de trois interfaces, a permis de reconstruire un modèle 3D de Vs sur l'ensemble de la partie couverte par le réseau. La figure 4 présente deux coupes à travers ce modèle 3D, localisées sur la figure 1.

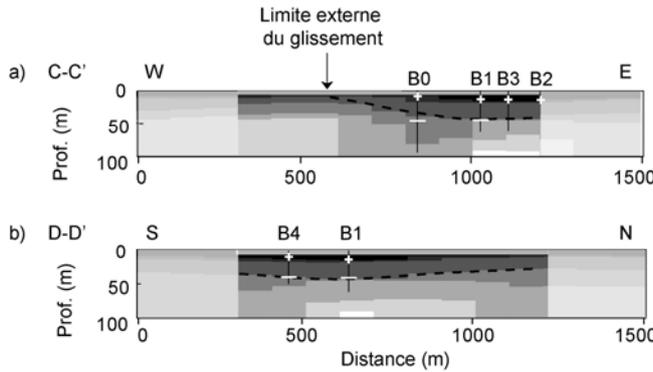


Figure 4. Coupes du modèle 3D de Vs sur les sections C-C' et D-D' (cf. Fig. 1). **a)** Dans le sens de la pente. **b)** Perpendiculairement à la pente. L'exagération verticale de l'échelle est de 2. Croix et traits blancs : surfaces de glissement intermédiaire et profonde ; pointillés noirs : surface de glissement estimée à partir de ce modèle ; zones grisées en bord de modèle : zones non résolues par l'investigation.

La profondeur du contraste de vitesse le plus profond correspond très bien à la dernière surface de glissement, mesurée dans les forages entre 42 et 47 m. Le glissement de terrain se caractérise par une vitesse Vs inférieure à 400 m/s et est moins épais vers l'ouest, en accord avec les résultats obtenus par les autres méthodes d'investigations et avec la position de la limite externe du glissement visible en surface. Bien que proche de la limite supérieure de résolution de l'étude, un autre contraste de vitesse apparaît à plus faible profondeur et correspond à la surface de glissement trouvée dans les forages entre 10 et 15 m.

Étude de la transition solide-liquide en laboratoire

Des échantillons d'argiles prélevées sur le site ont été placées dans une boîte (0.42x0.64x0.15 m) à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité. Une source vibratoire piézométrique a permis de générer des sources dans une bande de fréquence 400-2000 Hz. Les signaux ont été enregistrés par 5 capteurs verticaux disposés linéairement à 5, 8, 11, 14 et 17 cm de la source. Les signaux ont été générés toutes les 40 mn et enregistrés pendant 36 jours à mesure que les argiles séchaient. La température a été monitorée, de même que la teneur en eau (mesurée par TDR et pesées gravimétriques W). Les vitesses de groupe des ondes de Rayleigh (Vr ; très proche de Vs dans un demi-espace homogène) ont été déterminées pour chaque capteur et la moyenne des 5 mesures a été retenue. La figure 5 présente les résultats de l'évolution de Vr en fonction du temps et de la teneur en eau. Vr présente une anti-corrélation avec W, depuis 22 m/s (W = 40 %, proche de la limite de liquidité ; densité humide = 1.28) jusqu'à 140 m/s pour W = 26 % (et une densité humide de 1.59). La différence entre Vr (70 m/s) et Vs mesurée sur le terrain à 5 m de profondeur (120 m/s ; Fig. 5 ; Renalier *et al.*, in press) pour une teneur en eau équivalente s'explique probablement par la différence de consolidation du matériau. Ces observations confirment la forte sensibilité de Vr (et Vs) à l'état de consolidation du matériau argileux.

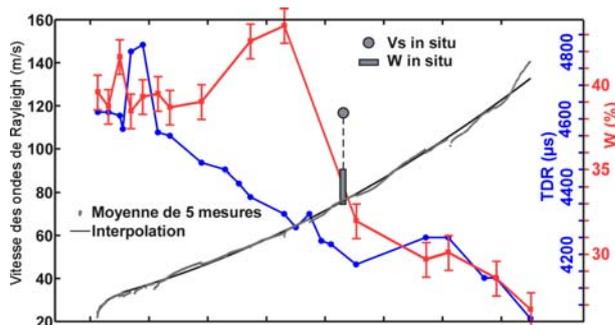


Figure 5. Évolution de Vr et de la teneur en eau (mesure TDR et pesée gravimétrique W) en fonction du temps. Les valeurs de Vs et de teneur en eau mesurées sur le terrain sont indiquées.

