



Journées Scientifiques AGAP Qualité 2017



RECUEIL des RESUMES

www.agapqualite.org

Programme Détaillé

Conférences : exposé 30 mn, questions 15 mn

Communications : exposé 15 mn, questions 5 mn

Mardi 21 Novembre				
13h00	Accueil, Inscriptions			
14h00	Ouverture, Discours d'accueil	J.M. Mouchel (Dir. METIS), J.P. Blais (Pres. AGAP-Q)		
14h30	Conférence : Le Grand Paris, Problématiques de reconnaissance	Jean-Pierre MAGNAN	IFSTTAR	
15h15	Ouverture Session "Innovations 1"			
15h15	Peut-on (doit-on) mesurer la permittivité avec les appareils 'EMI' ?	Julien Thiesson, Alain Tabbagh, François-Xavier Simon, Cyril Schamper, Mathias Pareilh-Peyrou	Sorbonne Université, METIS, INRAP,	
	Influence de l'enfoncement des électrodes sur un profil de Tomographie de Résistivité Electrique	<u>Cécile Verdet</u> , Colette Sirieix, Yannick Anguy, Rémi Clément, Cécile Gaborieau	I2M - univ. Bdx, IRSTERA	
	Système distribué pour des mesures de résistivité et de polarisation provoquée en 3D	Jean BERNARD, Julien GANCE , Benoit TEXIER, Orlando LEITE, Catherine TRUFFERT	IRIS-Instruments	
	Contrôle à distance d'un résistivimètre pour des mesures de suivi temporel de sites	Julien GANCE, Jean BERNARD, Orlando LEITE, Benoit TEXIER, Catherine TRUFFERT	IRIS-Instruments	*
16h15	PAUSE			
16h45	Reconnaissance géophysique pour la caractérisation des remblais suspects : une étude de cas à Poitiers	<u>Luis Henrique Cavalcante Fraga</u> , Cyril Schamper, Cécile Noël, Fayçal Rejiba et Roger Guérin	ENVISOL, METIS	
	Suivi de dépollution de solvants chlorés par méthodes géophysiques et en particulier par méthodes électriques	E. Nodot, J. Deparis, S. Gourry, S. Colombano	BRGM	
	Conception d'un dispositif de suivi par tomographie électrique 3D sur un pilote de dépollution	M.A Iravani, B. Francois, A. Mainault, J. Deparis, S. Colombano, R. Guérin, J.C. Gourry	BRGM	
	Reconnaissance géophysiques de la tourbière de Champgazon (Parc régional du Morvan, 58-Nièvre)	Girard Vincent, Jamonneau Adèle, Miloudi Mohamed Ramzi, Mohamedhen El Mostaph Cheikh Abdallahi, Nzengue Frid, Pibouleau Romain, Varais Nolan	METIS	
18h05	Visite de la Collection de Minéralogie			

* : exposé flash

[Accès direct au résumé en cliquant dans le programme](#)

Mercredi 22 Novembre			
09h00	Accueil, Inscriptions		
09h30	Conférence : Géophysique "Extra Terrestre"	Olivier GRASSET	LPG Nantes
10h15	Ouverture Session "Innovations 2"		
10h15	Acquisition magnétique multi-échelle pour imager des objets anthropiques.	<u>Pauline Le Maire</u> , Marc Munschy, Aline Dechamp	EOST, CARDEM, CEA-DAM
	Suivi de la consolidation d'un mélange sol-ciment par la méthode de polarisation provoquée.	Carole Kaouane, Lucile Saussaye, Yannick Fargier, <u>Sérgio Palma Lopes</u>	CEREMA, IFSTTAR
	Retour d'expérience, réhabilitation de la canalisation d'alimentation de la centrale hydro-électrique de Chamorand	<u>Frank Riviere</u>	FONDASOL
11h15	Pause	-	
11h45	La sismique par ondes de surface à partir d'enregistrements du bruit de fond suivant une antenne linéaire.	<u>Sylvain Fiolleau</u> , Christophe Vergnault, Cécile Cornou	EDF- CEIDRE, ISTERRE
	Méthode alternative d'analyse des ondes de surface pour l'imagerie 2D du sous-sol	Damien Pageot, Donatienne Leparoux, Yann Capdeville et Philippe Côte	IFSTTAR, LPG
	Effet d'une cavité sur les 2 composantes (horizontale et verticale) des ondes de Rayleigh dans le domaine fréquentiel: approche numérique et expérimentale	<u>Filippi Céline</u> , Leparoux Donatienne, Grandjean Gilles, Bitri Adnand, Côte Philippe	IFSTTAR, BRGM
	Utilisation de MNT pour la micro gravimétrie en zone montagneuse	Florsch Nicolas, Seoane Lucia, LLubes Muriel, Téreygeol Florian, Heckes Jürgen	UMMISCO, OMP-GET, LAPA- IRAMAT, DBM
13h05	REPAS		
14h30	Conférence : La Polarisation Provoquée: une nouvelle ancienne méthode géophysique	Nicolas FLORSCH	UPMC
15h15	Ouverture Session "Géologie-Hydrogéologie"		
15h15	Identification et caractérisation du profil d'altération en domaine de socle par imagerie électrique (ERT)	<u>Angélie Portal</u> , Pierre Belle, Francis Mathieu, Patrick Lachassagne and Nicolas Brisset	BRGM, DANONE
	Vers une utilisation de la méthode de Résonance Magnétique Protonique en milieu péri-urbain	<u>Clara Jodry</u> , Jean-François Girard, Sébastien Penz	EOST, BRGM
	Apport des sondages RMP à une meilleure caractérisation d'un aquifère libre en milieu semi-aride (Youssefia, Maroc)	<u>FatimZahra Ihabach</u> , Azzouz Kchikach, Mohammed Jaffal, Konstantinos Chalikakis, Roger Guerin, Es-said Jourani	L3G, EMMAH, METIS, OCP
16h15	Pause		
16h45	Etude hydrogéophysique de l'aquifère de la craie dans la région de Beauvais (Picardie) – Campagne 2016-2017	Pascale Lutz, Constance Mathé, Yaëll Conchis	UniLaSalle Beauvais
	PERMEABILITY ESTIMATION through FULL WAVE SONIC	<u>Jean Luc Mari</u> , Ana I. López, Beatriz Benjumea, J.L.García-Lobón	IFP School, IDGC, IGME
	Présentation d'un outil géophysique de caractérisation des mouvements de sol et de leur évolution dans le temps et dans l'espace. Exemple des Alpes-Maritimes	<u>Jean-Dominique GIRAUD</u>	2GI- consultant
17h45		-	
19h00	Diner de Gala "Musée du Vin"	-	

Jeudi 23 Novembre		-		
09h00	Conférence : Vers la caractérisation des processus d'écoulement et de transport dans les milieux très hétérogènes par les méthodes géophysiques	Laurent Longuevergne	Univ. Rennes1	
9h45	Ouverture Session "Ouvrages Hydrauliques"			
9h45	Combinaison de méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic d'ouvrages hydrauliques	<u>Théo Dezert</u> , Yannick Fargier , Sérgio Palma Lopes , Philippe Côte	IFSTTAR, CEREMA	
	Apports d'une maquette de digue pour l'intégration des méthodes géophysiques aux diagnostics de sûreté des ouvrages hydrauliques en remblai : l'exemple de la résistivité	Christophe Vergniault, Barthélémy Steck, Jean-Robert Courivaud, Gratien Vincelas	EDF (CEIDRE, R&D, CIH), CEREMA	
	Surveillance d'une digue maritime par écoute du bruit de fond sismique au cours d'un cycle de marée	Anaëlle Joubert, Mathieu Le Feuvre, Philippe Côte	IFSTTAR	
10h45	Pause			
11h15	La sismique par ondes de surface appliquée aux barrages en remblai et aux digues.	Christophe Vergniault, Adnand Bitri	EDF-CEIDRE, BRGM	
	Imagerie du contact d'un barrage avec sa fondation, par un pseudo Profil Sismique Vertical (PSV) en ondes S	Christophe Vergniault, Jean-Luc Mari	EDF-CEIDRE, IFP School	
	Auscultation du barrage du lac au Duc - Commune de Ploërmel (56) pour le monitoring électrique 2D	Loïc ARNOULT, Christopher BOULAY, <u>Arnaud LE GAL</u> , <u>Matthieu MOLINIE</u>	CALLIGEE Syndicat Eau	56
	Diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre maritime par Contrôle Non Destructif et fusion des données	Scarlett Gendrey, Vincent Garnier, Pierre Azemard, Cédric Payan	CEREMA, LMA	
12h35	Repas			
	Fin des 13èmes Journées Scientifiques de l'AGAP-Qualité			

Peut-on (doit-on) mesurer la permittivité avec les appareils 'EMI' ?

Julien Thiesson¹, Alain Tabbagh¹, François-Xavier Simon², Cyril Schamper¹, Mathias Pareilh-Peyrou³

¹ Sorbonne Université, UMR7619, Métis, case 105, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

² INRAP, 121 rue d'Alésia, 75014 Paris, ³LMV, 6 av. Blaise Pascal, 63170 Aubière

Abstract

For low frequency EMI instruments, when either the frequency or the distance between the Tx and Rx coils increases, a significant response generated by the ground electrical polarization may be observed in the in-phase component. In the case of the EM31 apparatus an example is given where measurements in both HCP and VCP configurations allowed mapping the apparent permittivity and the magnetic susceptibility.

Introduction

Dans le vaste domaine des méthodes de prospection électromagnétiques, on est amené à considérer deux approximations : dans la première on compare l'amplitude des courants de déplacement à celle des courants de conduction, dans la deuxième on compare le nombre d'induction à l'échelle géométrique de la méthode afin d'évaluer la portée (la profondeur d'investigation) de la mesure. Si l'on note σ la conductivité électrique, ϵ_r la permittivité relative (qui recouvre ici tous les types possibles de polarisation électrique) et ω la pulsation, la première compare σ à $\epsilon_0 \epsilon_r \omega$ et ne fait pas intervenir la géométrie, la deuxième compare $\sigma \mu \omega$ à $1/L^2$ où μ est la perméabilité magnétique et L un paramètre représentant l'échelle géométrique de la mesure, par exemple la distance en émission et réception. Cette deuxième approximation où la permittivité n'intervient plus est appliquée après que l'on ait négligé les courants de déplacement.

Les instruments comportant une bobine émettrice et une bobine réceptrice et utilisant une fréquence (LF ou VLF) inférieure à 300 kHz sont maintenant appelés 'EMI' (pour Electromagnetic Induction) après avoir été appelés 'Slingram', 'loop-loop' ou 'dipôle-dipôle'. Le plus utilisé ces 30 dernières années a été l'EM31 (Geonics Ltd, fréquence 9,8 kHz, écartement des bobines 3,66 m en configuration coplanaire). Le calcul sans approximation de la réponse d'un sol pour ce type d'appareil est possible en 1D comme en 3D. En 1D cette réponse se présente sous la forme d'une transformée d'Hankel dont le calcul est aisé avec la méthode de filtrage proposée par Ghosh (1971). Cependant, si l'on dispose d'un calcul complet sans approximation permettant d'évaluer le rôle de chacune des propriétés EM, il reste indispensable d'illustrer le sens physique des mesures et de dégager des règles simples d'emploi (et de première interprétation) en utilisant des approximations. La description des approximations successives est détaillée dans Thiesson et al. (2014). On applique d'abord $\sigma \gg |\epsilon_0 \epsilon_r \omega|$ puis, sous les hypothèses d'une altitude de mesure nulle et de $\mu = \mu_0$, on obtient pour un sol homogène une réponse, exprimée par le rapport du champ secondaire au champ primaire, dont le

développement limité a pour premier terme :
$$\frac{H_s}{H_p} = -\frac{i\sigma\mu\omega L^2}{4} \quad (1) \quad \text{où } i = \sqrt{-1}.$$
 La réponse,

proportionnelle à la conductivité, est ici en quadrature par rapport au champ primaire. Les travaux en prospection archéologique avec des appareils où l'écartement est métrique ont montré que dans ces conditions une réponse en phase existait et qu'elle était proportionnelle à la susceptibilité magnétique du terrain (Scollar et al. 1990). On a donc reconnu que cette classe d'appareils permettait une double prospection : sur la conductivité électrique par la mesure en quadrature et sur la susceptibilité magnétique par la mesure en phase. Toutefois les constructeurs (McNeill 1983) proposent de limiter l'usage des mesures en phase à la détection de cibles métalliques et les résultats en phase affichés par les appareils sont en ppt (parts per thousands) et ne sont pas transcrits en susceptibilité apparente. Ce choix s'explique par le fait que la mesure en phase peut être perturbée par de petites

déformations mécaniques de l'appareil et par le fait qu'une réponse en phase due à la conductivité apparait lorsque σ , L et/ou la fréquence augmentent.

Plusieurs expérimentations dans le domaine de la prospection archéologique où la fréquence des appareils utilisés était relativement élevée n'ont pu être interprétées qu'en prenant en compte dans la réponse en phase le rôle de la permittivité (Simon et al. 2015, Benech et al. 2016). Cet effet, qui cadre parfaitement avec une modélisation sans approximation, se trouve aussi illustré si l'on réintroduit les

courants de déplacement dans l'équation (1). On obtient alors
$$\frac{H_s}{H_p} = -\frac{i\sigma\mu\omega L^2}{4} + \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu\omega^2 L^2}{4} \quad (2)$$
 où

en première approximation l'effet de la permittivité est en phase et proportionnel au carré de la fréquence et au carré de l'écartement. Cet effet ne peut se manifester que si la permittivité est suffisamment forte. S'il n'y a que très peu de mesures *in situ* publiées, les mesures en laboratoire (Cosenza et al. 2008, Revil 2009) indiquent sans ambiguïté que des valeurs de l'ordre de $\varepsilon_r = 1000$ voire des valeurs plus élevées peuvent être atteintes. Il convient donc de reconsidérer les interprétations des mesures en phase en particulier pour les appareils où l'écartement est plus élevé que dans les appareils utilisés en prospection archéologique. Tel est le cas de l'EM31.

Sensibilité à la permittivité de l'EM31

En adoptant une altitude de mesure de $h=1$ m, on observe, à partir du calcul sans approximation, que les réponses en phase dues à la susceptibilité magnétique et à la permittivité sont linéaires mais avec des coefficients de proportionnalité qui dépendent de la configuration des bobines. Pour l'EM31 qui peut être utilisé en HCP comme en VCP, les coefficients sont donnés par :

EM31 (h=1m)	HCP	VCP
$\frac{\partial \left(\frac{H_s}{H_p} \right)}{\partial \varepsilon_r}$	$C_{HE} = 10,78 \text{ ppm}$	$C_{VE} = 7,60 \text{ ppm}$
$\frac{\partial \left(\frac{H_s}{H_p} \right)}{\partial \kappa_{ph}}$	$C_{HK} = -1,034 \text{ ppm}/10^{-5} \text{ SI}$	$C_{VK} = 3,36 \text{ ppm}/10^{-5} \text{ SI}$

A partir de deux mesures effectuées au même point, il devrait donc être possible de déterminer κ_{ph} et ε_r apparents mais on se heurte à l'existence d'un inévitable décalage du zéro (offset) en phase due en premier lieu à l'imparfaite compensation du champ primaire. Ce zéro (qui est de plus susceptible de varier pendant l'exécution des mesures du fait notamment de variations de la température extérieure et qui peut différer selon la configuration) peut être déterminé *in situ* en mesurant les variations de la réponse avec l'altitude mais cet étalonnage n'est pas toujours réalisé (il peut aussi être difficile à mettre en œuvre) et on doit alors trouver lors du traitement une procédure permettant son estimation.

Cas du Lac de Corent (Puy de Dôme, France)

Le plateau de Corent, au sud-est de Clermont-Ferrand, est constitué de plusieurs niveaux horizontaux de laves basaltiques et il comprend en son extrémité sud une dépression, le 'Lac de Corent', où se sont accumulés des sédiments quaternaires. L'étude des sédiments contenus dans ce 'piège' est particulièrement importante pour retracer l'évolution du climat au cours de l'Holocène dans cette région. Il a donc fait l'objet d'une prospection électromagnétique dans le cadre des travaux de thèse

de Matthias Pareilh-Peyrou (2016, thèse CIFRE entre le laboratoire Magma et Volcan et l'entreprise Ginger-CEBTP/Clermont-Ferrand). Ces prospections ont comporté, entre autres, une couverture EM31 en configuration HCP et une en configuration VCP. On dispose donc là d'un cas où les deux configurations ont été utilisées et, compte tenu du contexte géologique, où il est particulièrement important de séparer la contribution de la susceptibilité magnétique du sol de celle de la permittivité afin de bien caractériser l'évolution de ce milieu riche en oxydes de fer au cours de la pédogénèse.

La cartographie de mesures brutes en phase montre une absence de dérive et une absence de sauts attribuables à des modifications de la structure mécanique, mais les valeurs brutes affichées pour les principaux moments statistiques montrent un fort décalage des zéros, nettement plus élevé que la variabilité des mesures :

Phase EM31	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^{ème} quartile
VCP	-93,1 ppt	-82,0 ppt	-75,7 ppt
HCP	-52,6 ppt	-42,1 ppt	-32,4 ppt

La première étape du traitement a consisté, en négligeant l'effet de la viscosité magnétique, à calculer, à partir des conductivités obtenues en quadrature, les réponses en phase dues à la conductivité. Ces réponses ont été soustraites des réponses brutes. Dans le cas du Lac de Corent, la médiane des conductivités HCP étant de 16,1 mS/m (62 Ω.m) et celle des conductivités VCP de 17,1 mS/m (59 Ω.m) l'amplitude de cette correction reste modeste. On a ensuite procédé à une correction des zéros, permettant d'avoir, dans l'hypothèse où seule intervient la susceptibilité, des valeurs positives. La correction est de -15 ppt en HCP et de -140 ppt en VCP. Si l'on cartographie la susceptibilité magnétique ainsi obtenue, figure 1, de grandes différences sont observées avec des valeurs 6 fois plus fortes en VCP qu'en HCP. Ceci s'explique bien par le fait qu'en VCP la réponse de la permittivité vient s'additionner à celle de la susceptibilité alors qu'en HCP elle vient s'y soustraire.

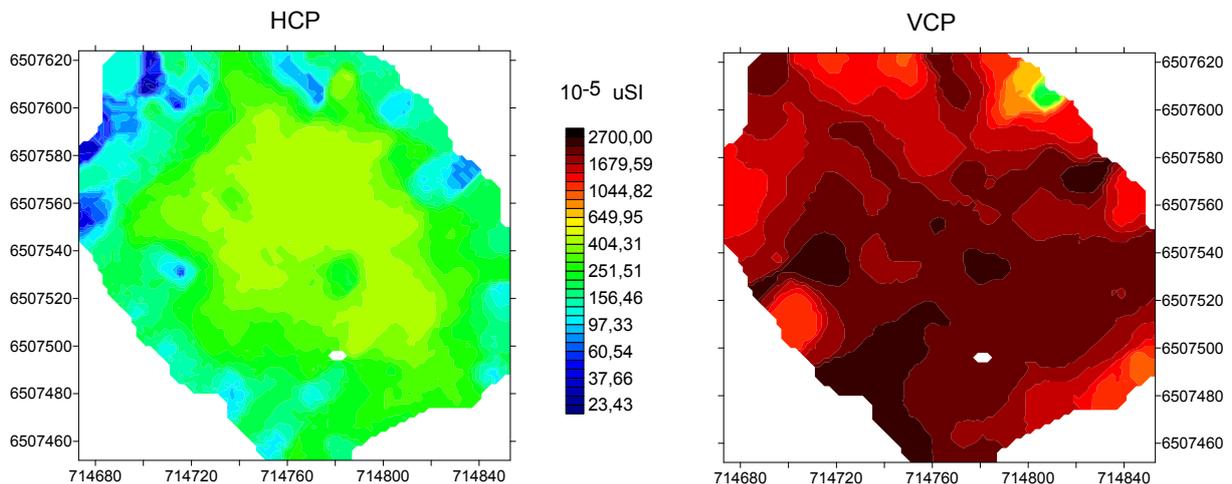


Figure 1 : susceptibilité magnétiques apparentes obtenues en ne considérant pas la permittivité

En prenant en compte la permittivité, les deux propriétés apparentes sont, en chaque point, solutions du système linéaire :

$$\text{PhaseHCP} - \text{zéroHCP} = C_{HE} \varepsilon_r + C_{HK} \kappa_{ph}$$

$$\text{PhaseVCP} - \text{zéroVCP} = C_{VE} \varepsilon_r + C_{VK} \kappa_{ph}$$

Ce système donne accès aux variations des deux propriétés mais il faut avoir déterminé les zéros ce qui n'a pas été le cas sur ce terrain. La procédure adoptée pour contraindre les valeurs des zéros a consisté à retenir le couple de zéros permettant d'avoir au premier décile des propriétés positives tout en minimisant le produit des médianes des deux propriétés. Avec $\text{zéroHCP} = -44$ ppt et $\text{zéroVCP} = -133$ ppt les médianes valent $\epsilon_r = 1449$ et $\kappa_{ph} = 10498 \cdot 10^{-5}$ SI. Le centre de la dépression apparaît donc sur les propriétés apparente comme moins polarisable que ses bord et plus magnétique.

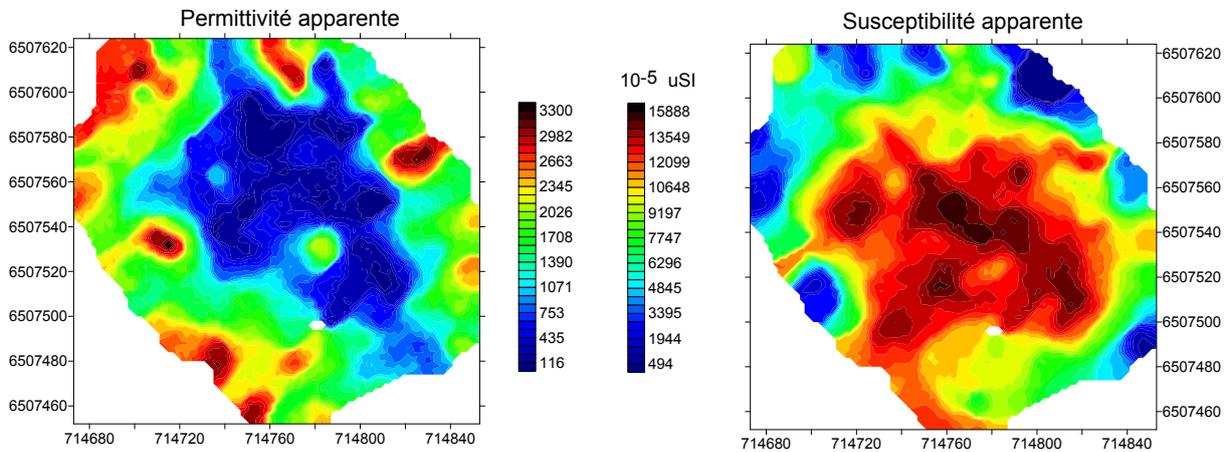


Figure 2 : Cartographies de la permittivité relative et de la susceptibilité magnétique à partir des réponses en phase de l'EM31 et HCP et en VCP.

Conclusion

Les deux cartes montrent des variations assez différentes dont l'interprétation est à préciser avec l'ensemble des autres informations en particulier les cartes réalisées avec un appareil EMI de moindre envergure, les mesures de tomographie électrique et les prélèvements d'échantillons.

Bibliographie

- Benech P., Lombard P., Rejiba F., Tabbagh A., 2016. Demonstrating the contribution of dielectric permittivity to the in-phase EMI response of soils: example of an archaeological site in Bahrain. *Near Surface Geophysics*, 14, 337-344.
- Cosenza P., Ghorbani A., Revil A., Zamora M., Schumtz M. Jougnot D., Florsch N., 2008. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks. *Journal of Geophysical Research*, 113, B08204.
- Ghosh D. P., 1971. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, 19, 192-217.
- Mc Neill J. D., 1983. Use of the EM31 in-Phase information. *Geonics Technical Note TN-11*, 3p.
- Pareilh-Peyrou M., 2016. Optimisation des méthodes à induction électromagnétiques pour l'ingénierie des sols. Thèse Université Blaise Pascal.
- Revil A., 2013. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz–1GHz. *Water Resources Research*, 49, 306-327.
- Scollar, I., Tabbagh A., Hesse A., and Herzog I., 1990. *Archaeological prospection and remote sensing*: Cambridge University Press.
- Simon F.-X., Tabbagh A., Sarris A., 2015. Measurement of the dielectric permittivity through multi-frequency EMI for archaeological prospection. *Archaeologia Polona*, 53, 372-375.
- Thiesson, J., Kessouri, P., Schamper, C., Tabbagh, A., 2014. Calibration of frequency domain electromagnetic devices used in near surface surveying. *Near Surface Geophysics*. 12, 481–491.

Mots-clés : Appareils EMI, permittivité, susceptibilité magnétique

Influence de l'enfoncement des électrodes sur un profil de Tomographie de Résistivité Electrique.

Cécile Verdet^{(1)*}, Colette Sirieix⁽¹⁾, Yannick Anguy⁽¹⁾, Rémi Clément⁽²⁾, Cécile Gaborieau⁽¹⁾

(1) Université de Bordeaux, UMR CNRS 5295 - I2M, Pessac. *cecile.verdet@u-bordeaux.fr

(2) IRSTEA, UR MALY, Villeurbanne Cedex, France

Abstract

This paper presents an approach on how to correct an electrode effect on micro-ERT inversion. The ERT profiles consist of 24 rod-like electrodes with a unit of electrode spacing of 4 cm with a mean embedment of 1.5 cm. We investigate here two synthetic models: a homogeneous half-space and a two-layered medium modelled with the complete electrode model (direct problem) and then inverted. We show that in the homogeneous case, the finiteness of the electrodes produces an unwanted effect, corrected by relying on an equivalent electrode point. In case of a two-layered medium, use of an Equivalent electrode point is far less crucial. Our sub meter ERT profiles are then safely applied to characterize the impact of a heat source on a limestone underground quarry wall.