Conclusions

Les mesures de V_s réalisées sur le glissement argileux d'Avignonet ont permis de caractériser l'état d'endommagement du massif, résultant de mouvements gravitaires localisés sur des surfaces de rupture à plusieurs profondeurs. Les variations verticales et latérales de V_s observées ont été mises en relation avec l'activité du glissement et la localisation des surfaces de rupture. Différentes techniques de mesures de V_s *in situ* ont été testées. Les techniques de prospection sismique utilisant des sources actives ont permis de détecter les deux surfaces de rupture les plus superficielles, mises en évidence par des contrastes verticaux de V_s . Par contre, leur profondeur de pénétration s'est avérée insuffisante pour imager la surface de rupture profonde (45 m). La mesure du bruit ambiant par sismique passive en réseau a permis d'atteindre cette profondeur mais l'imagerie de l'ensemble du glissement nécessiterait un trop grand nombre de points de mesure pour être efficace. Par contre, le déploiement d'un réseau à grande ouverture de 11 stations sismologiques et l'application de la technique d'inter-corrélation à des enregistrements de bruit sismique ont permis d'obtenir une imagerie 3D en V_s du glissement de terrain d'Avignonet. L'étude en laboratoire de l'évolution de la vitesse des ondes de Rayleigh en fonction de la teneur en eau indique une très grande sensibilité de la technique à l'état de consolidation du matériau. Ces résultats offrent de nouvelles perspectives pour l'imagerie et le suivi temporel (à l'échelle hebdomadaire) de l'endommagement dans les grands glissements de terrain qui affectent les sols et les roches meubles.

Références

- Jongmans D., Bièvre G., Schwartz S., Renalier F., Bearez N. & Orengo Y. (2009) Geophysical investigation of a large landslide in glaciolacustrine clays in the Trièves area (French Alps). *Engineering geology* 109, 45-56.
- Renalier, F. Bièvre, G. Jongmans, D. Campillo, M. & Bard, P.Y. (2010) Characterization and monitoring of unstable clay slopes using active and passive shear wave velocity measurements, in R. D. Miller; J. D. Bradford & K. Holliger, ed., *Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar*, SEG Special Publications, in press.



Caractérisation diélectrique des roches dans la bande 500 MHz – 4GHz

Huiyan Wang, Doctorant GPM UMR 6634 CNRS, Ecole Doctorale de Rouen,

Bo li, Doctorant LCPC, Ecole Doctorale de Rouen

Cyrille Fauchard, CETE-NC, ERA23 Le Grand Quevilly,

cyrille.fauchard@developpement-durable.gouv.fr

Abstract

This work deals with the dielectric characterization of rocks at microwaves frequencies. 13 different rocks are studied and classified in function of their losses. A focus on chemical composition and anisotropy of specific rocks is presented. Some consequences in Ground Penetrating Radar (GPR) applications in civil engineering are discussed.

Résumé

Cette étude porte sur la mesure de la permittivité diélectrique complexe des roches utilisées dans les matériaux du génie civil. Après une description de l'origine et du type de roches étudiées, un modèle physique qui décrit leur permittivité lorsqu'ils sont soumis à des champs électromagnétiques hyperfréquences est présenté. Des échantillons sont mesurés en cavité cylindrique, cellule permettant d'estimer la permittivité diélectrique complexe des matériaux. Les roches sont classées selon leurs pertes. L'influence de la composition chimique et de l'anisotropie est abordée. Les conséquences sur les applications classiques - mesures des épaisseurs de chaussée et détermination de la compacité notamment - sont discutées. On montre ainsi l'importance pour les utilisateurs du radar géologique (ou en anglais, GPR) de posséder des bases de données sur les grandeurs diélectriques des roches qui composent les structures auscultées.