Introduction

La tomographie de résistivité électrique (TRE) est largement utilisée pour estimer le degré de saturation des sols à l'échelle du terrain et à l'échelle du laboratoire sur des échantillons décimétriques (Gomez et al., 2010; Xu et al., 2015). Il existe bien moins d'études à une échelle intermédiaire, c'est-à-dire à une échelle métrique avec un espacement centimétrique des électrodes. Pourtant, des mesures TRE à cette échelle intermédiaire seraient adaptées pour suivre, par exemples, un front d'eau d'infiltration dans un mur de béton ou dans un ouvrage de maçonnerie en pierre naturelle, ou à la paroi d'une grotte dans le contexte de la conservation des grottes ornées. On s'intéresse ici à la paroi calcaire d'une carrière souterraine, équipée d'un profil de micro-TRE sub-métrique. Cette étude a deux objectifs : (1) suivre les variations de saturation dans la paroi au cours de l'année (variation saisonnière en réponse à l'infiltration des eaux de surface); (2) suivre les variations de saturation de la paroi au cours d'expériences de feux contrôlés (en Mai 2016 et Novembre 2016). L'objet de ces expériences de feux est de comprendre l'impact de la chaleur sur le calcaire en place. Pour se faire, un premier profil TRE a été implanté dans une partie de la carrière non soumise aux feux, et un second profil TRE implanté sur une paroi près du foyer. Ce double dispositif a permis d'acquérir simultanément des données sur une paroi soumise au feu et sur une autre non exposée au feu. Les données présentées ci-dessous ont été mesurée le 14 mars 2017, 4 mois après le dernier feu.

Lié aux faibles propriétés mécaniques des parois calcaires étudiées, les électrodes ont été enfoncées d'une profondeur égale à la moitié de l'espacement entre les électrodes. Rucker et al. (2010) ont montré que si l'enfoncement est supérieur à 20% de l'écartement, un effet d'électrode peut apparaître et impacter les résultats obtenus par TRE. Nous avons donc étudié si cet effet était présent dans nos enregistrements de résistivités, et le cas échéant, comment corriger cet effet

Géologie et paramètres de l'expérience

La carrière souterraine étudiée se situe dans le sud-ouest de la France, près de Bordeaux (Gironde). Elle se développe dans le calcaire Rupélien (28.1 – 33.9 Ma) et a été utilisée comme site d'extraction de pierre de construction dans la région Bordelaise. Ce calcaire montre une grande variabilité de faciès, avec des porosités allant de 15% à plus de 40%. Les parois

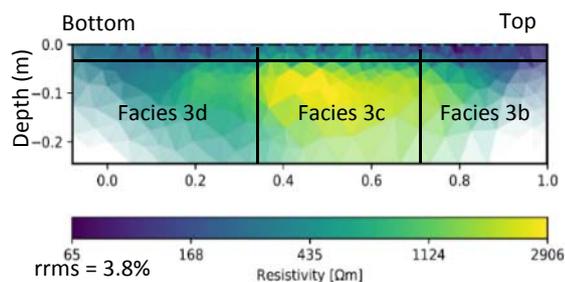


Figure 2: Inversion des données de terrain avec BERT (paroi soumise au feu)

1

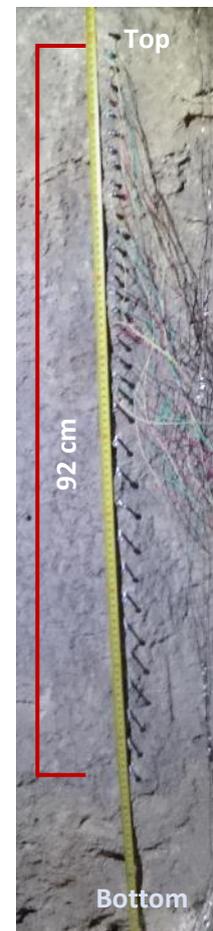


Figure 1: Profile sur la paroi soumise au feu

soumise et non soumise au feu ont été équipées de profils de 24 électrodes espacées de 4 cm (figure 1). Le calcaire ayant tendance à s'effriter vu sa faible cimentation, les électrodes ont été enfoncées en moyenne à 1.5 cm. Les mesures ont été réalisées avec un SyscalPro (Iris Instrument) utilisant une séquence en dipôle-dipôle comportant 349 quadripôles.

Les premières inversions ont été faites avec le code BERT de Günther et al. (2006) utilisant des points à la surface pour modéliser les électrodes. Sur la figure 2, la section inversée de la paroi soumise au feu montre une couche superficielle de 3 cm d'épaisseur sur une couche plus épaisse et plus résistive. Le long du profil vertical, la section montre un changement clair de résistivité suivant les trois faciès géologiques 3b, 3c et 3d échantillonnés de haut en bas par le profil (Verdet et al., 2016). La partie la plus profonde de la section montre une résistivité intermédiaire. Il s'agit donc de savoir si ces variations de résistivité peuvent être (en partie) liées à l'enfoncement des électrodes.

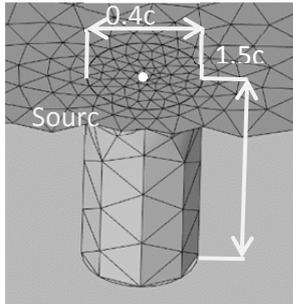


Figure 3: Maillage et géométrie de l'électrode

Modèle et correction sur données synthétiques

Il existe trois manières de modéliser les électrodes et le courant direct (DC) : le modèle de l'électrode ponctuelle, le modèle de l'électrodes complète et le modèle de la cellule conductrice (CCM) (Ronczka et al., 2015). Les deux dernières approches produisant des résultats comparables, nous avons choisi le modèle CCM lié au logiciel utilisé.

Le modèle synthétique CCM (et donc DC) a été modélisée sous Comsol Multiphysics en utilisant le code Matlab F3DM (Clement and Moreau, 2016). Nous nous sommes d'abord placé dans le cas d'un demi-espace homogène de 1000 Ωm. Les électrodes ont été modélisées comme des cylindres conducteurs de 1.5 cm de long et 0.4 cm de rayon, avec une conductivité de 10⁴ S.m⁻¹. Le courant est injecté en un point situé à la surface de l'électrode. Afin de coller au plus près des points de mesures sur le terrain, 349 quadripôles, à partir desquels est estimé le champ de résistivité apparente (ρ_a), sont implémentés. Le maillage construit sous Comsol est raffiné autour des électrodes (figure 3).

A l'heure actuelle, la forme complète des électrodes est difficilement prise en compte dans le processus d'inversion. Ainsi, nous avons choisi l'alternative proposée par Rücker and Günther (2011), à savoir, trouver une électrode ponctuelle équivalente (EEP). Nous avons donc construit un modèle alternatif utilisant une EEP à différentes profondeurs, de la surface (0 cm) jusqu'à une profondeur de 1.5 cm. L'objectif est de trouver l'EEP pour laquelle le champ électrique est le plus proche de celui obtenu avec le modèle CCM. Pour chaque profondeur d'EEP, la différence (η_k) entre le facteur géométrique du CCM (k_{CCM}) et de l'EEP (k_{EEP}) a été calculé suivant l'équation 1.

$$\eta_k = \frac{|k_{CCM} - k_{EEP}|}{k_{CCM}} * 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Avec le facteur géométrique $k = \frac{I * \rho}{V_M - V_N}$ avec V_M et V_N le potentiel aux électrodes de potentiel, I le courant mis à 1 A et ρ la résistivité du milieu à 1000 Ωm.

On considère que la profondeur d'EEP appropriée est celle à laquelle η_k < 2% pour tous les quadripôles. Les résultats sont présentés sur la figure 4. L'erreur η_k décroît jusqu'à 1.1 cm avant de ré-augmenter pour de plus grandes profondeurs. Le modèle synthétique est ensuite inversé avec un maillage raffiné autour des électrodes. Deux inversions ont été faites : une avec des électrodes ponctuelles en surface, l'autre avec une EEP à une profondeur de 1.1 cm. Les deux inversions sont comparées sur la figure 5. Le choix de la profondeur de l'EEP impacte clairement l'inversion : partant d'un demi-espace homogène, on obtient avec une EEP en surface un tri-couche fait d'une couche superficielle conductrice, une couche plus résistive à partir de 3 cm et une couche de résistivité intermédiaire plus en profondeur

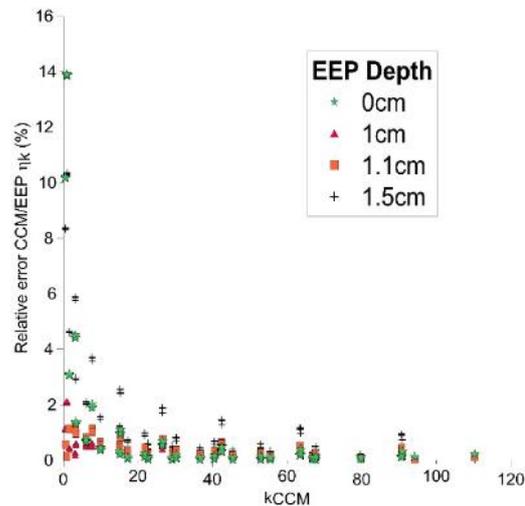


Figure 4: Différence entre les facteurs géométriques k_{CCM} et k_{EEP} pour chacun des 349 quadripôles vs. la profondeur de l'EEP.

(figure 5a). L'utilisation d'une EEP à une profondeur de 1.1 cm corrige cet effet puisque l'on obtient bien un demi-espace homogène à 1000 Ωm (figure 5b). La plus grande différence relative entre les résistivités obtenues avec une EEP en surface et celle du modèle homogène (1000 Ωm) est de 21%

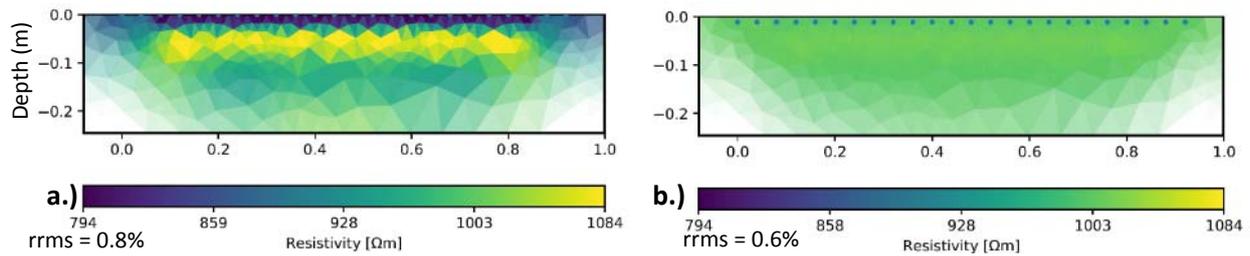


Figure 5: Inversions d'un demi-espace homogène DC CCM avec deux profondeurs d'EEP : en surface (a) et à 1.1 cm de profondeur (b). Les points bleus montrent la position des EEP.

alors qu'elle est seulement de 1% avec une électrode ponctuelle simulée à 1.1 cm de profondeur.

Cette stratégie a ensuite été appliquée à un milieu modèle bicouche fait d'une première couche conductrice de 480 Ωm sur une couche plus résistive de 2100 Ωm. Le modèle CCM a de nouveau été inversé avec une EEP en surface et une autre à 1.1 cm (figure 6).

En présence d'une couche superficielle conductrice, le choix d'une EEP en profondeur n'a de toute évidence que peu d'impact sur l'inversion par rapport au cas homogène précédent (figure 5). La valeur de ρ_{inv} moyennée le long du profil à une profondeur de 1 cm dans la couche conductrice vaut par exemple 474 Ωm pour le modèle CCM inversé avec une EEP à 1.1 cm. Cette valeur est proche de la valeur (480 Ωm) du modèle initial comparé au cas de l'EEP en surface qui donne une valeur de 398 Ωm. A une profondeur de 9 cm dans la couche plus résistive, on obtient une résistivité moyenne de 2231 Ωm avec une EEP à 1.1 cm vs. 2154 Ωm avec une EEP en surface, donc un peu au-dessus des 2100 Ωm attendus. Dans le cas du bicouche, la correction proposée n'est pas cruciale si l'on

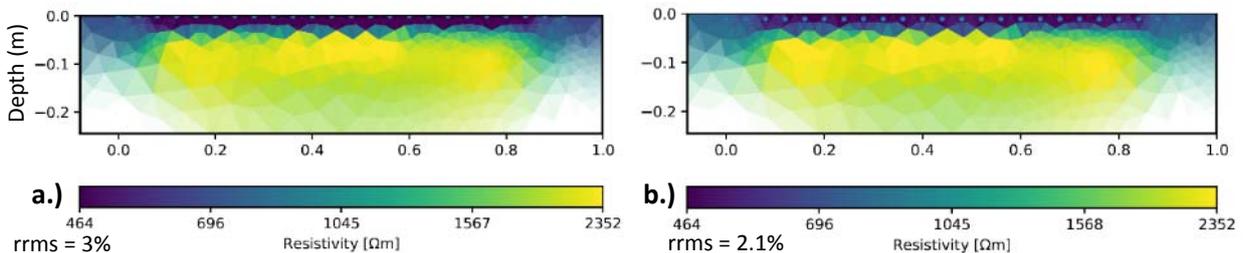


Figure 6: Inversion du modèle bicouche CCM avec deux profondeurs d'EEP : a. à la surface; b. à 1.1 cm. s'intéresse aux variations relative de la résistivité. Du point de vue des valeurs absolues de la résistivité, le modèle CCM combiné avec une EEP à 1.1 cm de profondeur est recommandé.

Application sur des données de terrains

Cette stratégie de correction des effets liés à la taille finie des électrodes par inversion avec une EEP à 1.1 cm de profondeur a été appliquée aux données de terrain acquises discutées par exemple sur la figure 2. Les résultats sont présentés sur la figure 7. Pour la paroi soumise au feu, comme on peut s'y attendre au vu des résultats ci-dessus, l'utilisation d'une EEP en surface (figure 2) et à 1.1 cm (figure

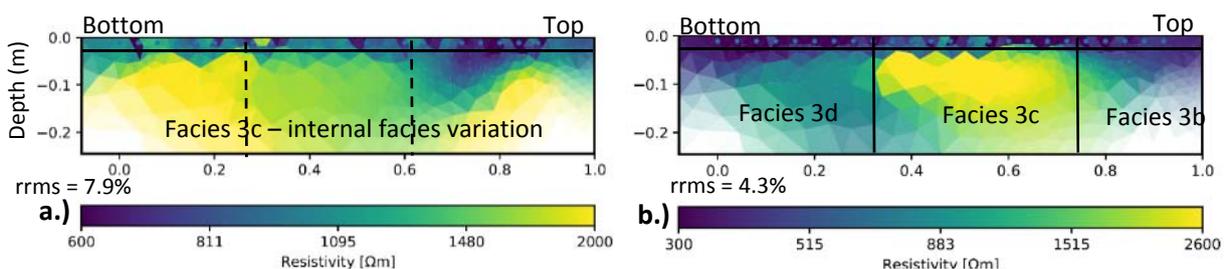


Figure 7: Résultats d'inversion pour les données de terrain avec un EEP à 1.1 cm. (a) non soumis au feu et (b) soumis au feu.

7b) donne des sections inversées tout à fait comparables.

La section inversée sur la figure 7a révèle que la paroi non soumise au feu est un bicouche avec une couche superficielle de résistivité moyenne de 927 Ωm à 1 cm de profondeur. La couche plus profonde montre une résistivité de 1700 Ωm à 9 cm. La section inversée de la figure 7b montre que la paroi soumise au feu est un tri-couche avec une couche superficielle peu résistive (résistivité moyenne de 450 Ωm à 1 cm) sur une couche plus résistive (de moyenne 2973 Ωm à 9 cm). Dans la partie la plus profonde, la section présente une troisième couche de résistivité moyenne 1560 Ωm à 20 cm proche de la couche à 1700 Ωm caractérisée sur le profil non soumis au feu (figure 7a).

Conclusion

Nous avons montré que dans le cas d'un demi-espace homogène, la profondeur des électrodes a un effet important sur les inversions de TRE qui doit être corrigé. Pour cette correction, nous avons trouvé que la profondeur d'EEP appropriée est celle associée à une différence entre les facteurs géométriques du CCM et de l'EEP inférieure à 2%. Une fois la profondeur d'EEP trouvée, les données peuvent être inversées en donnant une profondeur au point source lors de l'inversion. Dans ce cas d'étude, nous avons trouvé un EEP à 1.1 cm de profondeur pour des électrodes enfoncées à 1.5 cm et un espacement inter-électrode de 4 cm. Dans le cas d'un bicouche (conducteur sur résistif), l'enfoncement des électrodes montre un effet mineur sur les inversions. Tout ceci montre que les données de champ électrique acquises sur une roche stratifiée / laminée avec une première couche conductrice, comme les calcaires, peuvent être inversées telles quelles (dans un outil qui ne prend pas en compte la géométrie des électrodes) et qu'un EEP à la profondeur adéquate améliore uniquement la précision des résistivités obtenues.

La comparaison entre les données de terrain acquises sur les parois d'une carrière souterraine soumise et non soumise au feu montre que la chaleur transforme durablement le calcaire : d'un bicouche, nous passons à un tri-couche (conducteur sur résistif, sur résistif moyen) avec en profondeur (niveau résistif moyen), une résistivité caractéristique du massif. Cette transformation est confortée par des mesures de porosité montrant une augmentation de celle-ci en surface et décroissante avec la profondeur. La minéralogie peut aussi expliquer la nature plus conductrice de la couche la plus superficielle puisque de l'illite y est observée.

Bibliographie

- Clement, R., Moreau, S., 2016. How should an electrical resistivity tomography laboratory test cell be designed? Numerical investigation of error on electrical resistivity measurement. *J. Appl. Geophys.* 127, 45–55. doi:10.1016/j.jappgeo.2016.02.008
- Gomez, C.T., Dvorkin, J., Vanorio, T., 2010. Laboratory measurements of porosity, permeability, resistivity, and velocity on Fontainebleau sandstones. *GEOPHYSICS* 75, E191–E204. doi:10.1190/1.3493633
- Günther, T., Rücker, C., Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. *Geophys. J. Int.* 166, 506–517. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03011.x
- Ronczka, M., Rücker, C., Günther, T., 2015. Numerical study of long-electrode electric resistivity tomography — Accuracy, sensitivity, and resolution. *GEOPHYSICS* 80, E317–E328. doi:10.1190/geo2014-0551.1
- Rücker, C., Günther, T., 2011. The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. *GEOPHYSICS* 76, F227–F238. doi:10.1190/1.3581356
- Rucker, D.F., Loke, M.H., Levitt, M.T., Noonan, G.E., 2010. Electrical-resistivity characterization of an industrial site using long electrodes. *GEOPHYSICS* 75, WA95-WA104. doi:10.1190/1.3464806
- Verdet, C., Sirieix, C., Anguy, Y., Gaborieau, C., Ferrier, C., Leblanc, J.-C., Mindeguia, J.-C., Puyo Lacanette, D., Naessens, F., Allègre, V., Sommier, A., Queffelec, A., 2016. Suivi par micro-tomographie de résistivité électrique d'une paroi de carrière calcaire soumise au feu. Presented at the 10ème Colloque GEOFCAN (Approche GEOphysique et structurale de l'organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisées et Naturelles), BRGM, Orléans, p. 4p.

Xu, S., Sirieix, C., Ferrier, C., Lacanette-Puyo, D., Riss, J., Malaurent, P., 2015. A Geophysical Tool for the Conservation of a Decorated Cave – a Case Study for the Lascaux Cave. *Archaeol. Prospect.* 22, 283–292. doi:10.1002/arp.1513

Mots clés : micro-TRE, Feu, circulation d'eau, parois, grotte, carrière souterraine, effet d'électrode.



Système distribué pour des mesures de résistivité et de polarisation provoquée en 3D

Jean BERNARD, Julien GANCE , Benoit TEXIER, Orlando LEITE, Catherine TRUFFERT

IRIS Instruments, 1, avenue Buffon, 45 100 Orléans, sales@iris-instruments.com

Summary

A geometry free Resistivity Induced Polarization distributed system (**FullWaver**) has been developed for acquiring 3D images of underground structures. The system includes a set of fixed and independent receivers continuously recording the signals and a transmitter with a current recorder, GPS synchronized. The current electrode is moving in any direction and distance with respect to the receivers. The high resolution data are collected at the end of the survey for further processing and interpretation with 3D software.

Introduction

La prospection électrique a bénéficié il y a une vingtaine d'années d'une évolution technologique majeure qui a conduit à la mise au point de systèmes multi-électrodes assurant la réalisation automatisée de profils de résistivité (panneaux électriques) à un coût nettement plus faible que les équipements traditionnels. Les systèmes multivoies, capables de commuter automatiquement un grand nombre d'électrodes reliées à un récepteur centralisé par des câbles multibrins, ont ainsi permis de généraliser l'acquisition d'images 2D de résistivité et de polarisation provoquée.

Plus récemment, la nécessité d'effectuer des analyses 3D de structures de plus en plus profondes et /ou localisées dans des terrains à forte topographie ou à accessibilité réduite a amené la conception d'une nouvelle génération d'équipements de prospection électrique que sont les systèmes distribués et autonomes. Les boîtiers récepteurs qui les constituent peuvent être placés à des distances quelconques les uns par rapport aux autres et ne sont pas reliés entre eux par des câbles. Ces systèmes distribués, très flexibles d'utilisation, offrent des coûts logistiques réduits, des rendements d'acquisition de mesures élevés et une analyse 3D d'autant plus détaillée que le nombre de position des électrodes de courant est important et que leur direction est variée.

Description du système distribué FullWaver

Dans un équipement multi-électrodes classique, les électrodes d'émission et de réception sont situées sur un axe, reliées par un câble multibrins à espacement fixe, typiquement 5 m ou 10 m, qui est adapté à des mesures 2D à maille régulière (Fig 1).

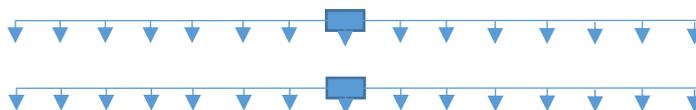
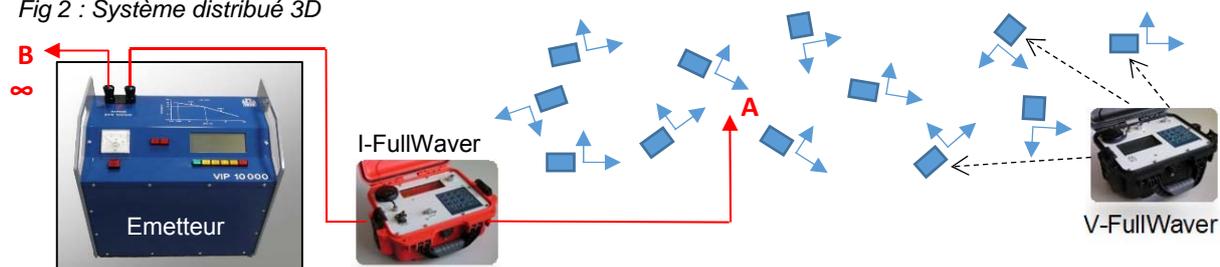


Fig 1 : Profils électriques 2D à maille régulière

Dans l'équipement distribué **FullWaver**, les électrodes de courant de l'émetteur se déplacent librement parmi un ensemble de récepteurs indépendants et fixes, mesurant chacun les deux composantes perpendiculaires du champ électrique. Les récepteurs sont disposés à une distance quelconque les uns des autres (Fig 2).

Fig 2 : Système distribué 3D



Chaque récepteur **V-FullWaver** (typiquement 20-25 récepteurs sont utilisés) enregistre les échantillons de tension (signal, PP, PS, bruit, ...) pendant toute la journée. Un GPS intégré permet d'assurer a posteriori la synchronisation des mesures avec l'enregistreur de courant **I-FullWaver** branché en série avec l'émetteur. A la fin de la journée, les données des enregistreurs de tension et de courant sont transférées sur un PC pour le filtrage des données et l'élaboration du fichier de résistivité apparente des mesures de la journée, prenant en compte les coordonnées de toutes les électrodes. Un logiciel d'inversion 3D peut alors être utilisé pour fournir une image en volume de la zone étudiée.

Détermination du module de la résultante du champ électrique

Chaque récepteur V-FullWaver possède deux voies d'entrée et mesure deux composantes orthogonales du champ électrique E_x et E_y . De ce fait, et quel que soit la position effective des électrodes d'injection de courant dans le plan horizontal, il est toujours possible de bien caractériser le champ électrique du point de mesure en évitant l'écueil d'une composante unique qui serait mal orientée par rapport au courant. La résistivité apparente et la chargeabilité M sont définies à partir du module de la résultante du champ électrique E à l'aide des formules suivantes :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad M = \frac{\sqrt{(m_x V_x)^2 + (m_y V_y)^2}}{V_x^2 + V_y^2}$$

Prendre en compte la résultante du champ électrique plutôt qu'individuellement chacune de ses composantes permet de stabiliser spatialement les mesures en minimisant par exemple les effets des incertitudes de positionnement des électrodes et en réduisant le nombre de résistivités apparentes négatives. Une comparaison de cartes de résistivité apparente déterminées à partir des composantes Nord-Sud, Est-Ouest et à partir de la résultante est donnée Fig 3. On y constate que les anomalies sur la carte de la résultante ne sont pas biaisées par l'orientation des dipôles de mesure.

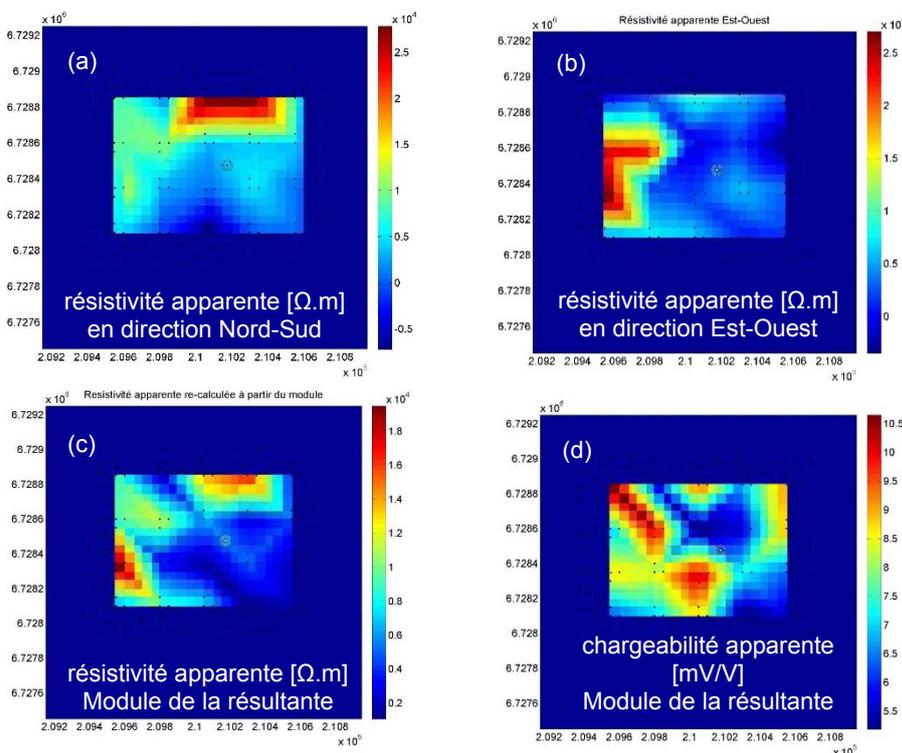


Figure 3 : Cartes de résistivité en direction NS (a), EO (b), en module (c) et de chargeabilité définie sur le module du champ résultant (d)

Traitement et filtrage des données

Le stockage de tous les échantillons en série temporelle offre le choix de plusieurs traitements :

- une moyenne de tous les échantillons (simple accumulation),
- une moyenne des échantillons après élimination automatique des périodes bruitées (pics, ...),
- une moyenne pendant des périodes de temps sélectionnées manuellement par l'opérateur.

La figure 4 montre les données brutes et accumulées d'une durée d'enregistrement donnée.

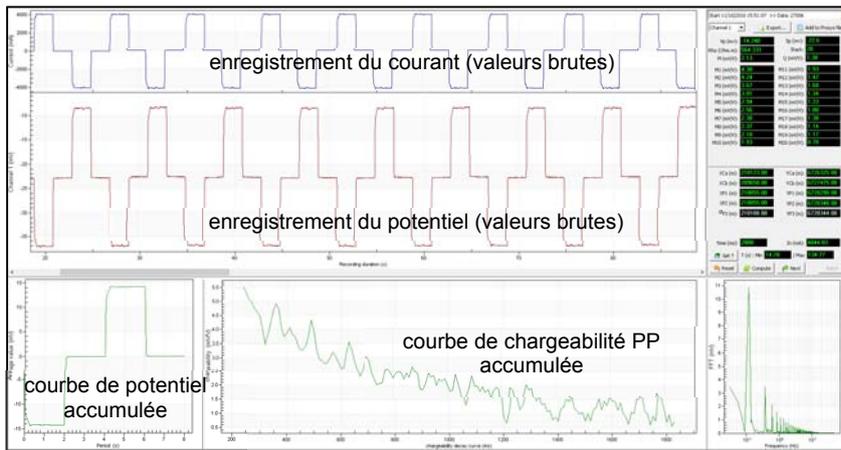


Figure 4 : Ecran PC du traitement des données brutes (enregistrement du courant et du potentiel)

Positionnement des électrodes et visualisation des points de report

Pour faciliter le travail de préparation du géophysicien, un logiciel a été conçu pour choisir la position des électrodes de potentiel (V-FullWaver) et des points d'injection sur la carte affichée sur Google Earth (voir Fig 5). Le géophysicien peut ainsi, à partir d'une grille au départ régulière, modifier a priori la position de certains points de mesure selon l'accessibilité du terrain. Les coordonnées GPS des électrodes qui seront enregistrées par l'application peuvent ensuite être automatiquement transmises aux opérateurs de terrain pour minimiser les risques d'erreur de positionnement.

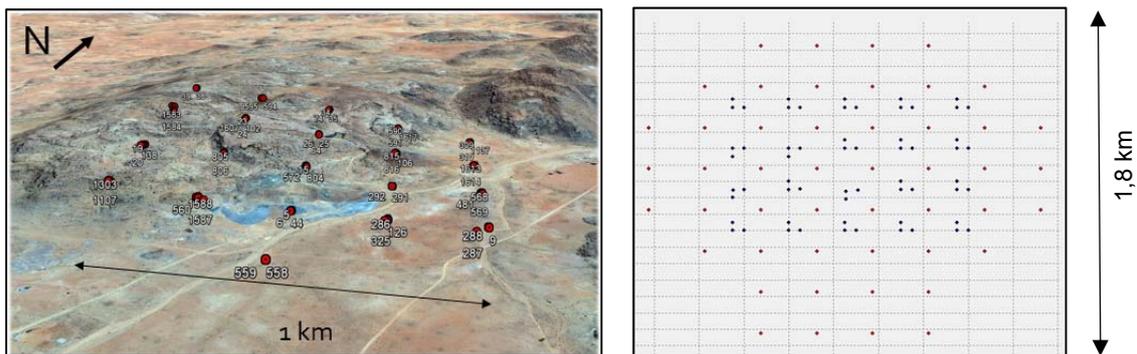


Figure 5 : Représentation des positions des électrodes du système distribué FullWaver sur Google Earth à gauche et sur un plan à droite (électrodes de courant en rouge, électrodes de potentiel en bleu). Etude en Afrique du Sud, l'électrode de retour de courant est située environ à 1 km au Sud de la zone.

Par ailleurs, il est également possible de représenter en perspective les points de report théoriques des mesures qui seront effectuées de façon à se rendre compte, au moment de la conception du levé, que la profondeur d'investigation requise sera bien atteinte, en fonction de l'écartement entre les électrodes de courant et celles de potentiel (voir Fig 6).

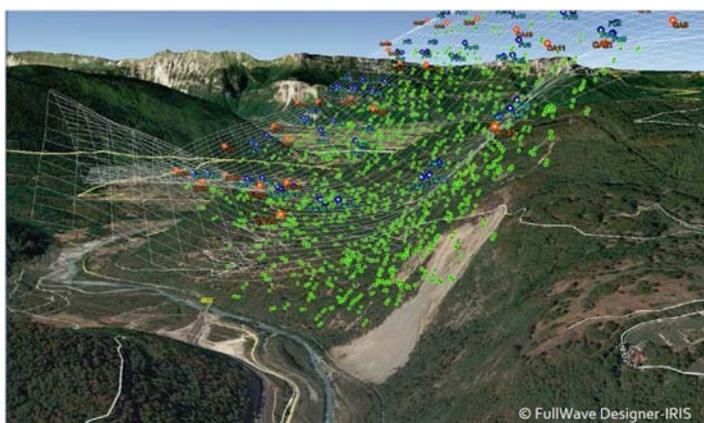


Figure 6 : Position des électrodes de courant (en rouge), de potentiel (en bleu) et des points de report théoriques (en vert). Glissement de terrain de la Séchillienne, France.

Interprétation 3D des structures

Dans les méthodes électriques, la profondeur d'investigation dépend de la distance entre les électrodes de courant et celles de potentiel. La résolution latérale quant à elle dépend de la distance entre les points de mesure.

Dans le cas des systèmes distribués où les mesures sont réellement effectuées en 3D, à la différence de plusieurs profils 2D interprétés avec un logiciel 3D, il est intéressant de noter que plus les informations proviennent de directions de courant différentes (N, S, E, O par exemple), plus l'inversion sera contrainte et mieux le modèle final sera potentiellement résolu.

La figure 7 donne un exemple de résultats 3D de résistivité et de PP obtenus en Afrique du Sud.

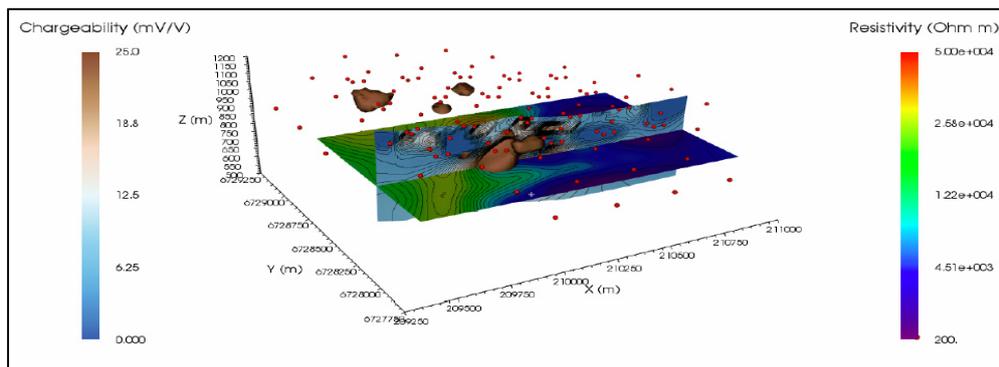


Figure 7 :
Interprétation
de mesures de
résistivité et
en PP pour de
une
exploration
minière en
Afrique du Sud

Conclusion

Ce système distribué de résistivité et de polarisation provoquée **FullWaver** permet d'acquérir des mesures véritablement en 3D à un coût raisonnable, sans gestion laborieuse de câbles.

Les domaines d'application visés par ces systèmes sont les ressources souterraines profondes (exploration minière, géothermie) et la caractérisation des risques à fort enjeu telle que les glissements de terrain.

A l'instar de la sismique 3D pour l'exploration pétrolière, l'exploration minière peut espérer que ces systèmes d'acquisition de résistivité et de polarisation provoquée en 3D augmentent les chances de succès des futures découvertes.

Bibliographie

- Bernard J., O. Leite, 2016, Distributed Resistivity and Induced Polarisation 3D Imaging system for deep mineral exploration : présenté à la 7^{ème} International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, Pékin ;
- Bernard J., 2016, Data Acquisition and Processing of a distributed 3D Induced Polarization Imaging system : présenté au IP processing and QC Workshop du 25^{ème} congrès de l'ASEG, Adelaide ;
- Eaton P., B. Anderson, S. Queen, I. Mackenzie, and D. Wynn, 2010, NEWDAS – the Newmont Distributed IP Data Acquisition System : présenté au 80^{ème} congrès annuel de la SEG, Denver ;
- McGill D., D. Farquhar-Smith, 2015, A comparison of 3D DCIP data acquisition methods, Quantec : présenté au 24^{ème} congrès de l'ASEG, Perth ;
- Truffert C., O. Leite, J. Gance, B. Texier et J. Bernard, 2017 : Large 3D Resistivity and Induced Polarization acquisition using the Fullwaver system: toward an adapted processing methodology, présenté à l'assemblée générale de l'EGU, Vienne ;
- Truffert C., J. Gance, O. Leite, F. Verneersch, B. Texier et J. Bernard, 2017 : Système distribué pour les mesures de résistivité et de polarisation provoquée en 3D - FullWaver, présenté à l'Atelier RESIF, Montpellier ;

Mots clé : résistivité, chargeabilité, polarisation provoquée, système distribué, mesures 3D.

Contrôle à distance d'un résistivimètre pour des mesures de suivi temporel de sites

Julien GANCE, Jean BERNARD, Orlando LEITE, Benoit TEXIER, Catherine TRUFFERT

IRIS Instruments, 1 avenue Buffon, 45 100 Orléans, sales@iris-instruments.com

Summary

A monitoring unit, the SMU, has been developed to remotely control from a Web page a resistivity, Self Potential and Induced Polarization equipment, the SYSCAL Pro. The unit can be connected to Ethernet, Wifi or 3G /4G. The schedule start time can be programmed, also the sequence of measurements to carry out. The data can be transferred to a FTP or SSH server or by email. Alerts can be transmitted by email in case of dysfunction (battery problem, erroneous readings and transfer issue).

Introduction

Les matières, gaz, fluides et transfert d'énergie à l'interface sol / atmosphère régissent le sol, la roche et l'évolution de la vie dans la zone critique. Les variations dans le temps de la résistivité électrique de proche surface, de la polarisation spontanée, de la polarisation provoquée (chargeabilité) sont suffisamment liées aux processus pour fournir aux géoscientifiques des indications pertinentes dans cette zone fortement étudiée. De telles mesures non invasives sont directement sensibles à une large gamme de paramètres remarquables (teneur en eau du sol, température, conductivité de l'eau du sol, teneur en argile, etc.). Afin d'accroître la compréhension des processus physiques, chimiques et biologiques, la surveillance simultanée de la résistivité, de la polarisation spontanée et de la polarisation provoquée demeure une méthode peu coûteuse et puissante.

Que ce soit pour accroître des connaissances de processus encore mal connus, pour détecter une fuite de zone de stockage de déchets ou pour surveiller des glissements de terrain, ces études doivent être menées pendant une période de temps suffisamment longue, à l'échelle du mois, de l'année voire de plusieurs années. Néanmoins, les opérateurs n'ont pas besoin d'être présents sur place tout le long de ce suivi temporel. Ainsi, les fabricants d'équipements de géophysique se doivent de proposer des solutions adaptées à leurs besoins.

Description du module de surveillance SMU

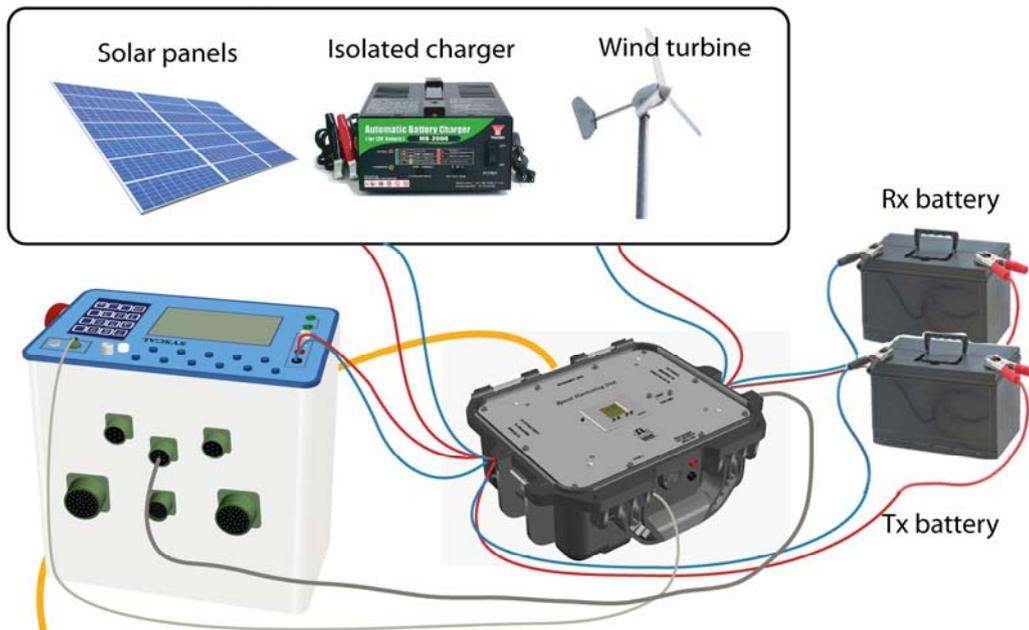
Le résistivimètre Syscal Pro est bien adapté pour observer la zone critique jusqu'à 100 m de profondeur, avec ses 10 voies de mesures simultanées et ses 250 watts de puissance d'émission. Sa capacité d'enregistrement à grande vitesse (jusqu'à 1000 enregistrements / min) est également adaptée à la cinétique attendue des phénomènes étudiés.

Dans ce contexte, IRIS Instruments a développé une unité dédiée, le SMU (Syscal Monitoring Unit) capable de contrôler automatiquement le Syscal Pro. Il permet à l'opérateur de modifier à distance, les paramètres d'acquisition (séquences), de vérifier les paramètres de fonctionnement (niveaux des batteries, température interne) et d'alerter en cas de problèmes dans l'enregistrement. L'opérateur est également en mesure de télécharger les données directement depuis un serveur FTP ou SSH ou de recevoir un fichier de données par mail. Les fonctionnalités d'alerte envoyées par courriel en cas de batterie faible ou de trop de valeurs aberrantes dans les données facilitent l'acquisition des mesures sur le long terme.

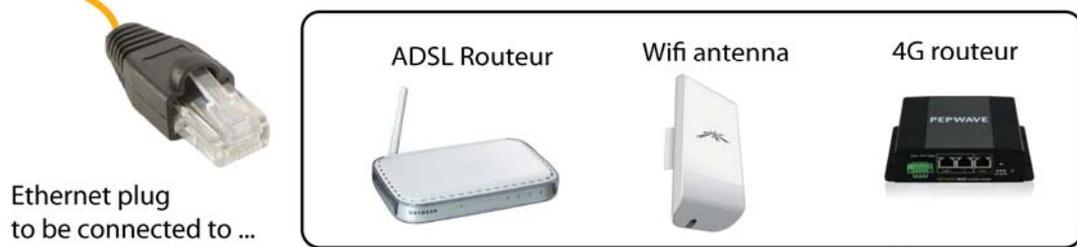
Ce module SMU comprend deux systèmes programmables : (i) un programmeur indépendant qui doit être opéré sur place : date et heure de mesure, période de répétition, nombre d'acquisitions, choix de la séquence (dispositif d'électrodes) et (ii) un système automatisé, activé par l'utilisateur, accessible à distance à parti d'une page web (3G/4G, WiFi, Ethernet, etc.).

Le module assure la gestion des batteries d'émission (Tx) et de réception (Rx) du résistivimètre à la source d'alimentation qui les recharge et qui demeure au choix de l'opérateur (panneaux solaires, éolienne, chargeurs isolés, pile à combustible, etc.) : lorsque le Syscal est en acquisition, la source d'alimentation externe est déconnectée des batteries Tx et Rx pour éviter toute fuite de courant qui pourrait perturber les mesures.

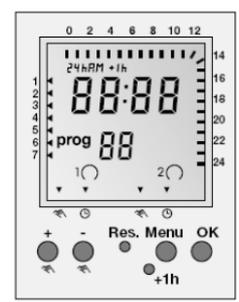
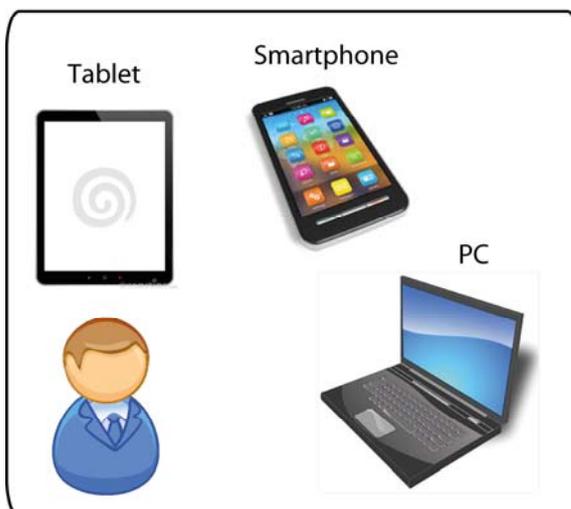
Battery charger device



Connecting device



At home or at the office



Horloge de programmation du SMU

Fonctionnalités du module de surveillance SMU

Niveau des batteries et de la température

Données de synthèse de la dernière acquisition réalisée

Choix de l'heure de la mesure et de la séquence

Liste des séquences disponibles

Number	Name	Electrode number	Quadruple number
1	DD_Pn_L17	E 24	G 165
2	DipDipA45	E 12	G 42
3	DD-10h	E 24	G 165
4	DD-10h-6h	E 96	G 340
5	DD_Pn_L17	E 24	G 165
6	DipDipA45	E 96	G 348
7	NewSeq	E 96	G 465
8	NewSeq	E 240	G 2362
9	S24-10ch	E 24	G 240
10	NewSeq	E 24	G 175
11	DipDipA45	E 12	G 42
12	not used	used	E 4

Configuration du transfert automatique des données sur serveur ou par courriel

Configuration de l'alerte à recevoir par courriel

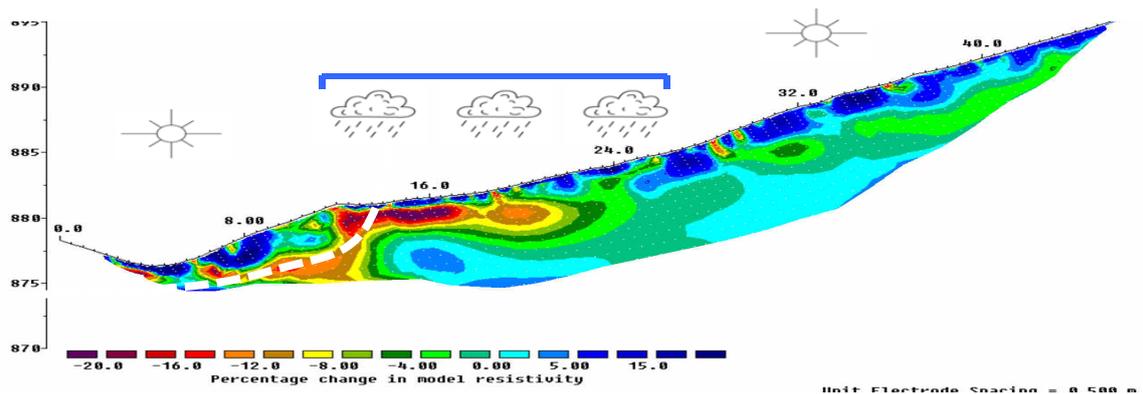
Choix de l'heure du transfert

Gestion de la mémoire interne

Exemple de résultat de surveillance de résistivité

La plupart du temps, les données acquises au cours de périodes de surveillance sont traitées de façon relative, en calculant la variation de résistivité en pourcentage entre deux séries de mesure. L'envoi de données régulier offre au géophysicien la possibilité de semi-automatiser la production de pseudo sections grâce à l'utilitaire Prosys livré avec le SYSCAL et d'en étudier les variations. Le temps gagné sur des déplacements physiques de l'opérateur peut être utilement consacré au traitement et à l'interprétation des données.

Dans l'exemple ci-dessous (Travelletti et al, 2012), les anomalies de variations de la résistivité donnent une image des chemins préférentiels possibles d'infiltration d'eau, en liaison avec la perméabilité des milieux, dans cette zone propice aux glissements de terrain (Laval, France).



Conclusion

Le suivi dans le temps des variations de résistivité, de la polarisation spontanée et de la polarisation provoquée (chargeabilité) est grandement facilité par l'existence de modules automatiques de contrôle à distance des équipements de mesure. Dans ces conditions, des informations précieuses peuvent être fournies aux géologues et environnementalistes impliqués notamment dans l'étude de glissements de terrain, de gestion des décharges, de suivi de pollution et d'activité bactérienne, d'intrusion d'eau salée et de suivi de dépollution par injection de vapeur.

Bibliographie

- Cassiani G., A. Godio, S. Stocco, A. Villa, R. Deina, P. Frattini, M. Rossi, 2009, Monitoring the hydrologic behaviour of a mountain slope via time-lapse electrical resistivity tomography, Near Surface Geophysics, pages 475-486 ;
- Fischanger F., G. Morelli, G. Ranieri, G. Santarato, M. Occhi, 2013, 4D cross-borehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case study in Venice (Italy), Near Surface Geophysics, volume 11, pages 41-50 ;
- Gance, J., O. Leite, B. Texier, J. Bernard, C. Truffert, 2017, Monitoring of resistivity and IP: The SYSCAL Monitoring Unit (SMU), a new system dedicated for remote control of the SYSCAL Pro resistivitymeter : présenté à l'assemblée générale de l'EGU, Vienne ;
- Guérin R., ML. Munoz, C. Aran, C. Lapererrelle, M. Hidra, E. Drouart, S. Grellier, 2004, Leachate recirculation : moisture content assessment by means of a geophysical technique, Waste Management, volume 24, pages 785-794 ;
- Travelletti J., P. Saillac, JP. Mallet, G. Grandjean, J. Ponton, 2012, Hydrological response of weathered clay-shale slopes: water infiltration monitoring with time-lapse electrical resistivity tomography, Hydrological Processes, Vol 26 n°14, pages 2106–2119 ;

Mots clé : résistivité, chargeabilité, suivi temporel, monitoring.

Reconnaissance géophysique pour la caractérisation des remblais suspects : une étude de cas à Poitiers

Luis Henrique Cavalcante Fraga (1,2), Cyril Schamper (2), Cécile Noël (1), Fayçal Rejiba (2) et Roger Guérin (2)

1 Envisol, 56 rue chasselièvre, 76000 Rouen, France
l.hcfraga@envisol.fr
c.noel@envisol.fr

2 UPMC Univ Paris 06, UMR7619 METIS, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France
faycal.rejiba@upmc.fr
roger.guerin@upmc.fr
cyril.schamper@upmc.fr

Environmental assessment of complex anthropogenic mediums by classical techniques suffers of temporal and budget constraints. Near-surface geophysics can bring the spatial coverage required to evaluate the spatial variability of geomaterials. An investigative approach incorporating a Slingram electromagnetic induction mapping (high spatial coverage) and an electrical resistivity tomography (high vertical resolution) allowed to image an area containing suspicious urban fills.