Introduction

Les roches étudiées sont issues des carrières de Basse-Normandie, lesquelles fournissent en granulats les constructeurs routiers sur une majeure partie de la région normande. Deux roches supplémentaires ont été étudiées : la pierre de Caen et l'amphibolite d'Arvieu, cette dernière roche constituant l'enrobé du tablier du Viaduc de Millau. L'objectif de cette étude est d'une part de créer une base de données des permittivités des roches utilisées dans les matériaux du génie civil, d'autre part, et dans le cadre de travaux connexes, d'utiliser ces données dans le cadre d'une application qui vise à mesurer la compacité des enrobés bitumineux.

Ces roches sont d'origines sédimentaires - détritiques (grès, quartzite) ou d'origine chimique et biologique (calcaire) - métamorphiques (quartzite, amphibolite, gneiss, schiste, cornéenne) ou magmatiques - extrusives (rhyolite) ou intrusives (granite)

Leurs permittivités diélectriques (relatives) sont mesurées en cavité cylindrique aux fréquences de [0,57 ; 1,25 ; 1,32 ; 2,06 ; 2,63 ; 4,13] GHz. Cette plage couvre les fréquences usuelles du GPR appliqué aux structures du génie civil (routes et bétons en particulier) où les profondeurs recherchées sont au maximum et généralement de l'ordre de 1 à 2 m.

Permittivité diélectrique des roches étudiées

Les roches mesurées sont issues des carrières localisées sur la Figure 19. Au total, environ 100 échantillons de roches de 13 carrières différentes - 3 ne figurant pas sur la carte - ont été usinés en cylindres d'une hauteur $h=2,56$ cm et d'un diamètre $\phi=5$ cm. La permittivité est estimée pour chaque échantillon aux 6 fréquences sus-citées. Par ailleurs, chaque échantillon fait l'objet de 2 mesures. Les résultats sont représentés sur la Figure 20.

La géologie locale a été prise en compte pour chaque carrière, mais il est difficile d'établir un lien direct entre les processus de formation géologique des roches (magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires) et les permittivités mesurées. La permittivité effective des roches sèches peut être étudiée en fonction de sa composition chimique, selon une relation empirique ([1], p242) :

$$\varepsilon_r' = \prod_i \varepsilon_i^{\theta_i} \quad (\text{équation 1})$$

où ε_i est la permittivité de la composante i et θ_i sa fraction volumique, i étant un minéral comme la silice ou l'oxyde d'aluminium. Cette relation est valable pour les roches sèches, qui ne contiennent pas de minéraux argileux ou de composants conducteurs ou semi-conducteurs. On note que les quartzites et grès-quartzites – entourées en rouge sur la Figure 20 –, composés de 92 à 96% de dioxyde de silice (SiO_2), ont des permittivités relatives réelles très proches ($\sim 4,5 \pm 0.1$), et des pertes faibles (la tangente de perte δ étant définie comme le rapport de la permittivité imaginaire sur la permittivité réelle, $\tan\delta \sim 0,01$: la propagation des ondes radar dans ces roches, à cette échelle et ces fréquences, s'apparente à celle qui aurait lieu dans un diélectrique parfait. Les autres roches ont des permittivités réelles plus élevées, notamment dues à une part plus importante d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3 , $\varepsilon_r \approx 9,3-11,5$) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3 , $\varepsilon_r \approx 15$). Les roches à pertes sont essentiellement des grès (schisteux et quartzeux (ou cornéennes)), le granite, la rhyolite. Les compositions chimiques de ces éléments ne sont pas encore connues. Ces pertes sont cependant faibles, et restent acceptables pour des applications radar sur chaussées par exemple.