Introduction

La croissance de la population urbaine et la conséquente recrudescence de parcelles exploitables dans les villes ont mis en évidence le potentiel de la réhabilitation des anciennes friches industrielles et écologiques pour augmenter l'offre foncière. Toutefois, les anciennes activités présentes sur ces sites ont créé un sous-sol anthropisé très hétérogène : des différents types de remblais utilisés et apportés pour le terrassement, la possible présence des polluants issus des accidents...

La caractérisation de l'état des sols sur site est donc une étape clé pour le dimensionnement des stratégies de réhabilitation et pour la réussite de projets d'aménagement. Toutefois, les diagnostics de pollution conventionnels par sondages de sols et analyses géochimiques restent ponctuels, invasifs, contraints par les délais de temps et de budget et, surtout, ne sont pas capables de caractériser toute la variation spatiale du sous-sol.

L'application des méthodes géophysiques dans la démarche de diagnostic de pollution peut répondre à ce besoin de spatialisations (Boudreault et al., 2010, Vaudelet et al., 2011).

Ces techniques mesurent des propriétés physiques du-sous-sol de manière intégrée, non-invasive, non destructive et avec un haut rendement spatial en comparaison des méthodes conventionnelles. Ces méthodes, notamment géoélectriques, sont sensibles aux différents matériaux anthropiques : blocs de béton, ferrailles, remblais, divers polluants (Mundell et Byer, 2004, Wang et al., 2015).

Dans ce cadre, l'objectif de l'étude est de caractériser les contrastes de propriétés électriques (conductivités/résistivités) associées à des remblais suspects par induction électromagnétique (EMI) (McNeill, 1980) et par tomographies de résistivité électrique (ERT).

De plus, une stratégie d'inversion des données (Schamper et al., 2012) contrainte par les mesures directes des épaisseurs de remblais et ERT a été proposée pour reconstituer la géométrie et la distribution spatiale de la couche de remblais sur site.

Contexte

Le site d'étude est actuellement en friche écologique avec une surface d'environ 5 ha (environ 280 m x 175 m). La parcelle est située à 30 Km au nord de Poitiers. Dans le cadre de la construction d'une future zone commerciale, l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP) a mis en évidence la présence de remblais sur l'emprise du site. Avant la réalisation de la présente étude, aucune information précise sur la distribution spatiale et épaisseur de la couche de remblais n'était disponible.

Le site repose sur les calcaires du Callovien. Les coupes géologiques régionales mettent en évidence des limons argileux surmontant des calcaires altérés à liant marneux et sableux et ensuite des calcaires sains. La nappe des calcaires du Dogger est présente à 30 m de profondeur.

Matériel et méthodes

D'abord, un conductivimètre CMD Explorer (GF Instruments) a été utilisé pour cartographier la conductivité électrique apparente du sous-sol (σ_a) par la méthode EMI. Le mode d'acquisition était en dipôles verticaux (HCP) et trois profondeurs ont été intégrées dans les mesures : 2,2 m; 4,23 m et 6,73 m. Les mesures ont été acquises en continu (1 mesure/seconde) avec un système GPS SXBlue II. L'espacement entre les profils était d'environ 8-10 m avec une orientation sud-ouest/nord-est.

Ensuite, un résistivimètre Syscal Pro Switch 96 (Iris Instruments) a été utilisé pour réaliser 3 profils d'ERT au droit des anomalies de conductivités détectés par EMI. Chaque profil de 94 m de longueur a un espacement entre électrodes de 2 m, et des dispositifs d'acquisition dipôle-dipôle (DD) et Wenner-Schlumberger (WS). Les pseudo-sections ont été inversées avec le logiciel Res2Dinv (Geotomo Software).

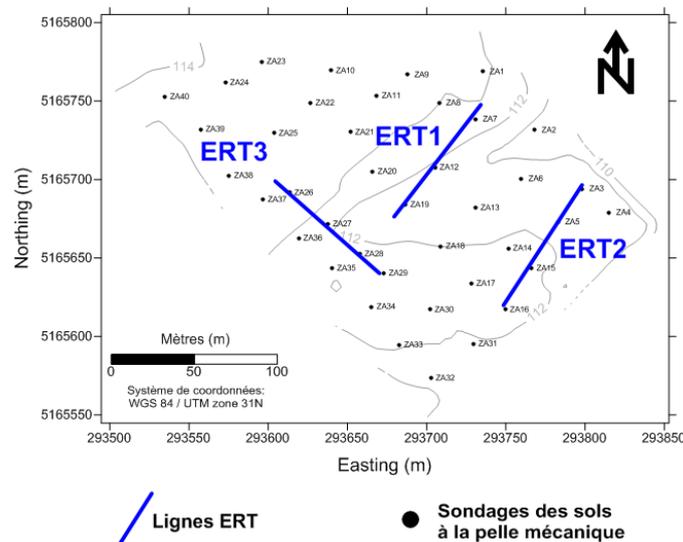


Figure 1 Carte topographique du site (Nivellement Générale de la France) avec la localisation des profils ERT et des sondages des sols à la pelle mécanique.

A la suite de la reconnaissance géophysique, 40 sondages de sols à la pelle mécanique ont été réalisés sur site pour déterminer directement l'épaisseur de la couche de remblais.

Les mesures directes d'épaisseur et les données ERT ont été utilisées pour contraindre l'inversion 1D du rapport du champ secondaire sur le champ primaire (Schamper et al., 2012) mesurées par le dispositif CMD-Explorer pour ainsi déterminer les caractéristiques du modèle de terrain le plus probable sur une maille plus fine.

Résultats

Les trois cartes de σ_a (cf. Figure 2A, 2B et 2C) mettent en évidence une anomalie de forte conductivité (6 -9 mS/m) globalement orientée sud-est/nord-ouest (cf. Figure 2F). Les terrains environnant ont des conductivités électriques apparentes entre 2 et 6 mS/m. Il est également possible d'observer une augmentation de la conductivité avec l'augmentation de la profondeur investiguée.

Au regard de l'état de surface dégradée du site (présence de quelques éléments métalliques et microtopographie) et de la faible sensibilité de méthodes EMI aux terrains résistants, un filtrage par la médiane avec un rayon de recherche de 6 m a été appliquée (cf. Figure 2D, 2E et 2F) pour éliminer

des valeurs négatives de σ_a et également les variations brutales d'orientation de l'appareil pendant l'acquisition. Ces données ont été utilisées ensuite dans la stratégie d'inversion.

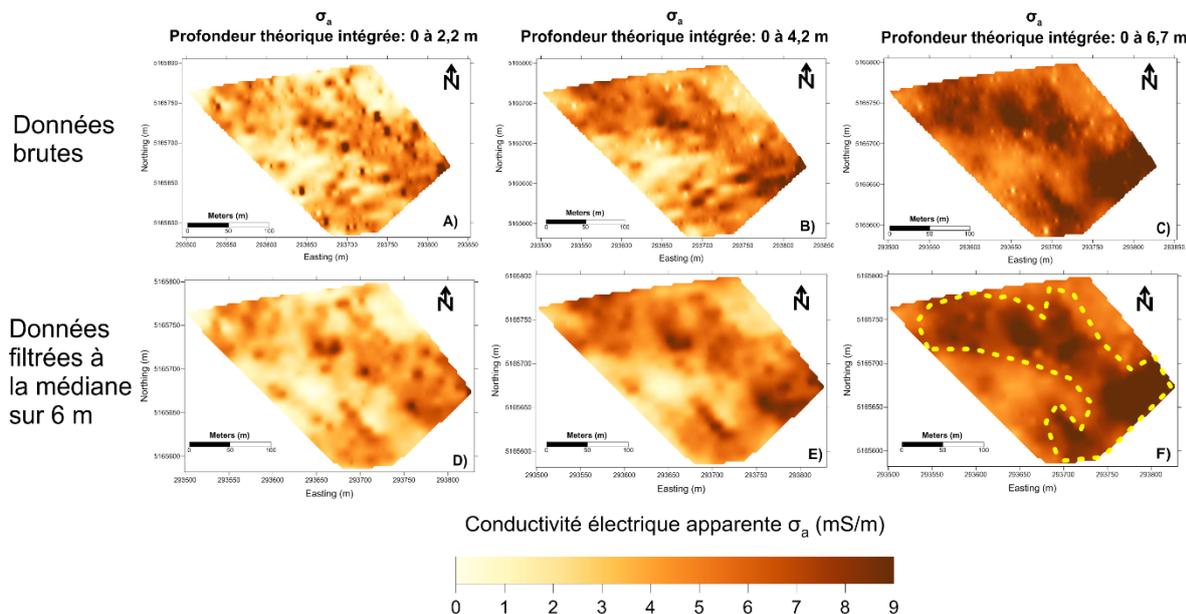


Figure 2 Cartes de σ_a pour les trois profondeurs investiguées par le CMD-Explorer : 2,2 m (A), 4,2 m (B) et 6,7 m (C). Les cartes D), E) et F) présentent les données de conductivité filtrées à la médiane avec un rayon de recherche de 6 m. Le polygone pointillé indique la possible emprise de l'anomalie de forte conductivité.

Les résultats des ERT1 et ERT3 (cf. Figure 3) montrent la présence d'une couche de faible résistivité (40 Ω m - 60 Ω m) surmontant une couche de forte résistivité (400 Ω m - 500 Ω m). Ces résultats sont comparables avec les anomalies de conductivité électrique détectées par la méthode EMI : ERT1 croise une anomalie conductrice tandis qu'ERT2 traverse une anomalie plus résistante. Les sondages des sols positionnés à l'aplomb de lignes ERT mettent en évidence la corrélation entre la couche conductrice et les remblais. Le substratum calcaire étant relié à la couche résistante.

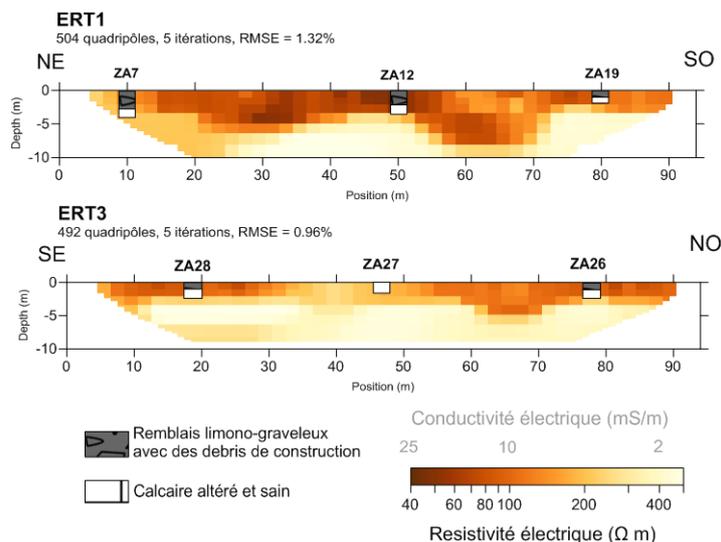


Figure 3 Résultats des ERT 1 et ERT 3 en comparaison avec les sondages des sols à la pelle mécanique.

Les sondages à la pelle mécanique ont également mis en évidence la présence d'une fine couche de terre végétale d'une épaisseur de 20 cm surmontant la couche de remblais. Des sondages électriques ont indiqué une résistivité électrique entre 200 Ω m à 260 Ω m pour cette couche superficielle.

L'ensemble des données ERT et des épaisseurs de remblais mesurées (pelle mécanique) a été utilisé pour créer un modèle à trois couches représentatif du terrain : une couche superficielle avec une épaisseur de 20 cm ($250 \Omega \text{ m}$), une couche intermédiaire de remblais avec une épaisseur initiale de 2 m ($35 \Omega \text{ m}$) et un substratum ($500 \Omega \text{ m}$). Ce modèle a été le modèle de départ de l'inversion des données acquises par la méthode EMI. Seule l'épaisseur de la 2^{ème} couche a été estimée.

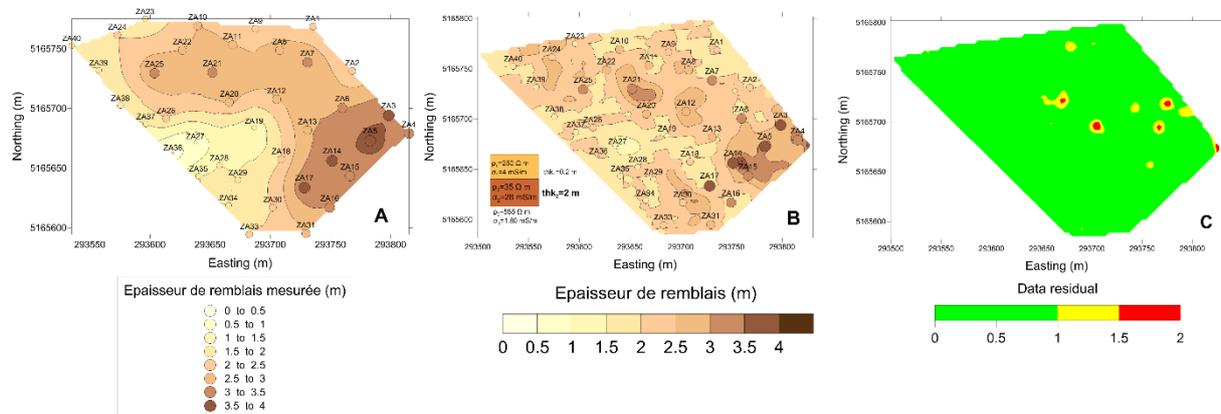


Figure 4 A – Carte des épaisseurs mesurées interpolées, B- Carte des épaisseurs inversées par l'inversion des données EMI 1D et C – Erreur quadratique moyenne normalisée de l'inversion.

En comparaison avec les données mesures sur le terrain (Figure 4A), les épaisseurs inversées (Figure 4B) mettent en évidence une structure interne des remblais très hétérogène et une bonne reconstitution de la géométrie globale de la couche de remblais. L'erreur quadratique moyenne normalisée (*data residual*) (Figure 4C) montre que presque l'ensemble des données peut être expliqué par le modèle géophysique choisi (*data residual* < 1).

Toutefois, au droit de certains sondages des sols, les valeurs d'épaisseurs mesurées sont encore surestimées ou sous-estimées par l'inversion 1D des données EMI. Des études sont en cours pour vérifier la corrélation entre la variabilité des épaisseurs inversées et la variabilité des valeurs de conductivité mesurées sur site, ainsi que d'autres scénarios avec d'autres modèles géophysiques du terrain pour améliorer l'estimation des épaisseurs.

Bibliographie

- Boudreaux, J.-P., Dubé, J.-S., Chouteau, M., Winiarski, T., Hardy, É., 2010 - Geophysical characterization of contaminated urban fills. *Eng. Geol.*, 116(3):196–206.
- Mundell, J.A., Byer, G.B., 2004 - Use of geophysical surveys for fill characterization and quantity estimation at brownfield sites—a case history. In 17th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- McNeill, J.D., 1980 - Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Notes TN-11, Geonics Ltd., Ontario, Canada.
- Schamper, C., Rejiba, F., Guérin, R., 2012 - 1D single-site and laterally constrained inversion of multifrequency and multicomponent groundbased electromagnetic induction data - Application to the investigation of a nearsurface clayey overburden. *Geophysics*, 77(4), WB19-WB35.
- Vaudelet, P., Schmutz, M., Pessel, M., Franceschi, M., Guérin, R., Atteia, O., Blondel, A., Ngomseu, C., Galaup, S., Rejiba, F., Bégassat P., 2011 - Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. a case study in urban context. *Journal of Applied Geophysics.*, 75(4):738–751.
- Wang, T.-P., Chen, C.-C., Tong, L.-T., Chang, P.-Y., Chen, Y.-C., Dong, T.-H., Liu, H.-C., Lin, C.-P., Yang, K.-H., Ho, C.-J., Cheng S.-N., 2015 - Applying FEDM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 121:21–30.

Electromagnetic induction, environmental site assessment, urban fill, inversion, diagnostic de pollution, méthode électromagnétique, remblais, inversion

Suivi de dépollution de solvants chlorés par méthodes géophysiques et en particulier par méthodes électriques

E. Nodot, J. Deparis, S. Gourry, S. Colombano

Introduction

La forte activité industrielle passée et présente de la France adjointe à une volonté gouvernementale de maintenir une certaine qualité du sous-sol français a mis en avant l'enjeu que constituent les sites et sols pollués ces dernières années. Ainsi au cours des vingt dernières années, un certain nombre d'entreprises, de méthodes et de sujets de recherche se sont développés. Leur but est de diagnostiquer puis de réaliser la dépollution des sols et des eaux souterraines. Classiquement, le diagnostic et la dépollution sont réalisés par l'intermédiaire de forages destructifs et il n'existe pas d'information entre.

La géophysique, et spécialement les méthodes électriques, permettrait de spatialiser cette information. Notre projet de recherche vise notamment à démontrer l'utilité des méthodes géophysiques pour caractériser, suivre et quantifier la dépollution d'un sol. Les caractéristiques physiques d'un polluant étant généralement très différentes de celles de l'eau, la mise en place d'une surveillance d'un ou plusieurs paramètres physiques du sous-sol, permet ainsi suivre ses flux et déplacements (Ajo-Franklin et al. 2006, Chambers et al. 2004).

Parmi ces paramètres physiques, le choix a été fait d'étudier la résistivité (dans le domaine temporel et fréquentiel) et la permittivité. Ils offrent en effet un contraste de valeur marqué entre un milieu pollué et un milieu sans pollution. Nous souhaitons nous assurer de l'effet du polluant sur des mesures en laboratoire. Puis nous souhaitons le valider sur un site d'étude en cours de dépollution en condition réelle. Ce travail s'articule autour de deux axes qui sont (1) l'étude de l'effet du polluant sur les propriétés géophysiques par l'intermédiaire d'expériences de laboratoire dans le but de quantifier l'effet de la pollution résiduelle au cours d'expériences d'imbibition-drainage et (2) de réaliser une expérience sur site de dépollution pour valider la dépollution.

Expérience de laboratoire

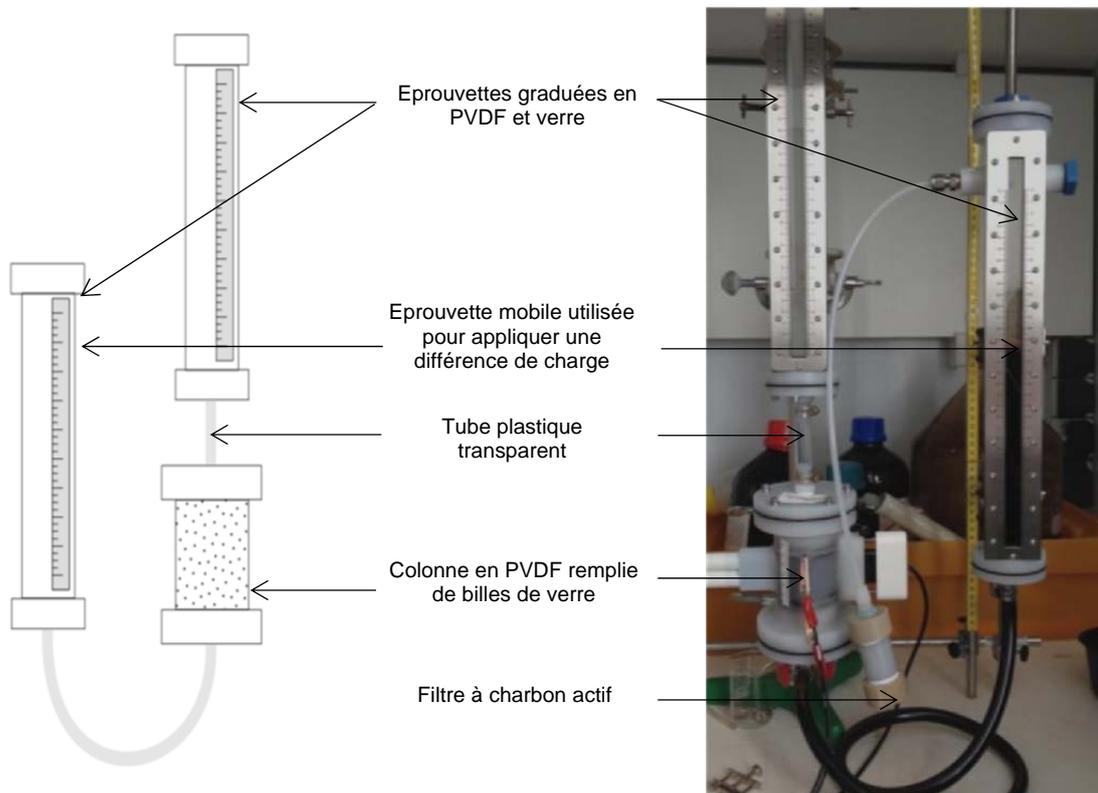


Illustration 1 – Schéma et photo annotés du dispositif utilisé pour l’expérience d’imbibition-drainage

Une expérience d’imbibition-drainage consiste à faire passer un polluant (un mélange de solvants chlorés dans notre cas) dans une cellule (colonne) pleine de sable (billes de verre calibrées) et saturée en eau. Les matériaux utilisés sont très spécifiques. Ils doivent résister au mélange de solvants chlorés utilisés. Ainsi le PVDF et le verre ont été choisis. Le polyfluorure de vinylidène (PVDF) est très résistant aux espèces chimiques corrosives.

En faisant varier la hauteur de l’éprouvette (celle de gauche sur l’illust. 1), nous imposons une différence de charge. Le liquide présent dans l’éprouvette mobile va alors passer dans la colonne jusqu’à ce que l’équilibre de charge soit de nouveau atteint. La première phase consiste à faire passer le polluant dans la colonne en montant l’éprouvette mobile. Ainsi on chasse l’eau de la colonne vers l’éprouvette immobile (située au-dessus de la colonne). C’est la phase de drainage. Puis on baisse de nouveau l’éprouvette mobile, l’eau vient de nouveau remplacer le polluant dans la colonne. C’est l’imbibition. On effectue cette opération plusieurs fois : trois drainages et trois imbibitions.

On mesure les paramètres physiques en continue au cours de ces opérations. Les électrodes de mesure du potentiel sont impolarisables (Maineult et al. 2004).

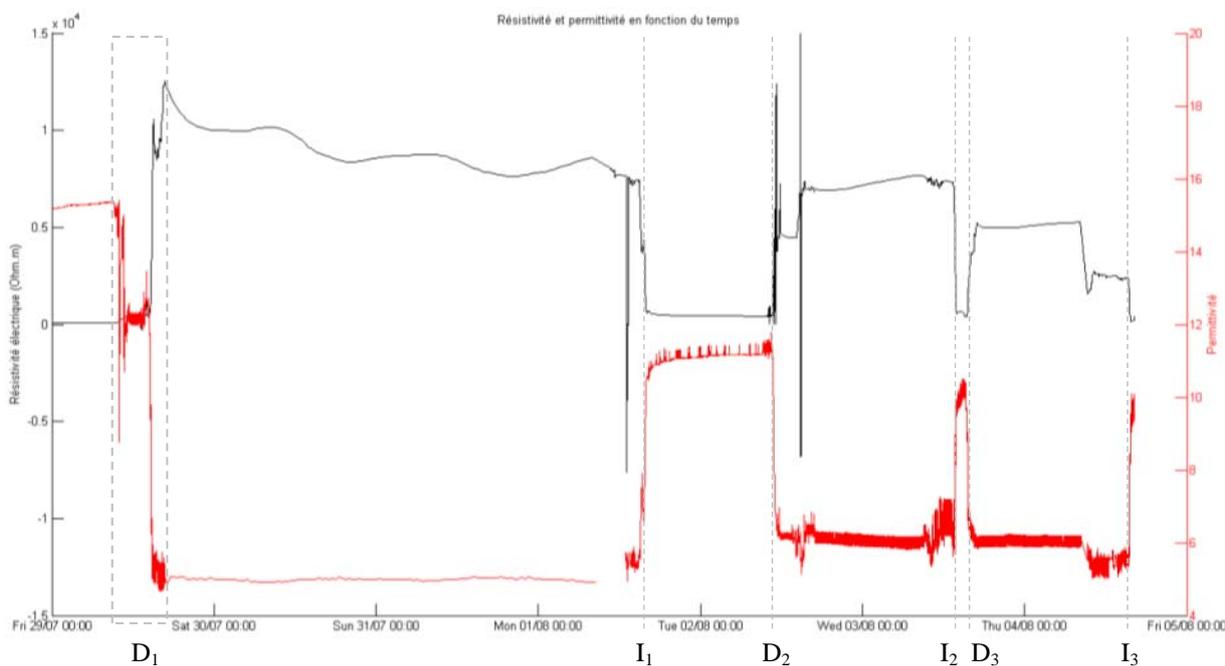


Illustration 2 – Influence des imbibitions et drainages successifs sur les mesures de résistivité (courbe noire) et permittivité (courbe rouge).

L’illustration 2 montre que l’introduction du polluant dans le milieu constitué de billes de verre et saturé en eau fait chuter la permittivité. On passe d’une permittivité de 15 à 5 en quelques minutes. Le premier drainage est relativement long, il a en effet été interrompu pendant quelques heures suite à une fuite du solvant. Il se passe l’effet inverse au moment de l’imbibition, la permittivité augmente. Il est intéressant de constater que suite à la première imbibition, la permittivité ne retrouve pas sa valeur initiale, elle plafonne à 10.7 suite à la première imbibition, à 9.9 suite à la seconde et à 9.5 à la fin de la dernière imbibition. Ce phénomène est dû à la pollution résiduelle, une partie du DNAPL est restée piégée dans le milieu.

Concernant les données de résistivité, Elles réagissent à l’inverse des données de permittivité. L’introduction du solvant dans le milieu fait donc augmenter la résistivité. Il faut à chaque fois entre 20 et 30 minutes pour que le changement s’opère. Nous observons de nouveau l’effet de la pollution résiduelle sur les mesures à l’exception de la dernière mesure. Enfin, suite à chaque drainage, le solvant affecte de moins en moins le milieu puisque la résistivité diminue.

Expérience sur site

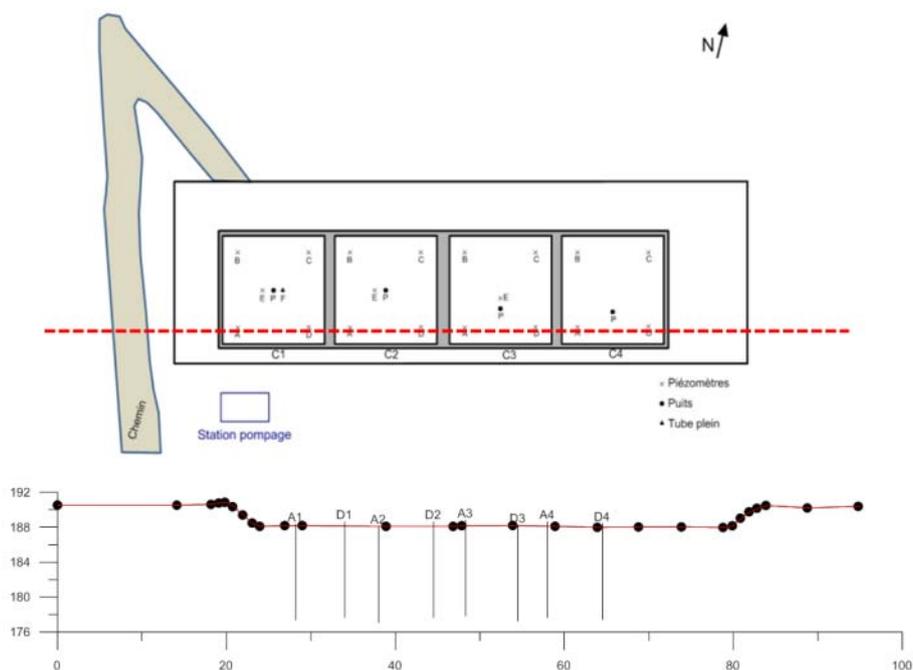


Illustration 3 – Position des électrodes de mesure

Le site d'étude se situe sur un site d'une industrie chimique, la production de chlorés lourds y a eu lieu à partir des années 1950. Les déchets organochlorés sont stockés de 1964 à 1986 dans une décharge interne (alvéole en argile) qui s'est avérée fuyarde. Cette alvéole est aujourd'hui vide. La pollution DNAPL s'est trouvée piégés dans une série de petits synclinaux au-dessus d'un aquitard argileux imperméable. L'espace de travail est constitué d'un bassin (Illustration 3) sous lequel se trouve la source de solvants chlorés (DNAPL). Le sous-sol y a été séparé en quatre casiers étanchéifiés par des murs imperméables en « Trenchmix » (mélange de boues et de ciments) dont la base atteint le toit des argiles (Illustration 3). On y trouve 4 puits au centre de chaque casier, permettant de pomper le polluant dans les casiers et 19 piézomètres afin de réaliser un suivi du niveau du polluant dans la nappe.

Afin de réaliser les mesures de résistivité électrique, nous disposons de 96 électrodes en inox et d'un appareil Syscal Pro Switch96. Les 96 électrodes sont placées sur une même ligne (illustration 3) et espacées d'1 m. Le profil électrique couvre ainsi l'intégralité du bassin et intersecte tous les casiers.

La campagne de mesure a commencé le 21 juillet 2015, et s'est terminée le 27 août 2015 ; soit une durée de 5 semaines .

Au cours de ce mois, se sont déroulées simultanément des opérations de pompage de DNAPL dans le casier n°4 dont le déroulement est résumé dans le graphique ci-dessous.

Ce graphique présente les résultats de deux points de relevé piézométrique. Le point C4P se situe au niveau du pompage. La hauteur de l'interface eau-DNAPL varie donc beaucoup. Dès que le pompage commence, le niveau baisse rapidement. Quand le pompage s'arrête la situation se stabilise dans le casier et le niveau remonte. Ce n'est pas le cas des données du point C4D, plus éloigné du pompage. Nous observons en ce point une décroissance globale et progressive du niveau de DNAPL

Nous constatons sur cette figure qu'au fil temps, le contraste de résistivité augmente sensiblement. A la fin de l'expérimentation (le 27 août, illustration 4) nous observons une baisse globale de résistivité au sein du casier n°4 (le plus à droite) alors que les variations sont plus faibles dans les autres casiers. Cette différence est due au pompage du solvant chloré réalisée dans ce casier. En effet d'après l'illustration 4, une quantité significative de DNAPL a été pompée dans ce casier (suffisamment significatif pour faire baisser l'interface eau-DNAPL d'environ 25 cm). Le fait de retirer du DNAPL (à la forte résistivité) fait donc baisser la résistivité. Lorsqu'un pompage de DNAPL est en cours ou vient de se terminer, le casier 4 affiche un fort contraste de résistivité négatif dû à la substitution du DNAPL par de l'eau.

Ce phénomène est particulièrement marqué le 13 août 2015 suite à un long pompage. Il en va de même le 25 août 2015. Le 21 août, le pompage n'est pas actif et le contraste est faible. Le 25 août, le pompage est actif, du DNAPL est retiré du casier, la résistivité baisse fortement. Le 27 août, le pompage est terminé, l'eau et le DNAPL retrouve un équilibre différent de l'équilibre du 21 août au sein du casier. La résistivité augmente de nouveau mais reste plus faible que l'état initial (21 août) puisque globalement il y a moins de DNAPL qu'avant.

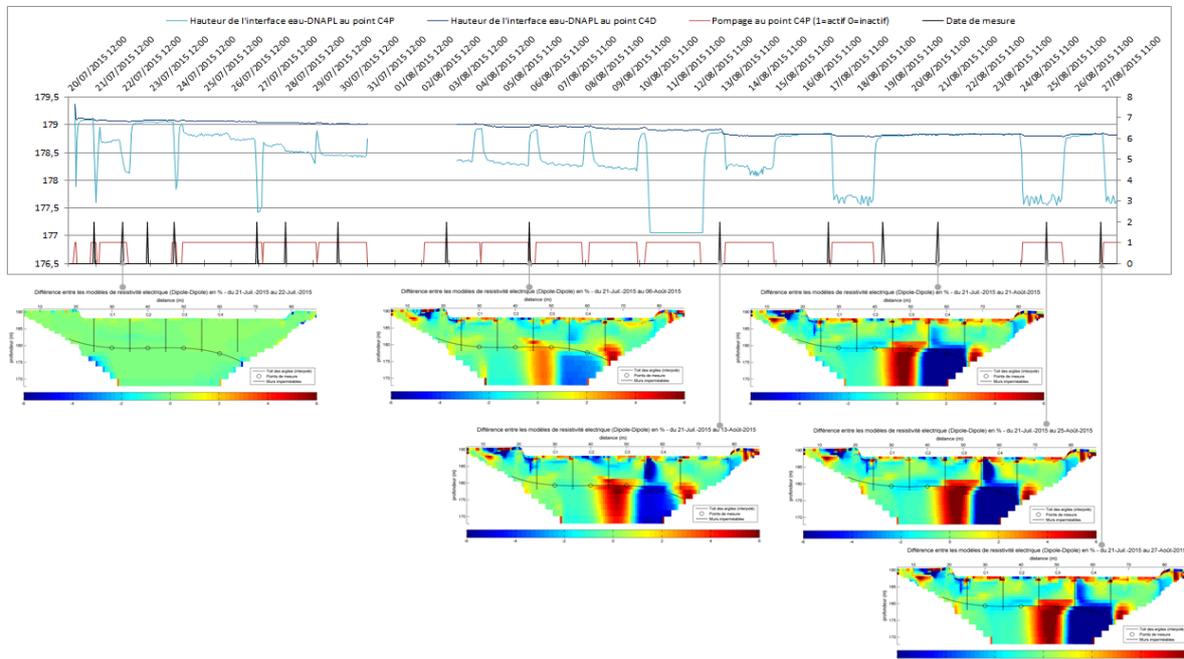


Illustration 4 – Historique de l’activité du casier 4 du site d’étude.

Conclusion

Ce travail a permis de valider plusieurs hypothèses concernant le suivi de pollution et de dépollution de solvants chlorés par méthodes géophysiques et en particulier par méthodes électriques.

En laboratoire, la présence du polluant au sein de la colonne fait fortement chuter la permittivité et augmenter la résistivité, l’imbibition par l’eau ne permet pas de retourner physiquement à l’état initial. Nous en concluons que les mesures de permittivité et de résistivité permettent de détecter la présence du mélange de solvants chlorés bien plus résistant que l’eau. Ces mesures permettent aussi de mettre en évidence l’effet de la pollution résiduelle validant ainsi notre mode opératoire.

La surveillance géophysique sur le site pollué d’étude a mis en évidence que les variations de résistivité observées corrèlent avec les activités de pompage de DNAPL réalisé sur site. Une diminution globale de résistivité dans le casier 4 est visible et nous constatons l’apparition d’un « panache » de faible résistivité lorsque le pompage est actif, traduisant le déficit de DNAPL. Nous observons ainsi la progression du chantier de dépollution.

Référence

Ajo-Franklin, J.B., Geller, J.T., and Harris, J.M. (2006). A survey of the geophysical properties of chlorinated DNAPLs. *Journal of Applied Geophysics* 59, 177–189.

Chambers, J.E., Loke, M.H., Ogilvy, R.D., and Meldrum, P.I. (2004). Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography. *Journal of Contaminant Hydrology* 68, 1–22.

Dahlin, T. (2000). Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 48, 181–187.

Maineult, A., Bernabe, Y., and Ackerer, P. (2004). Electrical Response of Flow, Diffusion, and Advection in a Laboratory Sand Box. *Vadose Zone Journal* 3, 1180–1192.

Conception d'un dispositif de suivi par tomographie électrique 3D sur un pilote de dépollution

M.A Iravani, B. Francois, A. Mainault, J. Deparis, S. Colombano, R. Guérin, J.C. Gourry

1 Introduction

L'évolution de l'industrie en France au cours des dernières décennies a occasionné l'abandon progressif d'une partie de cette activité, notamment l'industrie extractive, et entraîné l'apparition de nombreux sites délaissés. Parmi ceux-ci, les sites pollués représentent d'une part un enjeu pour la santé, mais également un potentiel économique valorisable dans un contexte de pression foncière et de diminution des surfaces agricoles. Il existe ainsi un intérêt économique à dépolluer ces sites, qui se heurte bien souvent à des verrous d'ordre technique, mais aussi financier dans les régions où la valeur foncière du terrain viabilisé ne permet pas de compenser le coût financier d'une opération de dépollution. Ce besoin de développer de nouvelles techniques de dépollution qui soient à la fois innovantes et économiquement rentables, pour favoriser le redéveloppement de ces espaces, a été formulé par le gouvernement par le biais de l'ADEME et des « investissements d'avenir ».

Cette étape de validation nécessite des outils permettant d'évaluer la performance et l'efficacité des procédés de dépollution mis à l'épreuve, et à ce titre, les méthodes géophysiques peuvent se révéler être un choix pertinent. En outre, les informations apportées par la géophysique peuvent être utilisées pour ajuster et optimiser le processus de dépollution durant sa mise en œuvre.

Parmi ces techniques, les méthodes électriques ont à plusieurs occasions montré leur intérêt, en particulier sur les pollutions aux hydrocarbures. Ceux-ci ont en effet tendances à influencer la résistivité du milieu dans lequel ils se trouvent, en provoquant une hausse de celle-ci lorsqu'ils sont non dégradés, et au contraire une diminution de la résistivité lorsqu'ils sont partiellement dégradés (Blondel, 2014). Gourry et al (2001) montrent également que dans certaines conditions ce type de pollution peut générer une augmentation de la chargeabilité, ce qui ne fut cependant pas confirmé par Blondel (2014). Une augmentation de la chargeabilité a également été observée par Gazoty et al. (2012) sur d'autres type de polluants, lors d'une étude menée sur une ancienne décharge.

Ce travail présente la phase de dimensionnement d'un dispositif de suivi. La géométrie a été établie en utilisant des modélisations afin de déterminer la configuration de mesure la mieux adaptée à suivre cette dépollution.

2 Conception du dispositif de monitoring géophysique appliqué aux sites et sols pollués

Un état initial, préalablement à l'installation du dispositif de monitoring, a été réalisé sur l'emprise de la zone. Ces mesures ont notamment pour but de disposer d'un « état zéro » du site, et pouvoir détecter d'éventuelles particularités impliquant d'adapter le dispositif de monitoring. L'objectif de ces investigations était de couvrir la zone expérimentale (10m x 10m) par 6 profils de 47 m de long (48 électrodes espacées de 1 m), dans 2 directions (voir carte sur la Figure 1) sur lesquels nous avons réalisé des panneaux électriques, comprenant des mesures de résistivité et de polarisation provoquée. Les profils dépassent de part et d'autre de la zone ciblée de manière à assurer une profondeur d'investigation suffisante sur toute celle-ci. La zone d'étude est située à l'aplomb d'un ancien bâtiment, et la présence de reste de fondations en profondeur n'est pas à exclure. En outre, on trouve par endroits des blocs de béton et des tiges métalliques qui ressortent du sol. Il semble qu'une partie au moins des gravats issus de la démolition du bâtiment ait été laissée sur place et utilisée comme remblai. Pour optimiser les conditions de mesure sur ce terrain difficile, de l'eau salée est utilisée pour améliorer le contact de chaque électrode, et ainsi maximiser le courant injecté, et par conséquent le rapport signal sur bruit. L'ensemble des données est ensuite inversé avec le logiciel Res2Dinv, en utilisant une norme L1 sur les données, mieux adaptée à des données bruitées, ainsi qu'une norme L1 sur le modèle, qui permet de faire ressortir les forts contrastes de résistivité. Le reste des paramètres utilisés sont relativement standard, ne faisant pas intervenir plus d'a priori sur la géologie.

Les résultats des inversions, obtenues après 10 itérations sont présentés en Figure 2. Les erreurs RMS finales sont de l'ordre de 8 à 12% pour les mesures en dipôle-dipôle. Ils montrent clairement le caractère très hétérogène du sous-sol de la zone, tel que l'on pouvait l'anticiper d'après les observations visuelles faites sur le terrain. Les gravats, objets métalliques et dalles de béton visible par endroits en surface sont très probablement présents sur l'ensemble de la zone en profondeur, ce qui est en partie confirmé par les forages PP1 et PP4 qui ont recoupé des structures en béton (fig. 2).

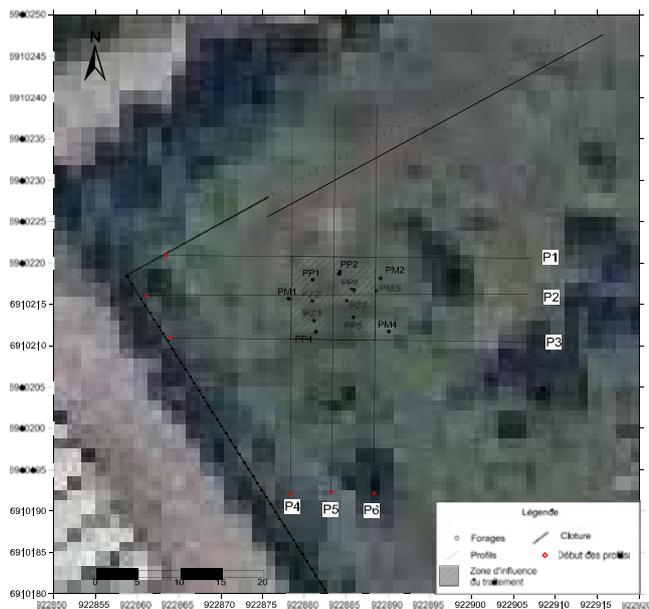


Figure 1: Carte de l'implantation des profils de reconnaissance réalisés en mai 2017 (coordonnées en Lambert 93)

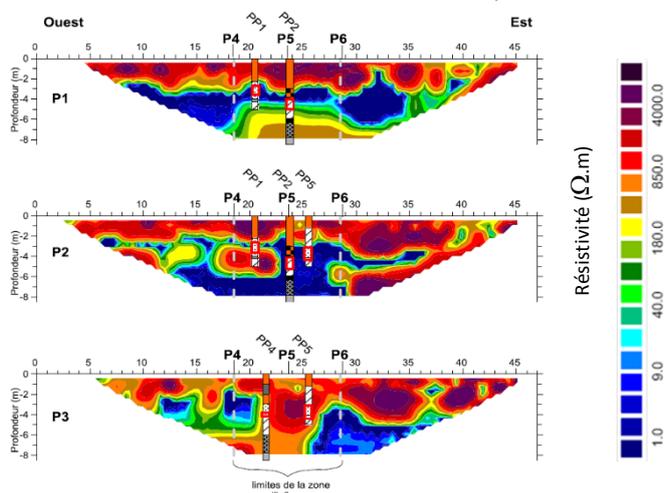


Figure 2: Coupes de résistivité des profils P1 à P3 obtenues à partir des mesures dipôles-dipôles, et projections des logs des forages réalisés par Sol Environnement (2017, communication personnelle)

Du fait de cette importante variabilité latérale des faciès, les informations apportées par la projection des forages sur les coupes sont donc à prendre avec précaution, car les structures recoupées par un forage peuvent ne pas s'étendre jusqu'à l'aplomb d'un profil situé à 2 ou 3 m de celui-ci. Le recoupement de ces informations permet de dresser une interprétation globale suivante:

- Les limons, plus ou moins argileux observés dans les premiers mètres ont semble-t-il été mélangés aux gravats issus de la démolition des bâtiments. Ce mélange constitue un horizon résistant superficiel (>1000 Ω.m), dont l'épaisseur semble varier entre 1 et 4 m sur la zone d'étude.
- Celui-ci est localement marqué en profondeur par la présence de produit pur, visqueux et noir (dans le forage PP2 notamment). Cette présence semble associée à une importante baisse de la résistivité (voir profil P5 par exemple, qui passe à moins d'un mètre de PP2).
- Au-dessous, on observe un horizon très conducteur (<10 Ω.m) discontinu sur certains profils, qui semble regrouper les faciès argileux et les faciès plus sableux, relativement impactés par la pollution.

Pour évaluer la capacité de chaque dispositif envisagé à imager correctement le sous-sol de la zone d'étude, des modélisations ont été effectuées pour chacune des 3 configurations envisagées, à partir d'un modèle de sol tabulaire à 3 couches basé sur des mesures de résistivité retrouvé précédemment. Des séquences de mesures ont été préparées grâce au logiciel ERTlab qui permet une certaine souplesse pour à la préparation de séquences « non conventionnelles ». En effet le

logiciel fournis par Iris Instrument (Electre pro) ne permet pas de préciser quel câble doit être utilisé pour l'injection, ou pour la réception, ce qui en revanche est possible avec ERTlab.

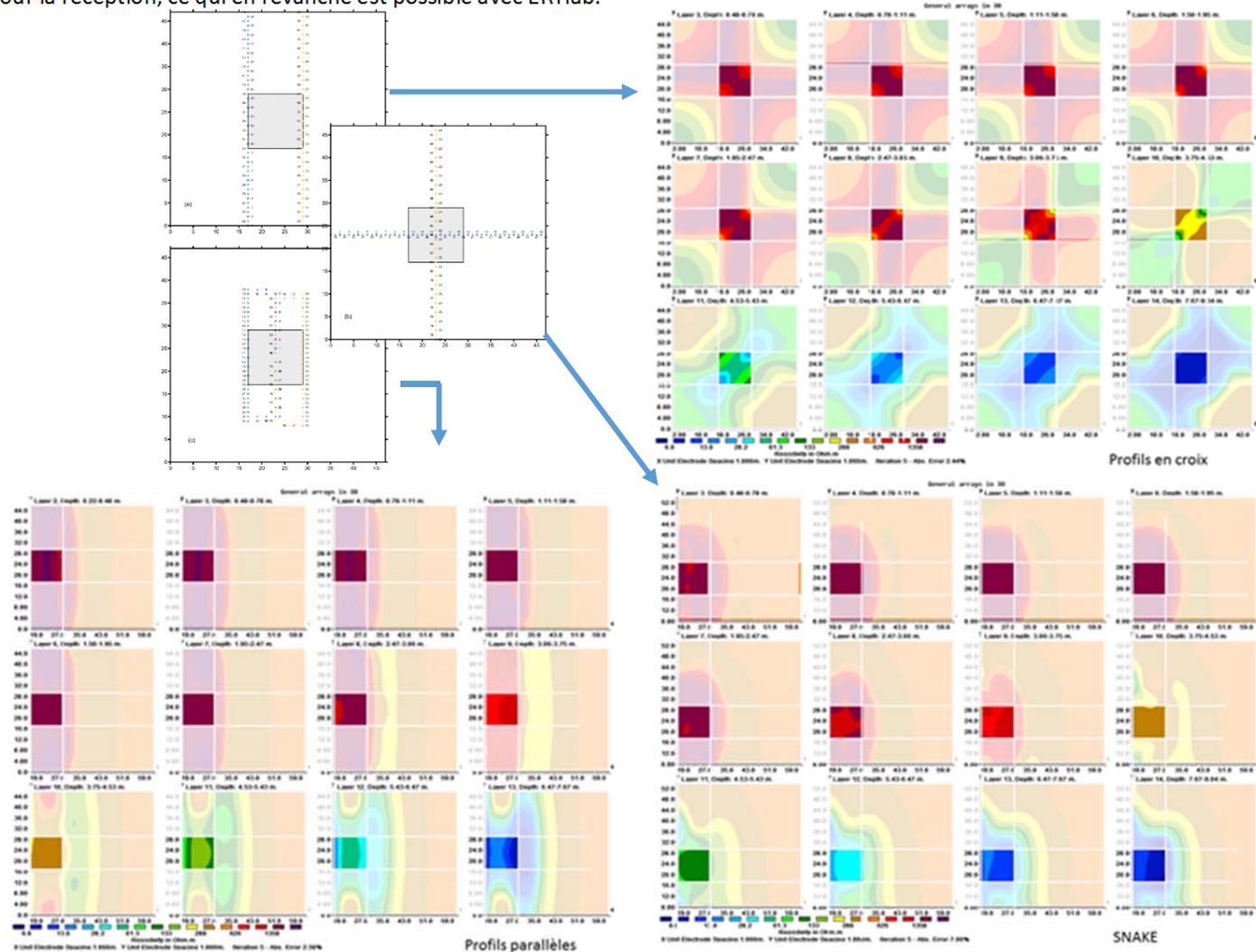


Figure 3: Distributions des résistivités calculées par l'inversion (Res3DInv) des données synthétiques pour chaque dispositif testé (en haut à droite: parallèles, en bas à gauche : en croix, en bas à droite « snake »)

Les données modélisées sont inversées avec le logiciel Res3DInv, en utilisant une norme L1 et aucun a priori sur la stratification du sous-sol. Les figures (Figure 3) montrent la résistivité à différentes profondeurs et pour chaque dispositif. On observe que les résistivités issues du dispositif en croix ne sont pas homogènes, alors que le modèle est tout à fait homogène à une profondeur donnée. Les résultats issus des profils parallèles montrent également, dans une moindre mesure, certaines hétérogénéités. Le dispositif « snake », enfin, permet de retrouver des distributions de résistivité relativement homogène, à chaque profondeur, qui correspondent à celles du modèle initial. Par ailleurs, l'étude de la sensibilité montre que le dispositif utilisant 2 profils parallèles a une sensibilité en profondeur légèrement supérieure à celle du « snake ».

La seconde étape consiste à déterminer les séquences de mesure optimales au regard des objectifs et du contexte, en terme de profondeur de pénétration, de résolution et de temps d'acquisition.

Les séquences testées sont :

- **Dipôle-dipôle**, sur chaque ligne (DD), et entre 2 lignes (DDtrans)
- **Schlumberger réciproque (RS)**. Bien que plus sensible au bruit que le Schlumberger classique, il permet de tirer le meilleur parti possible des mesures multivoies, et ainsi réduire considérablement le temps d'acquisition (Dahlin & Zhou, 2004)
- **Dipôle-Dipôle Equatoriaux (EQ)**. Utilisé généralement en 2D, il permettra dans notre cas d'obtenir des mesures entre les lignes de mesures, et d'augmenter la résolution dans la direction perpendiculaire à nos lignes d'électrodes

- « Mesures en L » (L), sur le principe de ce qui est utilisé par (Tejero- Andrade *et al.*, 2015)
- Gradient, sur chaque ligne (GR), et entre 2 lignes (GRtrans)

Trois jeux de données sont créés en concaténant les données correspondant aux protocoles individuels, et correspondant aux combinaisons suivantes :

- GR + GRtrans + L
- GR + GRtrans + EQ
- GR + GRtrans + L + EQ

Les résultats correspondant sont présentés en Figure 4. Bien qu'assez proches, ils montrent que la combinaison des quatre séquences (GR-GRtrans-L-EQ) peine à retrouver les contrastes de résistivité franc du modèle. La séquence « GR-GRtrans-L » parvient mieux à imaginer ce contraste, de même que la combinaison « GR-GRtrans-EQ » qui semble en plus avoir une meilleure résolution à la profondeur de l'interface. Notre choix se porte donc sur la combinaison « GR + GRtrans + EQ » qui mène au meilleur résultat en terme de géométrie et d'homogénéité des résistivités dans chaque couche. On observe également qu'aucune des trois combinaisons testées ne montre de problème de surévaluation de la résistivité.