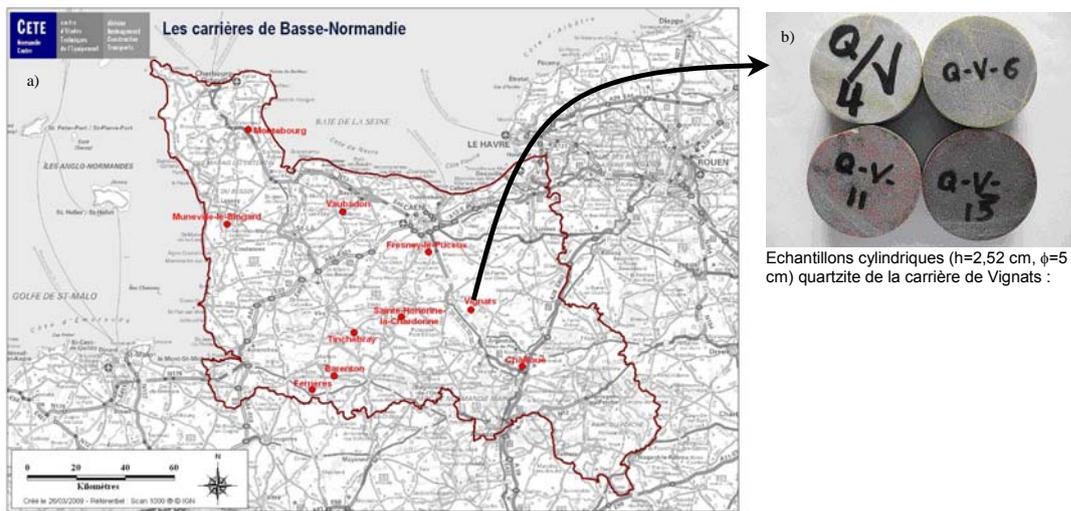


Figure 19 : a) Localisation géographique des carrières où ont été prélevées les roches étudiées. b) Échantillons de quartzite extraits de la carrière de Vignats et étudiés au § 3.

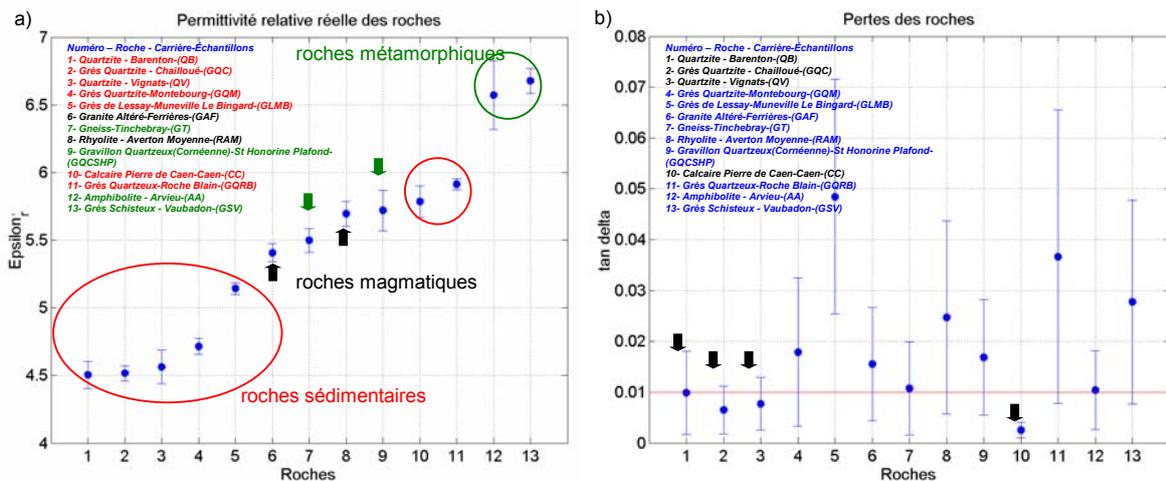


Figure 20 : a) Permittivité relative réelle et b) tangente de pertes des roches étudiées.