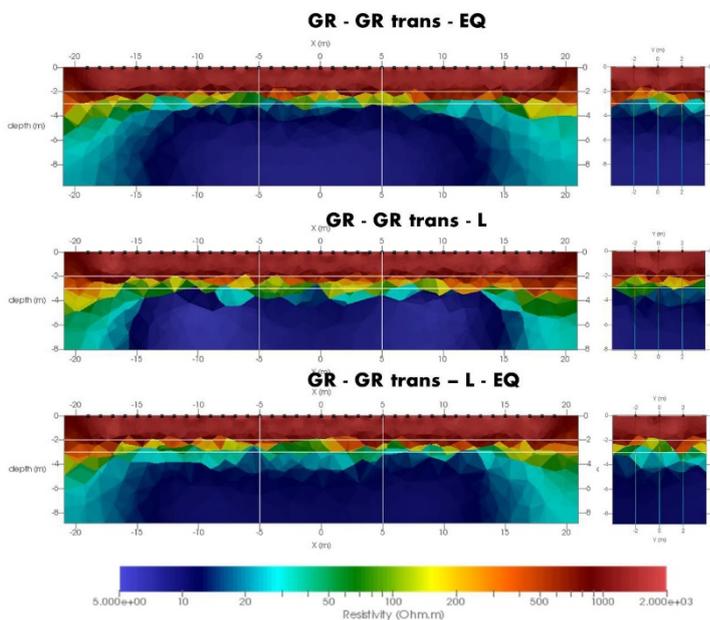


Figure 4: Résultats des inversions des données synthétiques pour les combinaisons testées. Coupes extraites à Y=0m (gauche) et X=0m (droite)

3 Conclusions

Le projet Bioxyval vise à développer des méthodes innovantes et économiquement rentables de dépollution d'anciens sites industriels afin d'en faciliter leur réutilisation. Au cours des tests menés sur différents procédés sur un site pilote, le BRGM souhaite réaliser un suivi temporel par méthodes géophysiques de l'avancement et des performances de cette dépollution. Des acquisitions préalables, sur site, ont amélioré notre connaissance de celui-ci afin de préparer le système de suivi temporel dans de meilleures conditions. Les simulations numériques ont permis de définir une géométrie d'électrodes qui s'adapte au mieux aux conditions du site d'étude et au matériel disponible pour cette expérimentation, et garantit un bon compromis entre profondeur d'investigation et résolution. Grâce à d'autres simulations, nous avons pu valider un protocole de mesure qui tire le meilleur parti de la géométrie du dispositif pour imaginer correctement le sous-sol et les variations de résistivité et chargeabilité que le procédé de dépollution va induire.

4 Référence

Blondel, A. (2014). Développement des méthodes géophysiques électriques pour la caractérisation des sites et sols pollués aux hydrocarbures (Doctoral dissertation, Université Michel de Montaigne-Bordeaux III).

Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5), 379-398.

Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2012). Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 575-586.

Gourry, J., Jeannot, R. & Proust, E., (2001). *Couplage de mesures géophysiques et d'analyses de gaz pour la détection de polluants organiques sur une ancienne cokerie*, Rapport BRGM/RP-50856-FR

Tejero-Andrade, A., Cifuentes, G., Chávez, R. E., López-González, A. E., & Delgado-Solórzano, C. (2015). L-and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones. *Near Surface Geophysics*, 13(4), 355-367.



Reconnaissance géophysiques de la tourbière de Champgazon (Parc régional du Morvan, 58-Nièvre)

Girard Vincent¹, Jamonneau Adèle¹, Miloudi Mohamed Ramzi¹,
Mohamedhen El Mostaph Cheikh Abdallahi¹, Nzengue Frid¹, Pibouleau Romain¹, Varais Nolan¹

¹Sorbonne Université, UMR 7619 Metis, case 105, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05
nolan.varais@gmail.com, romain.pibouleau@gmail.com

Abstract

This survey aims to describe the diffusion of pollutants coming out from a communal discharge south of Champgazon peat bog (Nièvre, France). This study was performed using three geophysics methods: multi-depth conductivity survey using GF Instruments CMD Explorer, the ground penetrating radar and the electrical resistivity tomography, as part of the Master II of Applied Geophysics of the UPMC.

Introduction

La tourbière de Champgazon s'étend sur environ 27 hectares, à Montsauche-les-Settons (Nièvre (58)), au cœur du Parc Naturel Régional du Morvan. Après la seconde guerre mondiale, la partie sud-ouest de la tourbière a servi de décharge pour des déchets inertes issus de la démolition du village de Montsauche-les-Settons. Jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle, cette zone de décharge a ensuite accueilli des ordures ménagères et les déchets du garage local, avant d'être recouverte par 8 000 m³ d'arène (Civette, 2008). Dans une démarche de préservation de la tourbière, en lien avec le classement du site comme Réserve Naturelle Régionale en 2015, cette étude vise, d'une part, à mettre en évidence une éventuelle diffusion de polluants vers le nord issus des circulations hydriques (Goubet, 2011) entre le massif de déchet et la tourbière, et d'autre part, à mieux caractériser la stratigraphie du site.

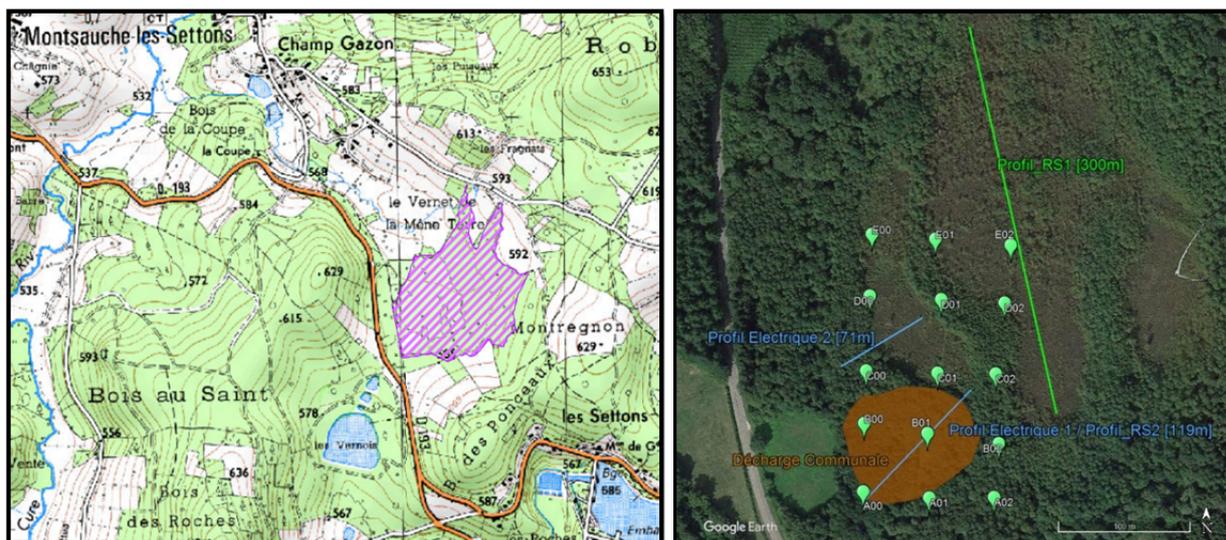


Figure 1 : Situation géographique de la tourbière de Champgazon (à gauche) et localisation des différentes acquisitions géophysiques (à droite).

Cartographie Electromagnétique (CMD)

Dans le cadre de notre étude sur la tourbière de Champgazon, nous avons réalisé des cartes de conductivités électriques et de susceptibilités magnétiques sur la zone délimitée par le carroyage. L'utilisation d'un CMD avec trois écartements de bobines en mode vertical nous permet d'atteindre différentes profondeurs d'investigation. Les cartes suivantes (Figure 2 : Conductivités (en haut) et de susceptibilités (en bas) pour les trois écartements de bobines (1.48, 2.82 et 4.49 m)) nous permettent ainsi de constater un contraste entre la décharge au Sud, avec une conductivité entre 50 et 120 mS/m, et le reste de la tourbière avec des conductivités comprises entre 0 et 15 mS/m. Les zones de fortes conductivités peuvent ainsi correspondre à la présence de déchets ayant été enfouis, comme on peut le constater sur les trois écartements. Ces observations sont appuyées par les cartes de susceptibilités sur lesquelles on retrouve ces anomalies. Cependant, ces constatations ne permettent pas de distinguer un panache pouvant être lié à la diffusion de ces éléments potentiellement polluants, par le réseau hydrographique, de la décharge jusque dans la tourbière.

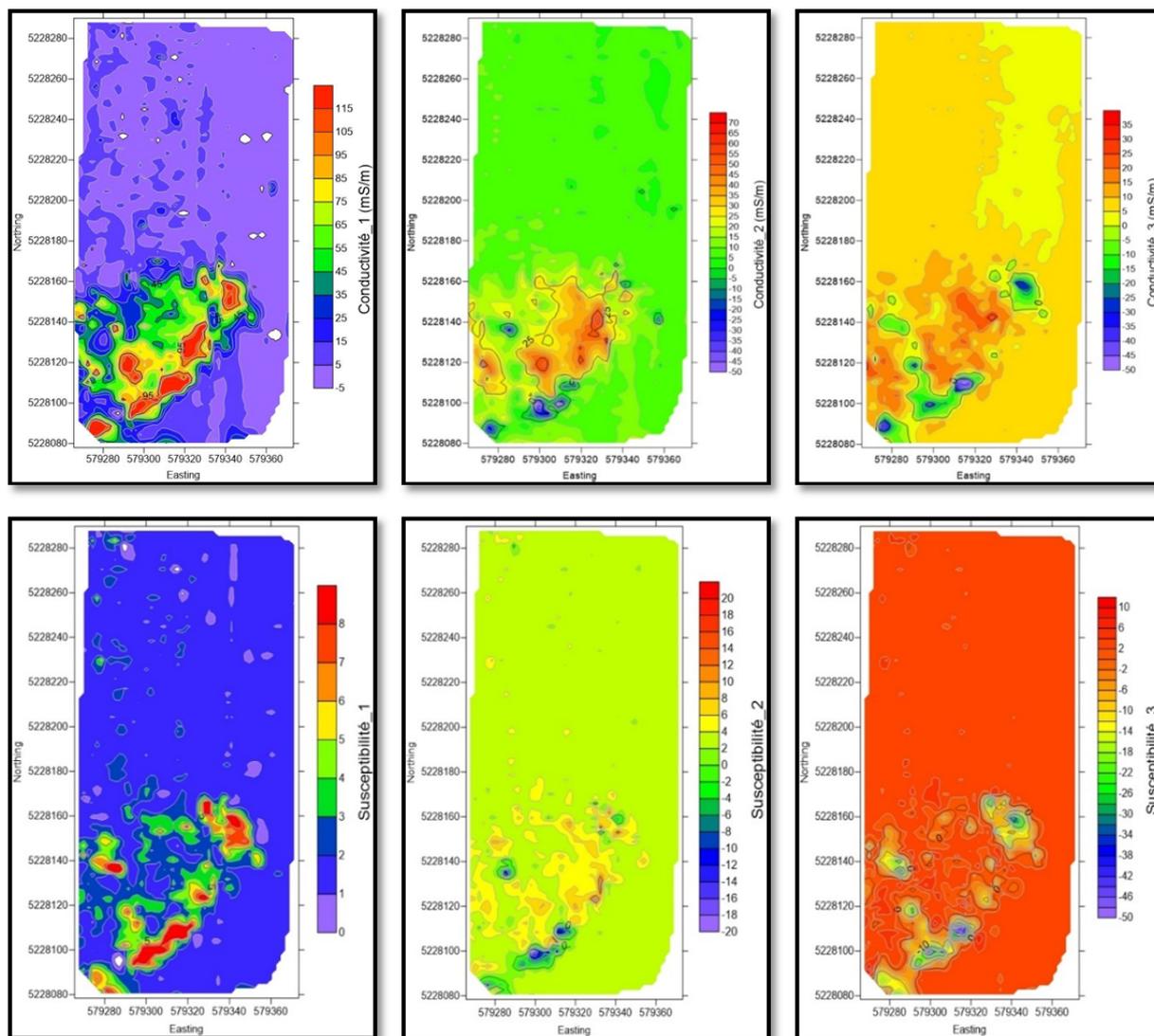


Figure 2 : Conductivités (en haut) et de susceptibilités (en bas) pour les trois écartements de bobines (1.48, 2.82 et 4.49 m).

Méthode radar sol (GPR)

L'utilisation de la méthode radar à pénétration de sol permet d'obtenir une idée claire sur la stratigraphie de la tourbière. Le profil RS1 (Figure 3) acquis au milieu de la zone d'étude, présente une forme concave qui confirme la structure classique d'une tourbière. Ainsi, on observe une délimitation marquée entre le substrat granitique et la tourbière (marqueur rouge) à une profondeur comprise entre 1.8 mètres aux extrémités et 4.3 mètres au centre de la cuvette. Au-dessus, une séquence arénitique mêlée à des passées argileuses occupe une épaisseur plus ou moins importante (marqueur orange). Enfin, la tourbe est présente à partir de 4 mètres et ce jusqu'à la surface. A partir de 1 mètre celle-ci est moins mature et plus aérée du fait de la végétation entraînant l'apparition de réflecteurs de forte intensité. Ces observations sur le profil de 300 mètres sont assez représentatives de l'ensemble de la tourbière et l'épaisseur de tourbe constatée a été appuyée par un forage à la tarière russe réalisé en 2002.

Le profil RS2 (Figure 3) a, été acquis principalement sur la décharge communale. Il permet de constater le contraste stratigraphique entre la décharge et la tourbière. Ainsi, de 0 à 105 mètres, on repère une zone caractérisée par des réflecteurs extrêmement bruités et de nombreuses diffractions. Ceux-ci correspondent à un mélange de déchets et d'arène sur une épaisseur d'environ 2 mètres et écrasant la tourbe. L'atténuation ne permet pas de repérer le substrat granitique sur la totalité du profil. Au-delà de 105 mètres on retrouve les réflecteurs identifiés sur le profil RS1 caractéristiques de la tourbière.

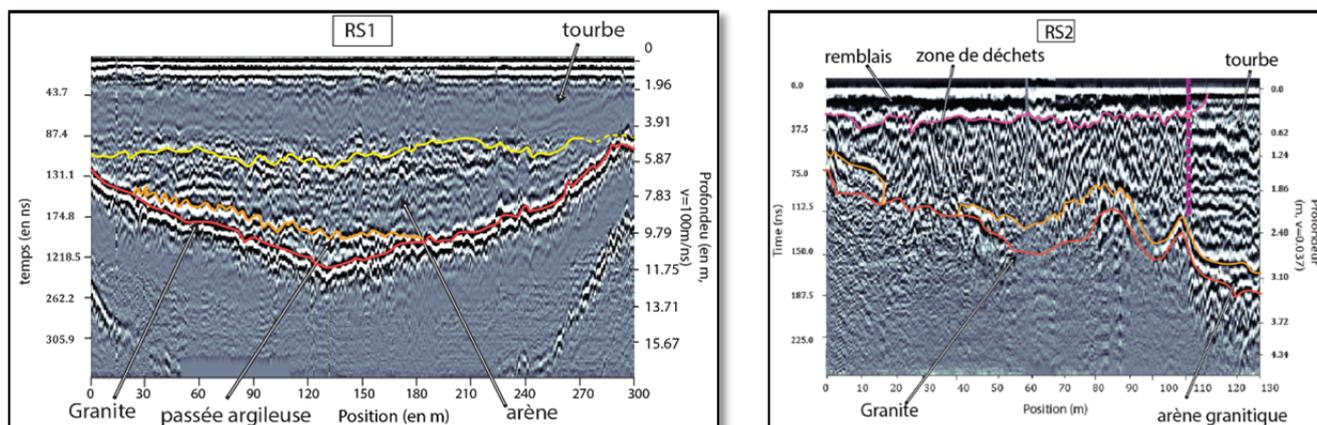


Figure 3 : Profils radars RS1 et RS2. La vitesse de propagation a été estimée à 3.7 cm/ns dans le milieu (NB : les profondeurs indiquées doivent ainsi être corrigées).

Tomographie de résistivité électrique

Deux profils de tomographie électrique (119m et 71m) ont été acquis sur la tourbière de Champgazon, avec un espacement inter-électrode métrique et suivant un dispositif Wenner-Schlumberger réciproque. Les profondeurs obtenues après inversion ne dépassent pas les 6 mètres Le premier profil () comprend la zone de la décharge communale et une partie de la tourbière le long du profil radar RS1. La zone correspondant à l'ancienne décharge montre une couche conductrice avec des résistivités comprises entre 10 et 50 $\Omega.m$, s'interrompant lorsque l'on rentre dans la tourbière. Le second profil (

Figure 5) a été acquis entièrement dans la tourbière au niveau de la première zone ouverte, en aval des circulations hydriques éventuellement issues de la décharge. Il montre un milieu quasi tabulaire.

Avec des résistivités comprises entre 60 et 500 $\Omega.m$; on ne retrouve pas de résistivités faibles en lien avec un flux de lixiviats issus de la décharge.

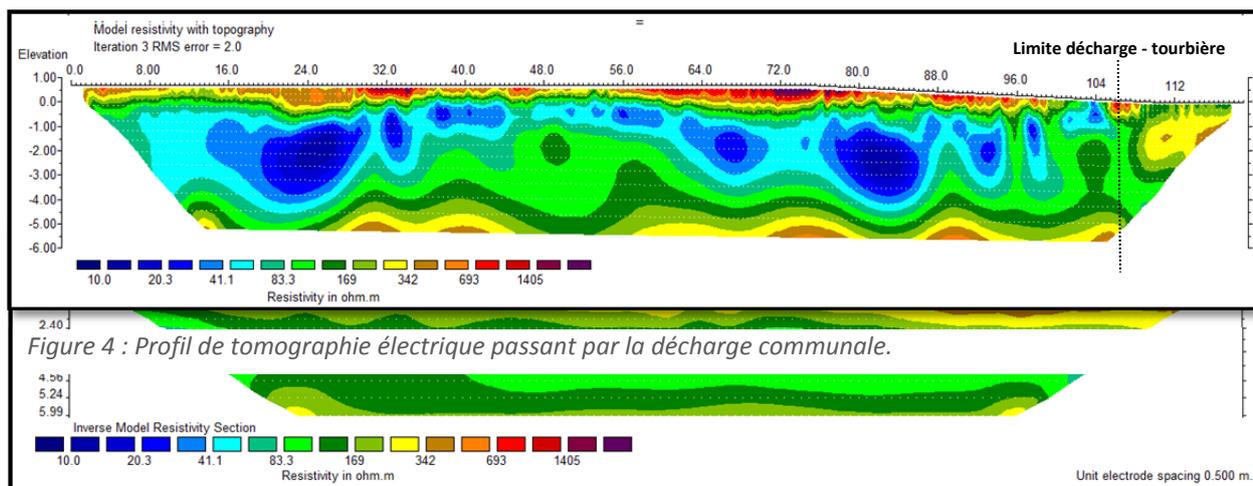


Figure 5 : Profil de tomographie électrique réalisé au sein de la tourbière.

Conclusion

Bien que cette étude ne permette pas de mettre en évidence une diffusion de la décharge communale vers la tourbière de Champgazon, elle précise la stratigraphie du site en s'appuyant essentiellement sur le radar-sol. La répartition spatiale des déchets est parfaitement montrée par la cartographie électromagnétique.

La réalisation de mesures complémentaires, dans le but d'étoffer notre connaissance de la zone et confirmer nos observations, est envisagée. Ainsi, des forages au niveau des profils radar préciseront la stratigraphie. Une extension des profilages radar et électriques permettra un cubage complet de la tourbière. L'utilisation de la polarisation provoquée permettra une meilleure caractérisation des déchets, et une cartographie de polarisation spontanée permettra d'affiner la connaissance des circulations hydriques et la diffusion d'éventuels polluants à travers et en périphérie de la tourbière.

Bibliographie

Goubet, P., (2011). « Caractérisation des écoulements de surface potentiellement polluants de la décharge de la tourbière de Champ-Gazon (Nièvre, France) », *Compte rendu d'expertise commandée par la communauté de communes des grands lacs du Morvan (CCGLM)*.

Jouffroy-Bapicot, I., (2010). « Evolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne – France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique. Variations climatiques et impact des activités anthropiques. », Vol. 1 (texte), Université de Franche-Comté,

Civette, I. (2008), « L'ancienne décharge de la tourbière de Champgazon », *L'Echo des tourbières*, n°15, Février 2008.

Mots clés : Géophysique ; Cartographie ; Tomographie ; Radar ; Tourbière ; Pollution ; Décharge ; Champgazon.

Acquisition magnétique multi-échelle pour imager des objets anthropiques.

Pauline Le Maire^{1,2} – Marc Munschy¹ – Aline Dechamp

pauline.lemaire@unistra.fr

1 -École et Observatoire des Sciences de la Terre
 Institut de Physique du Globe de Strasbourg
 UMR 7516 (Université de Strasbourg – CNRS)
 1 rue Blessig - 67084 Strasbourg Cedex
 2 – CARDEM,
 7, rue de l'uranium, 67800 Bischheim
 3 – CEA, DAM, DIF

Abstract

Magnetic method is applied to subsurface investigations to image the variation of the magnetization. IPGS develops magnetic measurements with UAV (Unmanned aerial vehicle) with fluxgate vector magnetometers. We test different height of the sensor above the ground and compare results to ground surveys for the detection of unexploded ordnance (UXO).

Résumé étendu

Dans les travaux publics la présence de vestiges peut-être un frein à la bonne avancée d'un chantier. Les vestiges peuvent être de plusieurs origines : soit des munitions non explosées (Figure 1) qui mettent en danger l'intégrité physique des personnes et contamine le sol en métaux et composés organiques toxiques [Hube, 2013], soit de vestiges archéologiques (Figure 1). Ces découvertes vont entraîner l'arrêt du chantier, pour laisser place à l'intervention de démineurs ou d'archéologues.



Figure 1: Photographies de la mise au jour d'une bombe française de 200 kg et d'une portion de mur Vauban.

L'acquisition de données géophysiques en amont de chantiers, lors de la première phase d'étude, permet d'effectuer un état des lieux du terrain. Dans cette communication, nous nous intéressons à la méthode potentielle magnétique, imageant les variations d'aimantation dans le sous-sol. L'avantage de la méthode magnétique est : la rapidité, le faible coût et il s'agit d'une méthode passive. Dans cette présentation, nous discutons de l'optimisation d'une campagne de mesure magnétique pour caractériser au mieux un objet.

Au sein de l'IPGS, pour la mesure magnétique, le choix s'est porté sur des capteurs relatifs à vanne de flux trois composantes (Figure 2) car ils permettent une compensation du champ magnétique du système d'acquisition [Munschy et al., 2007] quel que soit le support de fixation des capteurs [Bronner et al., 2013]. Le support classique est un système en sac-à-dos, avec des capteurs à une distance de 1 m par rapport au sol et un espacement de la moitié de la hauteur [Reid, 1980]. Pour obtenir la carte de la Figure 2, deux personnes se sont relayées pendant quatre jours (20 ha). Est-il possible

d'automatiser la cartographie et d'augmenter la distance entre les capteurs et les sources afin d'augmenter le rendement ? Existe-il une hauteur optimale permettant d'imager un objet de géométrie donnée ? Ces questions seront abordées dans cette présentation.

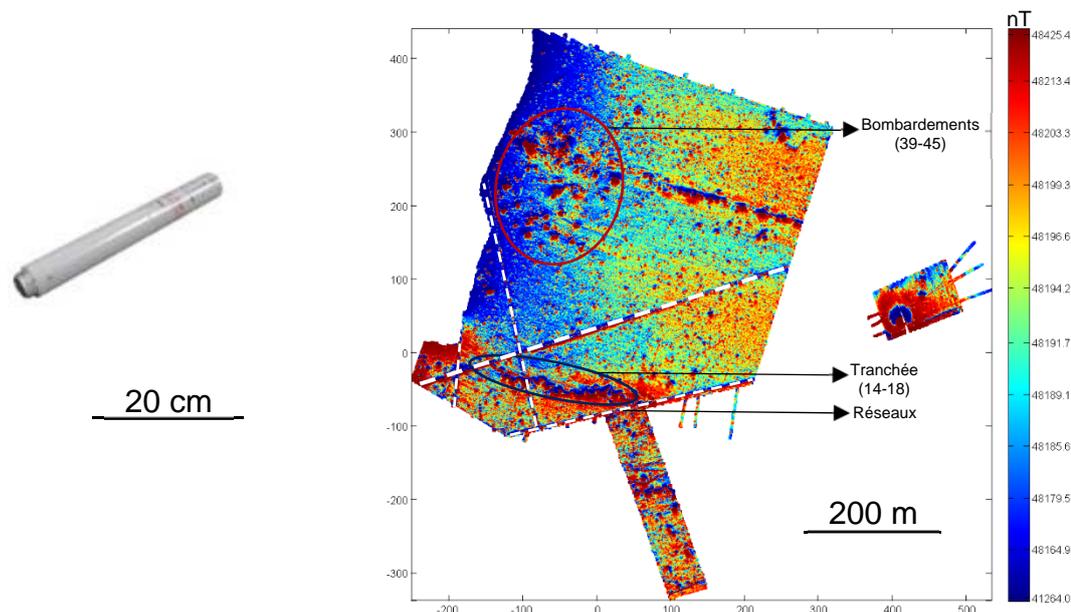


Figure 2: Photographie d'un capteur magnétique à vanne de flux (fluxgate), trois composantes (Mag-03MC70 - Bartington). Carte de champ magnétique finale représentée en couleur équi-réparties.

Dans le cadre d'une collaboration entre le CEA/DASE, Cardem et l'IPGS des acquisitions magnétiques ont été faites sur l'ancienne base aérienne 112 de Reims. Des levés à différentes altitudes : 100, 35, 15, 10, 5, 4, 3, 1 et 0.20 m, avec six support différents ont été acquis [Gavazzi et al., 2016].

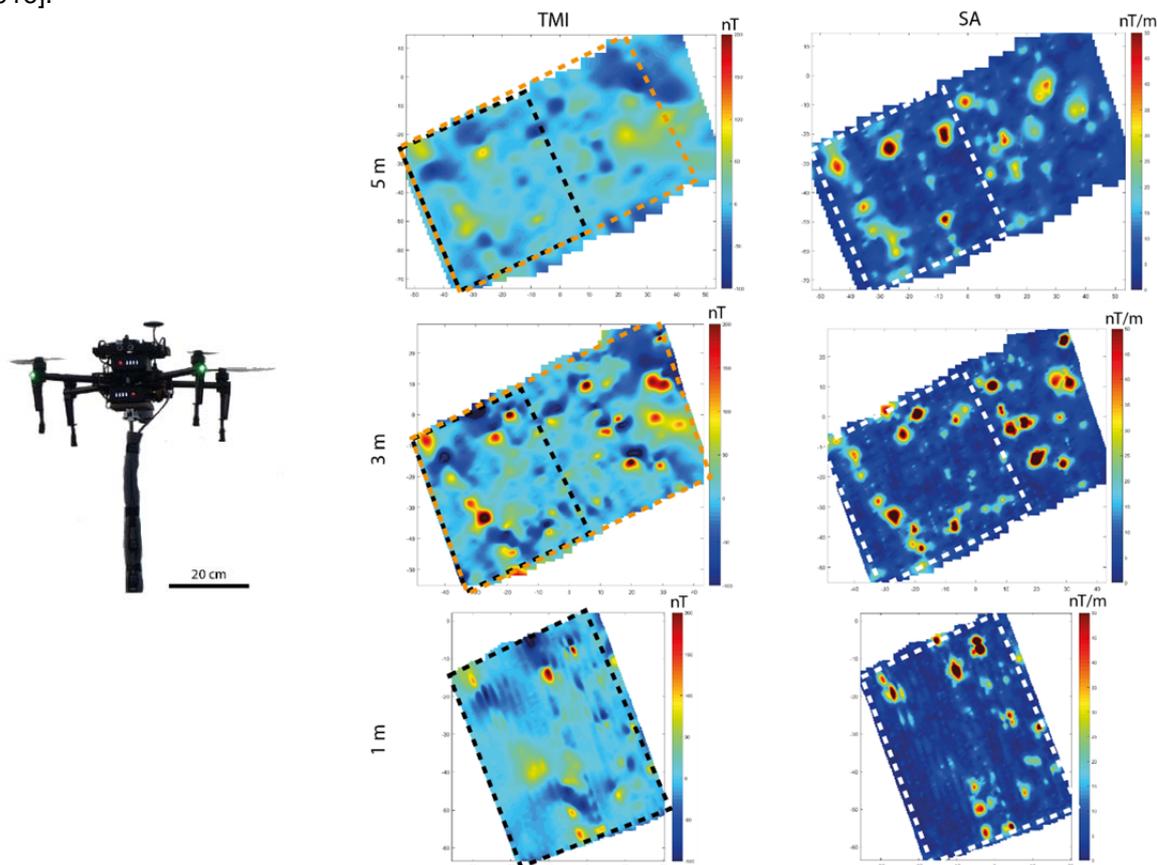


Figure 3: *Résultats sous forme de carte de l'intensité de l'anomalie magnétique et du signal analytique pour des levés en drone à trois altitudes 5, 3 et 1 m.*

Au début de l'année, des tests ont été faits avec un drone léger (Figure 3) pour différentes altitudes de vol. La présentation mettra en perspective les résultats et les comparera aux levés effectués au sol. On abordera les perspectives pour la suite des développements.

Mots clés : méthode potentielle magnétique, aéromagnétisme, multi-échelle, UXO, UAV

Bibliographie

- Bronner, A., M. Munsch, D. Sauter, J. Carlut, R. Searle, and A. Mainault (2013), Deep-tow 3C magnetic measurement: Solutions for calibration and interpretation, *Geophysics*, 78(3), J15–J23, doi:10.1190/geo2012-0214.1.
- Gavazzi, B., P. Le Maire, M. Munsch, and A. Dechamp (2016), Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys, *Lead. Edge*, 35(9), 795–797, doi:10.1190/le35090795.1.
- Hube, D. (2013), *Potentialités d'un marquage des eaux souterraines par des substances pyrotechniques en relation avec les zones de combats de la première guerre mondiale Les cas des perchlorates.*
- Munsch, M., D. Boulanger, P. Ulrich, and M. Bouiflane (2007), Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation, *J. Appl. Geophys.*, 61(3–4), 168–183, doi:10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.
- Reid, A. B. (1980), Aeromagnetic survey design, *Geophysics*, 45(5), 973–976.



Suivi de la consolidation d'un mélange sol-ciment par la méthode de polarisation provoquée

Carole Kaouane¹, Lucile Saussaye², Yannick Fargier³, Sérgio Palma Lopes⁴

¹CEREMA Normandie Centre, Laboratoire de Rouen, carole.kaouane@cerema.fr

²CEREMA Normandie Centre, Laboratoire de Blois, lucile.saussaye@cerema.fr

³CEREMA Normandie Centre, Laboratoire de Blois, yannick.fargier@cerema.fr

⁴IFSTTAR Nantes GeoEND, sergio.lopes@ifsttar.fr

Abstract

In this study, we investigate the potential of Induced Polarization measurements to monitor the consolidation of a soil-cement mix, implemented into an experimental levee, according to the soil deep mixing techniques. We observe a clear and constant evolution of the mixed soil DC-electrical resistivity over the 30 days of the monitoring period and significant variations in the chargeability curves. We limit the electrode polarization effect with a specific geometrical design and acquisition sequence. Measurements on the natural soil show a very low variability over time which validates our methodology.

Introduction

La mise en place de mélanges sol-ciment et additifs hydrauliques est une technique de stabilisation des sols économiquement et écologiquement intéressante. Toutefois, il n'existe actuellement aucune méthode non destructive d'évaluation de la qualité de la mise en œuvre et de la consolidation de ces mélanges. La technique de Polarisation Provoquée (PP) est sensible à la texture des milieux granulaires (Florsch et al., 2014) et à la teneur en eau (Titov et al., 2004). Elle présente un certain potentiel pour suivre l'évolution de la microstructure lors de la prise et la consolidation des mélanges (Kaouane, 2016).

Cette étude décrit le suivi continu sur 30 jours de la consolidation d'un mélange de limon A2 et de 11 % massique de ciment CEMIII/C 32.5 N par la méthode de polarisation provoquée. Le sol a été prélevé dans une tranchée de 1.4 m x 0.7 m x 0.5 m réalisée sur une digue expérimentale composée du limon A2 naturel, compacté initialement à 96 % de sa masse volumique sèche à l'Optimum Proctor Normal (1,75 t/m³) et à une teneur en eau de 14,9 %. Le site de mesure est connu par des opérations de recherche antérieures (Figure 1). Le volume de l'excavation a été évaluée à 0,406 m³ par la mesure classique et à 0,422 m³ par photogrammétrie.

Environ 625 kg de limon extrait (masse humide, à une teneur en eau moyenne de 18 %) ont été malaxés avec 75 kg de ciment et 200 L d'eau puis remis en place dans la tranchée. La masse volumique du mélange en place est de 2 t/m³.



Figure 1 : Présentation du site de mesure. La digue en limon naturel a été mise en place sur le terrain du Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER) de Rouen, en 2011, dans le cadre de l'opération de recherche Dignes et Ouvrages Fluviaux : Érosion, Affouillements, Séismes (DOFEAS) (2010-2013).

Mesures

Le profil de tomographie de résistivité électrique (TRE) est longitudinal à la tranchée et à la digue (Figure 2). Les électrodes de potentiel (de type Petiau, non polarisables) et les électrodes d'injection en acier

inox sont situées sur deux lignes séparées et parallèles, espacées de 20 cm. L'espacement des électrodes sur chaque ligne est de 20 cm également. Le profil fait 4m de long.

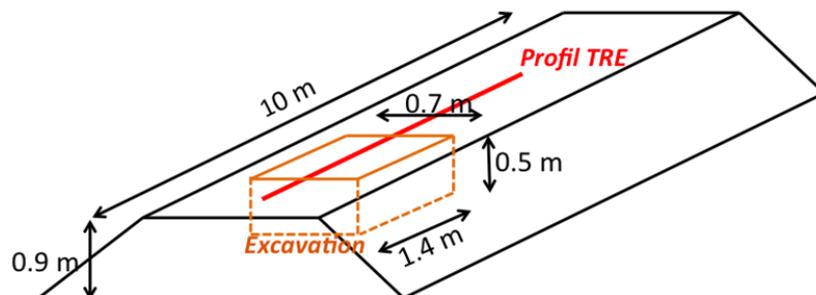


Figure 2 : Schéma de la digue et dimensions de la tranchée avec positionnement du profil TRE.

Un gabarit en bois a été conçu pour permettre un montage rapide et le maintien des électrodes en place. On souhaite s'approcher de l'hypothèse des électrodes ponctuelles. Les électrodes d'injection (pointes en acier inoxydable) sont enfoncées de 2 à 3 cm dans le sol et les électrodes non polarisables (NP) reposent sur le milieu (enfoncement de 1 à 2 cm). Une chaussette en géotextile au pied des électrodes NP est ajoutée pour faciliter leur retrait du mélange sol-ciment en fin de suivi (au cas où le mélange, une fois durci, adhérerait à l'électrode).

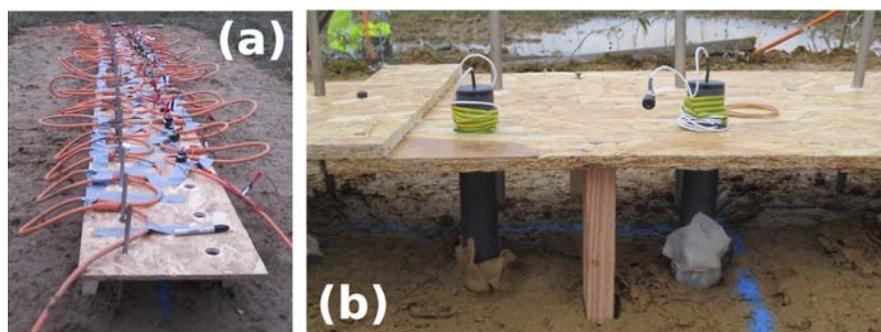


Figure 3 : Présentation du montage. a) Gabarit utilisé pour les électrodes d'injection et de mesure ; b) montage des électrodes NP.

Le système d'acquisition utilisé est un Syscal Pro piloté par le logiciel Comsys (Iris Instruments) ce qui permet la prise de mesure en continu. On choisit une fenêtre d'injection de 4s égale à la durée de la fenêtre de coupure. La courbe de chargeabilité est obtenue avec une distribution de fenêtres préprogrammée par le constructeur (distribution Cole-Cole, 20 fenêtres de chargeabilité).

Les dipôles sont interrogés selon une séquence qui oblige un espacement suffisant entre deux mesures consécutives pour limiter l'effet de polarisation résiduelle à l'interface électrodes/sol suite à une injection de courant. On s'assure que la résistance de contact reste inférieure à 20 kOhm (Kiberu, 2002) sur toute la durée du suivi. On choisit de limiter l'injection de courant en fixant le potentiel mesuré maximum à 800 mV. Ceci permet un potentiel spontané aux électrodes faible ainsi qu'une limitation de la polarisation aux électrodes.

Le montage est couvert par une bâche sur toute la durée de l'expérimentation. Les mesures ont été réalisées en janvier 2017 et le montage a été soumis à des intempéries fortes : épisodes de vents violents et gel sur une dizaine de jours.

Résultats

Pour plus de clarté, on expose ici uniquement les mesures pour quatre dipôles : deux sur le milieu naturel (N-mes19 et N-mes20) ainsi que deux sur le milieu traité (T-mes2 et T-mes9). Les résultats montrent une évolution nette de la résistivité du mélange, plus conducteur au départ que le sol naturel (limon) puis qui tend à devenir aussi résistant que celui-ci. Une correction linéaire en température est appliquée (selon

Zisser et al., 2010), qui permet d'observer différentes cinétiques d'évolution (Figure 4). La correction est appliquée en supposant que les variations de résistivité électrique du limon naturel sont uniquement liées aux variations de température. Les valeurs de résistivité obtenues et leurs variations sont cohérents avec les résultats de Kaouane (2016) pour un mélange limon A2 et 5% massique ciment et 1% de chaux (13 Ohm.m à 5 jours et 22 Ohm.m à 16 jours).

Lors de la mise en place, le mélange à l'état liquide est électriquement très conducteur. Au fil de la prise, les molécules d'eau sont consommées, ce qui diminue progressivement la conduction ionique. Une partie de l'eau libre peut aussi s'évaporer par le haut, ou geler, ce qui induit aussi un milieu électriquement plus résistant. On s'attend à une forte consommation de molécules d'eau dès le départ pour hydrater les anhydres puis à une cinétique de réaction plus lente, ce qui expliquerait les changements de pentes.

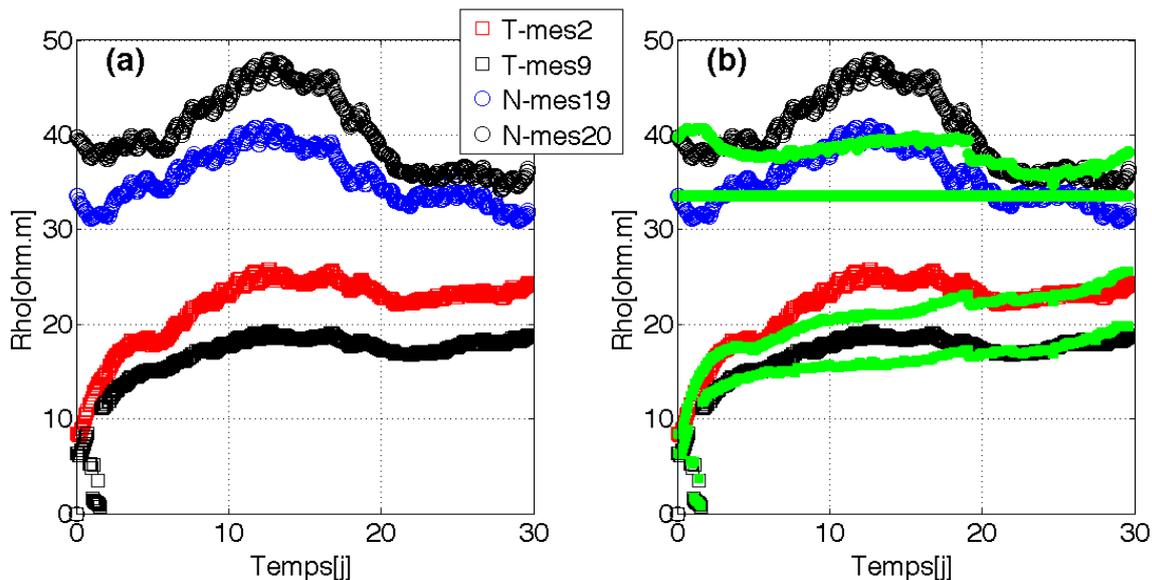


Figure 4 : Mesures de résistivité électrique au cours du temps pour deux dipôles localisés sur le limon traité et deux dipôles localisés sur le limon naturel; a) mesures brutes; b) mesures corrigées en température (courbes vertes superposées) à partir des variations déduites de la mesure sur le dipôle N-mes19.

La chargeabilité M (en mV/V) donnée directement par le système d'acquisition ne montre pas d'évolution aisément interprétable, toutefois les courbes de chargeabilité montrent des évolutions notables en amplitude et en inflexion, qui peuvent sans doute être expliquées par les réactions liées à la consolidation (Figure 5). Les données sur le limon naturel montrent une faible variabilité temporelle, ce qui valide la qualité du montage sur les 30 jours.

Discussion & Conclusion

L'expérimentation s'est tenue dans des conditions météorologiques défavorables (épisodes de vent, pluie puis gel). L'observation de la résistivité électrique et celle des courbes de chargeabilité montre des évolutions temporelles, ce qui est encourageant quant à la capacité de la mesure de PP pour suivre l'évolution du mélange sol-ciment. Les réactions physico-chimiques ont pu être stoppées ou modifiées par les épisodes de gel ce qui empêche actuellement toute déduction formelle.

La méthodologie choisie est simple et proche des conditions réelles dans un cadre d'exploitation pour la géotechnique. Cette étude est à notre connaissance la première qui s'intéresse à l'effet PP pour le suivi de la consolidation de sols traités au ciment.

Les travaux se poursuivent actuellement pour concrètement évaluer l'évolution des courbes de chargeabilité et concevoir un protocole en laboratoire comprenant des analyses physico-chimiques et l'observation de la microstructure.

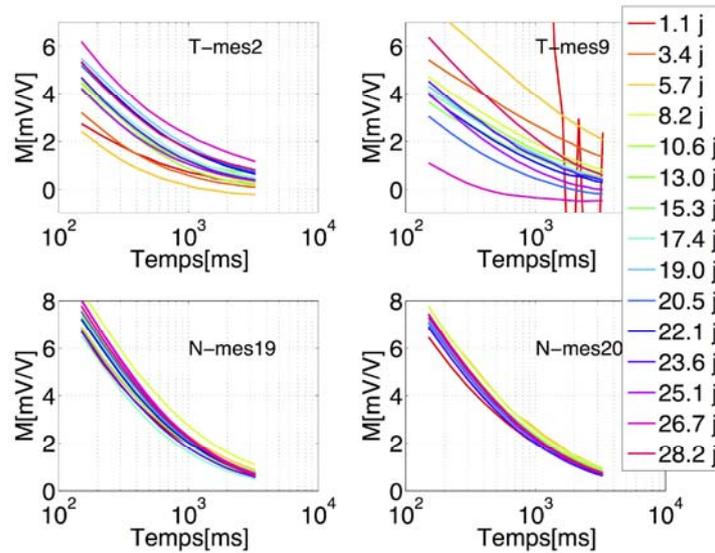


Figure 5 : Courbes de chargeabilité pour les 4 dipôles observés à différentes échéances. La courbe bruitée pour le premier jour du dipôle T-mes9 est due à un problème de connexion.

Remerciements

Les auteurs remercient profondément : Myriam Schmutz, INP Bordeaux, et Michel Chouteau, École Polytechnique de Montréal, pour leurs conseils et leurs suivis ; Abderahim Jardani, Université de Rouen pour le prêt d'électrodes ; le CEREMA, les techniciens du CER, et Théo Dezert (IFSTTAR) pour la mise en place de l'étude.

Bibliographie

Florsch, N., Revil, A., & Camerlynck, C. (2014). Inversion of generalized relaxation time distributions with optimized damping parameter. *Journal of Applied Geophysics*, 109, 119–132.

Kaouane, C. (2016). Polarisation Provoquée Spectrale appliquée à la caractérisation géotechnique des sols : Application pratique en laboratoire. PhD Thesis. Ecole Polytechnique de Montreal.

Kiberu, J. (2002) Induced Polarization and Resistivity Measurements on a Suite of Near Surface Soil Samples and Their Empirical Relationships to Selected Measured Engineering Parameters. MSc Thesis, ITC, Enschede.

Titov, K., Kemna, A., Tarasov, A., & Vereecken, H. (2004). Induced Polarization of Unsaturated Sand Determined through Time Domain Measurements. *Vadose Zone Journal*, (3), 1160–1168.

Zisser, N., Kemna, A., & Nover, G. (2010). Dependence of spectral-induced polarization response of sandstone on temperature and its relevance to permeability estimation. *Journal of Geophysical Research*, 115(B9), B09214.

Mots clés

Polarisation Provoquée ; Mélange sol-ciment ; Consolidation ; Monitoring ; Stabilisation des sols

Retour d'expérience, réhabilitation de la canalisation d'alimentation de la centrale hydro- électrique de Chamorand. Forage dirigé de Saint Martin-sur-La Chambre

F. Rivière

FONDASOL

franck.riviere@fondasol.fr

Dans le cadre de la réhabilitation de la canalisation d'alimentation de la centrale hydro-électrique de Chamorand, EDF a décidé de remplacer un tronçon de conduite forcée située dans une zone instable par une conduite souterraine, en utilisant la technique de forage dirigé.

Cette méthode devait permettre de renouveler la partie basse de la conduite en passant à plus d'une centaine de mètres de la surface, évitant ainsi les contraintes de la géologie de surface.

Le trou pilote du forage dirigé a été arrêté à 80 m de son point de sortie suite à un éboulement créé par la foration au passage d'une zone particulièrement fracturée associée à de gros débits d'eau.

L'objectif de la mission était de rechercher un vide linéaire de 270mm de diamètre à 17 m de profondeur dans un environnement de terrain fracturés et altérés (schistes plus ou moins argileux). Cette recherche a été menée par méthode radar géologique à partir d'une série de sondages verticaux.



Figure n°01: Mise en place de l'antenne radar de forage dans un des équipements

La méthode sismique n'a pas été retenue. Nous avons jugé que la cible n'aurait pas généré d'anomalie suffisante pour être quantifiable (delta de temps de l'ordre de 0.1 à 0.2 ms).

La méthode radar géologique par réflectométrie a été retenue. Elle est basée sur l'analyse des hyperboles susceptibles d'être attribuée à un cylindre vide dans un encaissant considéré comme homogène. A la réflectométrie demandée ont été ajoutées des mesures de déviation et des mesures de tomographie radar.

Les mesures de déviation avaient pour but de relever la position précise de l'antenne radar en forage. Les mesures de tomographie radar avaient pour but d'évaluer la vitesse de propagation des ondes radar *in situ* afin de l'utiliser pour le calcul de la position des anomalies radar sur profils.

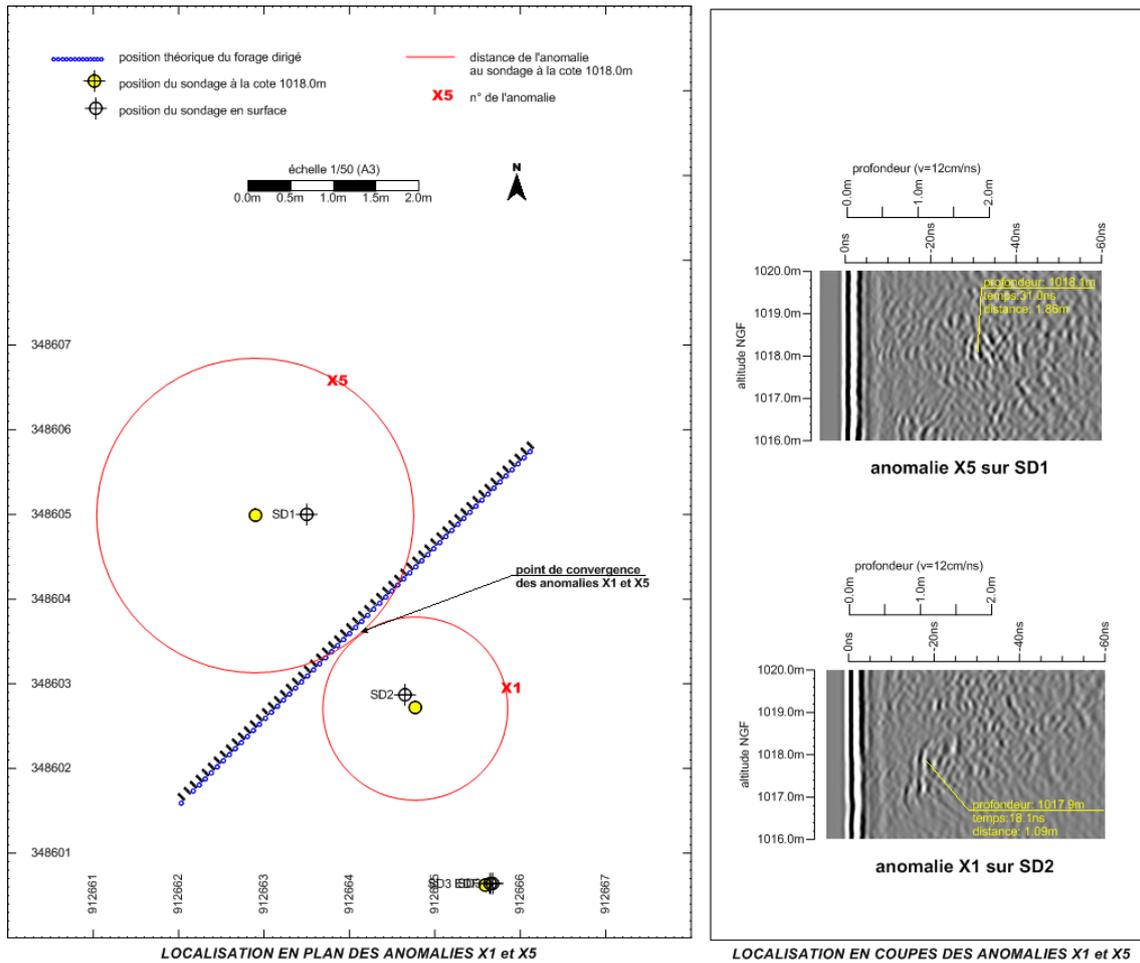


Figure n°02 : sections radar traitées et localisation de l'anomalie attribuée à la cible

Dans cette étude, la difficulté n'a pas été l'identification d'anomalies susceptibles d'être attribuées à la cible. La plus grande difficulté a été d'analyser leur situation afin de faire un choix sur la cible la plus probable d'une part, et d'autre part de positionner le plus précisément possible dans l'espace cette cible choisie de façon à pouvoir l'atteindre en sondage.