Influence de la composition chimique et de l'anisotropie des roches

Parmi les roches étudiées, la composition chimique de la quartzite de Vignats est connue plus en détail. La roche a été extraite en quatre points de prélèvement de la carrière (Tableau 1). Les permittivités diélectriques mesurées sont données en fonction de la fréquence de résonance (des trois premiers modes TM) de deux cavités cylindriques et sont présentées dans la Figure 21 et résumées dans le Tableau 2. La quartzite de Vignats présente visuellement des différences notables (Figure 19, b, quartzite blanche, rouge, grise et rouge veine), que l'on peut relier à la composition chimique de l'échantillon. Il en est de même pour la permittivité réelle mesurée : celle de la quartzite blanche est de $\epsilon_{r,mes} \approx 4,40 \pm 0,06$ et calculée selon l'équation 1 de $\epsilon_r \approx 4,3(6)$, et celle de la quartzite rouge respectivement de $\epsilon_{r,mes} \approx 4,67 \pm 0,06$ et de $\epsilon_r \approx 4,7$. Cette dernière contient une proportion plus importante de dioxyde de titane (Ti , $\epsilon_r \approx 110$) et d'oxyde ferrique. La permittivité imaginaire de la quartzite de Vignats reste globalement faible par rapport à la permittivité réelle. La dépendance fréquentielle apparente est en discussion : l'effet de certains minéraux est à prendre en compte ; La qualité de la mesure de la permittivité imaginaire en cavité cylindrique n'est pas suffisante ; Le degré de précision recherché reste à définir selon les applications (mesure d'épaisseur, teneur en eau, compacité...).

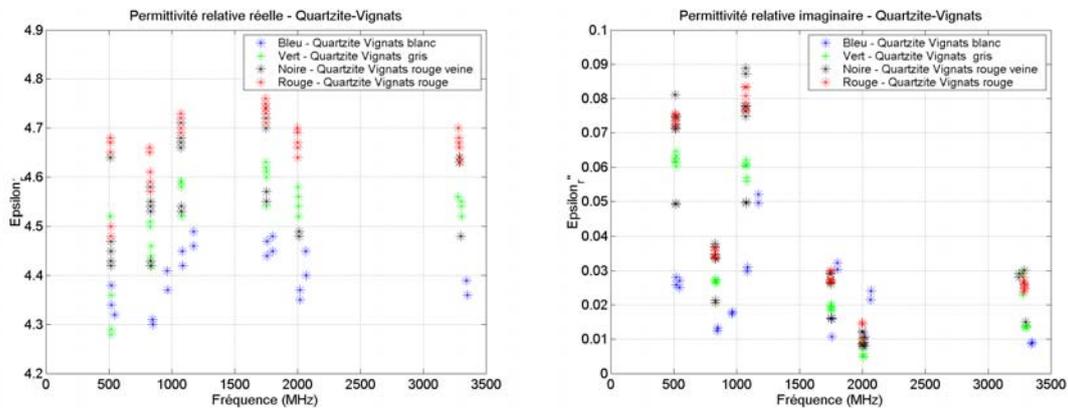


Figure 21 : Permittivité diélectrique réelle et imaginaire de la quartzite de Vignats en quatre points de prélèvements

Tableau 1 : Composition chimique de la quartzite de Vignat en quatre points de prélèvements

Quartzite	Composition chimique (en % volumique)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu	CO ₂
Blanche	92,40	3,80	0,00	0,00	0,00	0,07	0,38	0,20	3,07	0,00
Rouge	95,48	0,00	0,84	1,87	0,44	0,00	0,10	0,14	0,31	0,00
Rouge veine	96,30	2,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,17	0,14	0,57	0,00
Grise	93,20	2,82	0,10	0,00	0,60	0,11	0,56	0,96	1,50	0,50

Tableau 2 : Permittivités moyennes sur les six fréquences de la Figure 3

	ϵ_r' mesurées	ϵ_r'' mesurées	ϵ_r' calculées
Quartzite	ϵ_r'	ϵ_r''	ϵ_r'
Blanche	4,40+/-0,06	0,02+/-0,01	4,36
Rouge	4,67+/-0,06	0,04+/-0,02	4,68
Rouge veine	4,60+/-0,09	0,04+/-0,02	4,45
Grise	4,52+/-0,11	0,03+/-0,02	4,39

L'amphibolite d'Arviu (12) est une roche métamorphique du Massif Central. Elle a été étudiée dans la continuité de précédentes études [2]. La Figure 22, a) montre visuellement une anisotropie. Quand la roche se trouve sous forme de granulats dans les chaussées, cette anisotropie n'existe plus. La composition chimique, par ailleurs étudiée pour la même roche dans [3], n'est pas exactement connue, et l'étude précédente montre qu'elle peut être variable au sein d'une même formation. La permittivité réelle des échantillons prélevés perpendiculairement et parallèlement (8 de chaque orientation, mesurés 2 fois) aux « strates » est respectivement de $\varepsilon_r \approx 6,5 \pm 0,1$ et de $\varepsilon_r \approx 6,8 \pm 0,1$. Sur un ensemble de granulats, il convient donc de prendre la valeur moyenne comme référence. Ces valeurs minimale et maximale correspondent aux frontières de Wiener déterminées pour la permittivité d'un milieu stratifié et que l'on pourrait estimer si la composition chimique et la proportion de la matrice grise (Figure 4, a)) et des strates blanchâtres était connue. Cet exemple montre aussi que la caractérisation des roches en cavité dépend de la manière de prélever les échantillons, et qu'un nombre suffisant est nécessaire pour obtenir des valeurs statistiquement correctes.

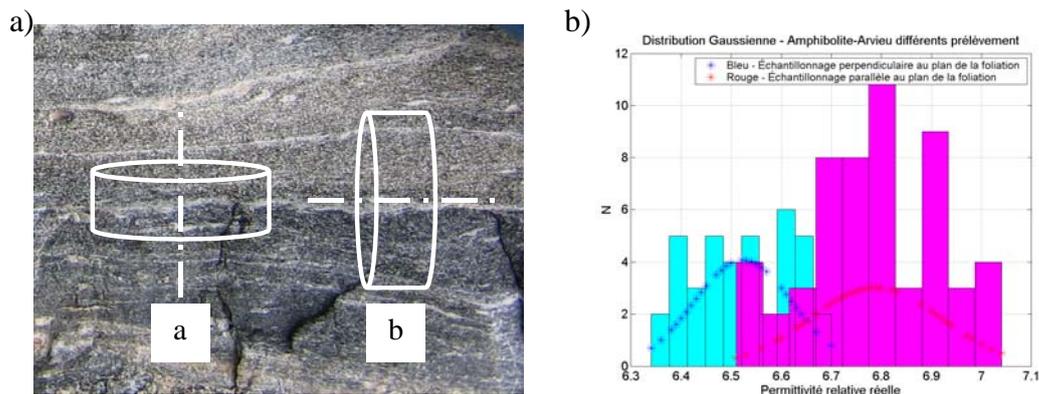


Figure 22 : a) Amphibolite d'Arviu étudiée selon l'anisotropie visuelle et b), permittivité réelle mesurée moyennée sur les six fréquences.

Conclusion et perspectives

Les roches représentent la matrice principale des enrobés bitumineux et des bétons hydrauliques. Leur caractérisation diélectrique est étudiée pour des applications classiques du génie civil, comme la détermination des épaisseurs de couches, la teneur en eau, la compacité. La connaissance de la composition chimique des roches permet d'estimer une permittivité diélectrique proche de celle mesurée (cas de la quartzite). L'anisotropie visuelle de l'amphibolite, qui résulte de sa formation à l'échelle géologique est aussi à prendre en compte. Cette étude, basée sur un grand nombre de mesures, permet d'évaluer les permittivités et leur variation au sein d'une même formation géologique, en carrière. La précision de la permittivité mesurée sur ces roches conditionne pour une part importante celle des modèles qui relient la permittivité aux grandeurs recherchées dans les applications du GPR.

Bibliographie sommaire

- [1] Guéguen Y., Palciauskas V., Introduction à la physique des roches, Ed. Hermann, 302 p, 1992
- [2] Fauchard C., Rejiba F., Dérobert X., Cote Ph. and Sagnard F., Step frequency radar applied for asphalt thickness measurements with various interface conditions, 12th international conference on Ground Penetrating Radar, June 2008
- [3] Nicollet C. et Leyreloup A., Pétrologie des niveaux trondhjémiques de haute pression associés aux éclogites et amphibolites des complexes letyno-amphiboliques du Massif Central Français, Journal canadien des sciences de la terre, Vol. 15, Number 5, November 15, pp. 696-707, 1978

Mots Clés : permittivité, roches, GPR, génie civil