Figure n°03 : cavité recoupée à la côte 1018.0m

La sismique par ondes de surface à partir d'enregistrements du bruit de fond suivant une antenne linéaire

Sylvain Fiolleau

EDF CEIDRE-TEGG

sylvain.fiolleau@edf.fr

Christophe Vergnault

EDF CEIDRE-TEGG

christophe.vergnault@edf.fr

Cécile Cornou

IsTerre

cecile.cornou@univ-grenoble-alpes.fr

1 Généralités sur la méthode

La méthode MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) introduite par (Park, 1999) est une méthode non-invasive visant à évaluer les propriétés élastiques du sous-sol depuis la surface, à partir de la mesure des ondes de surface de Rayleigh (à l'aide de géophones verticaux) à terre et Scholte en mer (à l'aide d'hydrophones). Une adaptation est également possible en utilisant les ondes de Love (à l'aide de géophones horizontaux), dont le mouvement particulière est horizontal. Pour les ondes de Rayleigh (ou de Love), le principe consiste à générer un choc en compression (ou cisaillement) à la surface du sol. Les ondes de Rayleigh (ou de Love) générées à la surface libre se propagent et sont enregistrées par une chaîne de récepteurs sismiques. Dans le cas d'un milieu stratifié, les ondes de surface ont un caractère dispersif, c.a.d. que leur vitesse de phase évolue avec la longueur d'onde, elle-même en lien avec la fréquence. L'analyse de la vitesse de phase des ondes de surface dans le domaine fréquentiel, appelé diagramme de dispersion, va permettre de calculer une évolution des vitesses sismiques S du sous-sol, après une étape d'inversion. Toutefois, le diagramme de dispersion n'est exploitable que sur une partie de la plage de fréquence. En effet, la limite aux basses fréquences dépend de la résolution liée à la longueur du dispositif d'acquisition et des effets de champ proche. Elle est d'autant plus étroite que le rapport longueur d'onde / longueur du dispositif (λ/L) est petit. En théorie, les effets de champ proche affectent un dispositif dont la distance source récepteur est trop courte pour que l'interférence entre les ondes de volume réfléchies à la surface libre puisse générer des ondes de surface se propageant à une distance suffisante de l'excitation pour que ces ondes puissent être considérées comme planes. La combinaison de ces facteurs peut être très pénalisante et limiter la profondeur d'investigation autour de la dizaine de mètres. En effet, à partir de cas synthétiques et de faibles déport de source, O'Neill (2003) a trouvé que la longueur d'onde maximale que l'on peut mesurer de façon fiable dépend de la longueur L du profil : $\lambda_{\max}=0.4L$ associé à une profondeur de résolution de $Z_{\max} \cong 0.2L$. Bodet (2005) a poursuivi ce type de travaux et à défini les critères suivants :

- $\lambda_{\max}= 0.5.L$, moins de 5% d'erreur sur la courbe de dispersion ($Z_{\max} \cong 0.25L$)
- $\lambda_{\max}= L$ avec 10 % d'erreur sur la courbe de dispersion ($Z_{\max} \cong 0.5L$)
- $\lambda_{\max}= 2L$ avec 40% d'erreur sur la courbe de dispersion ($Z_{\max} \cong L$)

Il apparaît donc nécessaire de fiabiliser l'analyse MASW aux basses fréquences. Une façon de s'affranchir de la limitation de champ proche pourrait être d'exploiter le bruit de fond sismique comme cela est fait avec la méthode AMV (Ambient Vibration Measurement). Pour cela,

classiquement il est préconisé d'effectuer une analyse en deux dimensions (réseau) à l'aide d'un dispositif en L, en cercle ou encore d'autres types de réseau comme indiqué sur la Figure 1, qui permet de prendre en compte la directivité du bruit enregistré..

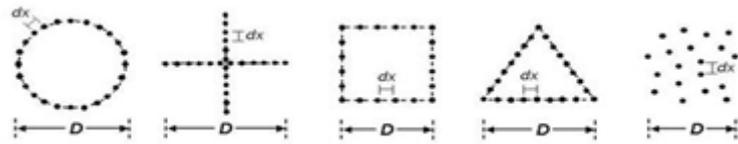


Figure 1 : Exemples de profils 2D pour des acquisitions en bruit de fond réseau (<http://www.masw.com/>).

Cette mise en œuvre est inévitablement plus contraignante, d'autant plus que l'antenne de récepteurs d'un profil MASW peut être exploitée pour enregistrer du bruit de fond. Aussi, Louie (Louie, 2001) a proposé la méthode ReMi (Refraction Microtremor) permettant d'utiliser le système d'acquisition de sismique réfraction. Cependant la fiabilité de la méthode ReMi a été remise en question (Cox & Wood, 2010; Cox & Beekman, 2011) notamment dans le cas où les sources de bruit ne sont pas isotropes ou ne sont pas alignées selon la direction du profil d'acquisition.

Etude réalisée

En partant des constats, l'objectif de cette étude est d'analyser le potentiel des méthodes passives (bruit de fond) suivant une antenne linéaire, méthode nommée passive linéaire. Pour cela, deux méthodes ont été utilisées pour traiter les données passives : l'auto-corrélation spatiale introduite par Aki et améliorée par Bettig et al. (SPAC, (Aki, 1957; Bettig, et al., 2001) et la méthode F-K (Lacoss, Kelly, & Toksöz, 1969) proche de la méthode ReMi (Louie, 2001) qui n'a pas pu être testée. L'analyse porte sur les données AVA, MASW et passif linéaire des sites du projet européen NERIES, d'une base de données issue d'ISTerre enregistrée au LIBAN, pour finir par des sites EDF dont la géométrie est particulière (digue, écluse, etc...).

L'étude confirme la sensibilité de la méthode FK à la directivité des sources de bruit. En effet, la présence d'un bruit sismique non-isotrope se traduit par des ondes planes se propageant de manière oblique par rapport à la direction de l'antenne linéaire, donc des vitesses de phase apparentes plus élevées que les vitesses de phase réelles. En conséquence, pour les méthodes ReMi ou FK, il est nécessaire de pointer la partie basse de l'enveloppe de distribution des vitesses de phase.

La Figure 2 présente le pointé sur le maximum (vert) de l'histogramme de dispersion généré par la méthode FK et le bas de l'enveloppe (bleu). Le résultat de l'analyse SPAC est en marron. Enfin la courbe de dispersion MASW est en rouge. La Figure 2 illustre que, même en respectant le protocole défini par Louie (2001), la méthode FK est peu fiable. En revanche, sur cet exemple la méthode SPAC est plus robuste.

L'analyse des 38 profils de la base de données NERIES-LIBAN permet d'arriver aux résultats suivants :

- 8 profils de sismique passive linéaire manquaient d'énergie pour être exploités,

- Les courbes de dispersions de 7 profils passifs ont des plages de fréquence strictement inférieures à celles de la MASW (les courbes de dispersion ne se croisent pas),
- 23 profils ont permis une comparaison entre méthodes passive linéaire et MASW au moyen du calcul du coefficient de variation (écart-type entre les courbes/moyenne des 2 courbes)

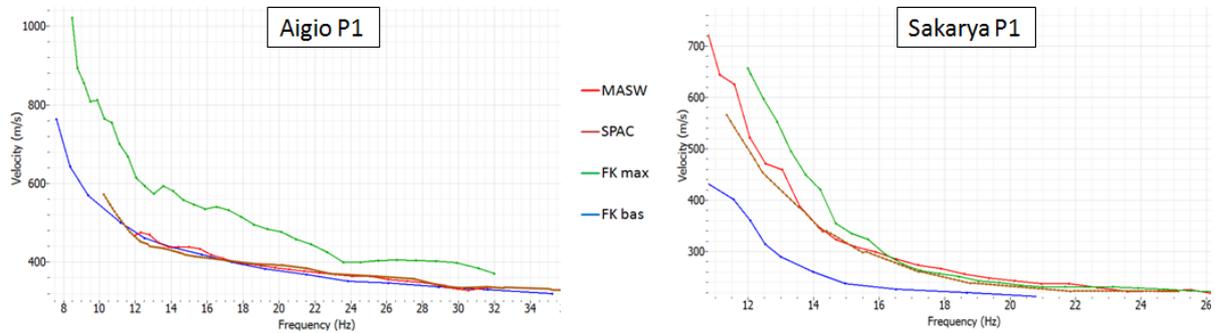


Figure 2 : Comparaison entre la courbe dispersion obtenue par MASW (rouge) et les pointés du spectre FK sur le bas de l'enveloppe de l'histogramme de dispersion (bleu) et sur son maximum de l'histogramme (vert), respectivement pour les sites d'Aigio et de Sakarya.

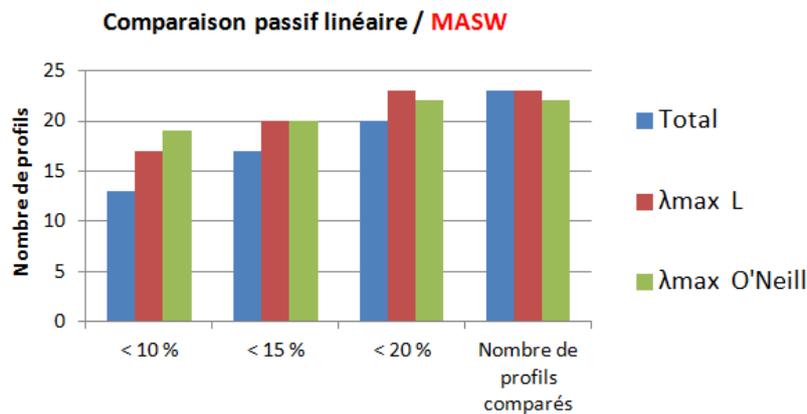


Figure 3 : Comparaison des courbes de dispersion entre la MASW et le passif linéaire. Les histogrammes représentent le nombre de profils pour lesquels les écarts sont respectivement inférieurs à 10%, 15% et 20% entre les courbes de dispersion pour la totalité des longueurs d'ondes comparées (bleu), les longueurs d'onde inférieures à la longueur du profil (rouge) et pour celles inférieures à la limite d'O'Neill (vert).

On constate, sur la Figure 3, que pour des longueurs d'ondes équivalentes à longueur d'onde égale à L ou plus faibles, les courbes de dispersion du passif et de l'actif peuvent être considérées identiques à 10% près, ce qui reflète classiquement l'erreur de pointé.

Par ailleurs, les plages moyennes des fréquences investiguées par les différentes méthodes se résument de la façon suivante :

- pour la MASW de 9.5 Hz à 41.1 Hz
- pour le réseau de 1.9 Hz à 39.1 Hz
- pour le passif linéaire de 5.5 Hz à 24.3 Hz

Ces trois plages de fréquence illustrent la complémentarité des méthodes.

Cette complémentarité s'illustre également sur les courbes de dispersion des sites « Edessa » et « Cité sportive » (Figure 4). Notamment, l'exemple d'Edessa est intéressant car il met en évidence l'impact des effets de champ proche sur la MASW en dessous de 7 Hz.

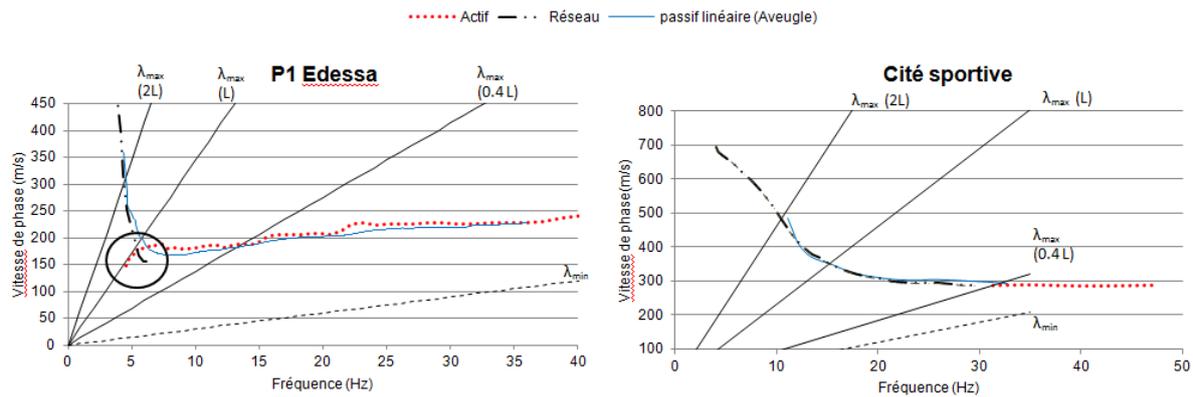


Figure 4 : Courbes de dispersion moyennes issues du MASW, du passif linéaire et de la méthode AVA pour les sites Edessa (Grèce) et Cité sportive (Beyrouth, Liban). Les longueurs d'onde maximales (2L, L et 0.4 L) sont représentées en trait plein noir et la longueur d'onde minimale (2dx) en pointillé.

Conclusion

Cette étude a permis de montrer que la méthode passive suivant une antenne linéaire est complémentaire des méthodes réseau et MASW en apportant généralement de l'information plus basse fréquence que la MASW, en s'affranchissant des effets de champ proche. Toutefois, il faut rester prudent dans son utilisation avec la nécessité de la coupler avec des enregistrements actifs et en réseau lorsque c'est possible. Cette redondance d'informations permet de converger vers une courbe de dispersion la plus robuste possible et de calibrer l'inversion constituant l'étape suivante. En effet, cette étude s'est concentrée sur la comparaison des courbes de dispersion et a montré que l'erreur introduite avant même l'inversion pouvait aller jusqu'à 10% en respectant une longueur d'onde maximale égale à la longueur du dispositif. Au delà de cette limite, il n'est pas prudent d'utiliser les résultats obtenus avec le passif linéaire. L'étape d'inversion ajoutant également de l'incertitude au résultat, il ne serait pas raisonnable de dépasser cette limite de 10% d'incertitude pour la courbe de dispersion.

BIBLIOGRAPHIE

- Aki, K.** (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors: Bulletin of the Earthquake Research.
- Bettig, B., Bard, P.-Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou, C., et al.** (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified autocorrelation method (SPAC). Application to the Grenoble area, Bolletino di GeoTeorica ed Applicata, 42, 281-304.
- Cox, B., & Beekman, A.** (2011). Intramethod variability in ReMi dispersion measurements and Vs estimates at shallow bedrock sites. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 354 - 362.
- Cox, B., & Wood, C.** (2010). A Comparison of Linear-Array Surface Wave Methods at a Soft Soil Site in the Mississippi Embayment., (pp. 1369-1378). West Palm Beach, Florida, Lacoss, R., Kelly, E., & Toksöz, M. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. *GEOPHYSICS*, 34(1), 21-38.
- Louie, J. N.** (2001). Faster, better: Shear wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays." *Bull. Seismol. Soc. Am.*,
- O'Neill, A.** (2003). Full-waveform reflectivity for modelling, inversion and appraisal of seismic surface wave dispersion in shallow site investigations. *Thèse de doctorat*. Perth, Australie: University of western Australia.,
- Park, C. M.** (1999). *Multichannel analysis of surface waves* (Vol. 64(3)). (Geophysics, Éd.)

Méthode alternative d'analyse des ondes de surface pour l'imagerie 2D du sous-sol

Damien Pageot^{1,2}, Donatienne Leparoux², Yann Capdeville¹ et Philippe Côte²

¹. Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, UMR6112, CNRS, Université de Nantes, France.

². IFSTTAR, GERS, GeoEND, F-44340 Bouguenais, France;

Introduction

Dans le contexte actuel du développement des technologies d'éoliennes en mer, l'appréhension géotechnique des fonds marins est cruciale. Concernant le développement d'éoliennes en proche offshore une des questions clés repose sur la qualification des paramètres mécaniques du sous-sol et de leur variabilité spatiale. La vitesse des ondes sismiques de cisaillement (ondes S) est un des paramètres d'intérêt pour le dimensionnement géotechnique des fondations (Kaynia, 2011). Aussi, l'évolution des mesures sismiques marines et de leur exploitation, classiquement traitées en ondes de volume, vers des méthodologies d'analyse en ondes de surface a été proposée en Mer du Nord (Socco et al., 2011).

Cependant, dans certaines zones telles que les 20 miles marins en Bretagne sud, les milieux superficiels du proche offshore présentent une complexité structurale importante. Ainsi, dans les contextes associés à la côte ouest française, où l'hypothèse de milieu stratifié plan (1D) ne peut plus être suivie, les méthodes sismiques reposant sur l'analyse de la dispersion des ondes de surface atteignent leur limite de validité. Face à ces verrous notre approche, inscrite dans le projet régional WeaMEC PROSE (<https://www.weamec.fr/blog/recordproject/prose/>) vise à définir la faisabilité de techniques d'imagerie de la géologie des sédiments sous-marins à partir de techniques géophysiques adaptées à la reconnaissance de milieux présentant de fortes variabilités spatiales.

Pour ce type de contexte, les potentialités de l'inversion de la forme d'onde démontrés en milieux terrestres par la prise en compte récente des ondes de surface (Masoni et al., 2014; Pérez Solano et al., 2014) sur des structures complexes ouvre des possibilités pour la reconnaissance du sous-sol marin à faible profondeur lorsque les structures présentent des variabilités latérales. Cependant, l'efficacité des approches en formes d'ondes complètes dépend fortement de l'échantillonnage fin des capteurs, de leurs couplages réguliers ainsi que de la répétitivité de la source et de son adéquation fréquentielle à l'échelle des structures recherchées, c'est à dire sur une gamme suffisamment étendue pour palier les problèmes d'ambiguïtés de phases à basses fréquences tout en intégrant des fréquences suffisamment élevées pour résoudre les échelles les plus fines. Enfin, l'importance de la connaissance d'une version lissée du milieu pour définir un modèle initial est cruciale pour les méthodes d'inversion de la forme d'onde basée sur une optimisation locale. Pour ces raisons, nous proposons ici une méthode d'inversion alternative, par optimisation globale du problème, basée sur les techniques statistiques par essaim de particules et sur une discrétisation *sparse* du milieu pour réduire les coût de calcul.

Les essais de particules

Les approches s'appuyant sur l'optimisation locale sont fortement dépendante du modèle initial utilisé (a priori forts). Plusieurs approches alternatives s'appuyant sur des méthodes d'optimisation globale existent comme par exemple: la méthode Monte-Carlo, le recuit simulé ou les algorithmes génétiques. Parmi ces méthodes d'optimisation globale, la méthode dit des essaims de particules (PSO, *Particle Swarm Optimization*), proposée par Eberhart and Kennedy (1995) et récemment introduite en géophysique (Shaw and Srivastava (2007); Yuan et al. (2009)), se détache de part son efficacité, sa facilité d'implémentation et son nombre réduit de paramètres de contrôle.

Dans PSO, la première étape consiste à générer aléatoirement une population de n particules dans l'espace de solution défini. Chaque particule est définie par un vecteur de position \mathbf{x} contenant les paramètres du modèle et un vecteur de vitesse \mathbf{v} contrôlant le mouvement de la particule. À l'itération k , \mathbf{x} et \mathbf{v} sont mis à jour tel que (Eberhart and Shi, 2000):

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^k &= \chi \left[\mathbf{v}_i^{k-1} + r_p c_1 (\mathbf{x}_{p,i} - \mathbf{x}_i^{k-1}) + r_g c_2 (\mathbf{x}_g - \mathbf{x}_i^{k-1}) \right] \\ \mathbf{x}_i^k &= \mathbf{x}_i^{k-1} + \mathbf{v}_i^k \end{aligned}$$

où χ est le facteur de constriction, $\mathbf{x}_{p,i}$ et \mathbf{x}_g sont, respectivement, la meilleure position atteinte par la particule i et la meilleure position atteinte par l'ensemble de l'essaim, r_p et r_g sont des vecteurs de variables

aléatoires générés à chaque itération k , c_1 et c_2 sont le paramètre cognitif et le paramètre social et χ est le paramètre de constriction dont la valeur dépend de c_1 et c_2 .

PSO est donc contrôlé par quatre paramètres: le nombre d'individus, le nombre d'itérations et les paramètres c_1 et c_2 permettant de jouer sur l'équilibre exploitation-exploration. La figure 1 présente un cas simple d'optimisation visant à trouver la position du minimum global de la fonction Rastrigin 2D. Cet exemple utilise 10 particules, 100 itération et $c_1 = c_2 = 2.05$. À l'itération finale (100), 7 des 10 particules ont atteint le minimum global de la fonction.

Echantillonnage spatial du milieu

Afin de permettre la reconstruction d'un modèle spatialement lisse tout en maintenant, dans le processus d'inversion, un nombre d'inconnues limitées, le choix a été fait de ne définir les modèles testés qu'avec un nombre limité de points. La figure 2 présente un exemple de modèle généré aléatoirement: 5 profils, fixes latéralement, constitués de 5 points mobiles verticalement sont utilisés pour définir le modèle. Chaque point porte quatre informations: la position du point en profondeur, la vitesse de propagation des ondes S, la densité et le coefficient de Poisson.

Afin de construire un modèle 2D à partir de ces points, une interpolation sinusoidale est effectuée entre les points de chaque profil puis, une interpolation linéaire horizontale est effectuée entre chaque profil. Le modèle ainsi reconstruit peut être facilement utilisé par exemple dans un code de modélisation différences finies.

Inversion

Généralement, l'analyse des ondes de surface se limite à l'exploitation de courbes de dispersion effectives. Cependant, des informations complémentaires sur le milieu sont contenues dans le diagramme de dispersion complet (Pageot et al., 2017). Ainsi, c'est le diagramme de dispersion complet des ondes de Rayleigh qui est considéré ici comme donnée de référence lors du processus d'inversion. Les données synthétiques sont produites à l'aide d'un code de modélisation de propagation élastique 2D en différences finies et en domaine temporel (Levander, 1988). Les données de référence sont calculées dans un modèle de proche surface simple présentée dans la figure 3(a) pour deux acquisitions symétriques. La ligne de récepteurs est centrée à 70 m et est constituée de 48 capteurs espacés d'un mètres. La première source est située à 26.5 m et la seconde à 103.5 m. Un diagramme de dispersion est produit pour chaque tir.

Pour cette inversion, 50 modèles (particules) sont générés aléatoirement de manière à ce qui a été décrit dans la précédente section (même répartition et positionnement des points). Le nombre d'itération est fixé à 50, les paramètres c_1 et c_2 sont fixés, respectivement, à 2.8 et 1.3 (Song et al., 2012). Seules la profondeur (z) des points mobiles et les vitesses des ondes S (V_s) sont recherchées, la densité et le coefficient de Poisson étant fixes et constants (2000 kg/m^3 et 0.35). Les limites de l'espace des solutions sont déterminées telles que: $0 < z < 25 \text{ m}$ et $100 < V_s < 1200 \text{ m/s}$ pour l'ensemble des points.

La figure 3(b) montre le meilleur modèle de vitesse S obtenu à l'issue de l'inversion. Bien que ce modèle lisse ne soit que très peu précis, il présente des caractéristiques intéressantes: (1) un certain niveau de variation latéral du milieu a pu être reproduit, (2) les variations de vitesses verticales respectent globalement celles du modèle original comme présenté dans la figure 4.

Perspectives et conclusions

Les résultats préliminaires d'une nouvelle méthode d'imagerie utilisant les ondes de surface ont été présenté. De nombreux points restent à explorer (paramétrisation de l'inversion, échantillonnage spatial du milieu, sensibilité au bruit) et à améliorer (parallélisation du code, prise en compte de l'atténuation). Cependant, cette méthode apparaît prometteuse et pourrait servir de base à la construction de modèle initiaux pour des méthodes d'imagerie haute-résolution.

Remerciements

Ce travail est porté par le projet WeaMEC PROSE (<https://www.weamec.fr/blog/recordproject/prose/>) soutenu par la Région Pays-de-la-Loire.

- Eberhart, R.C. and Shi, Y. [2000] Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. *Evolutionary Computation*, 2000. *Proceedings of the 2000 Congress on*, vol. 1, 84–88.
- Eberhart, R. and Kennedy, J. [1995] A new optimizer using particle swarm theory. *Micro Machine and Human Science*, 1995. MHS'95., *Proceedings of the Sixth International Symposium on*, 39–43.
- Kaynia, A. [2011] Wave propagation theory in offshore applications. *Computational Methods in Civil Engineering*, 2(2), 127–143.
- Levander, A.R. [1988] Fourth-order finite-difference p-sv seismograms. *Geophysics*, 53(11), 1425–1436.
- Masoni, I., Brossier, R., Virieux, J. and Boelle, J. [2014] Robust full waveform inversion of surface waves. In: *Technical Program Expanded Abstracts 2014. Society of Exploration Geophysicists*, 1126–1130.
- Pageot, D., Le Feuvre, M., Leparoux, D., Capdeville, Y. and Côte, P. [2017] Assessment of physical properties of a sea dike using multichannel analysis of surface waves and 3d forward modeling. *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Pérez Solano, C., Donno, D. and Chauris, H. [2014] Alternative waveform inversion for surface wave analysis in 2-d media. *Geophysical Journal International*, 198(3), 1359–1372.
- Shaw, R. and Srivastava, S. [2007] Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data. *Geophysics*, 72(2), F75–F83.
- Socco, V.L. et al. [2011] On the use of the norwegian geotechnical institute's prototype seabed-coupled shear wave vibrator for shallow soil characterization-ii. joint inversion of multimodal love and scholte surface waves. *Geophysical Journal International*, 185(1), 237–252.
- Song, X., Tang, L., Lv, X., Fang, H. and Gu, H. [2012] Application of particle swarm optimization to interpret rayleigh wave dispersion curves. *Journal of Applied Geophysics*, 84, 1 – 13, ISSN 0926-9851.
- Yuan, S., Wang, S. and Tian, N. [2009] Swarm intelligence optimization and its application in geophysical data inversion. *Applied Geophysics*, 6(2), 166–174, ISSN 1993-065.

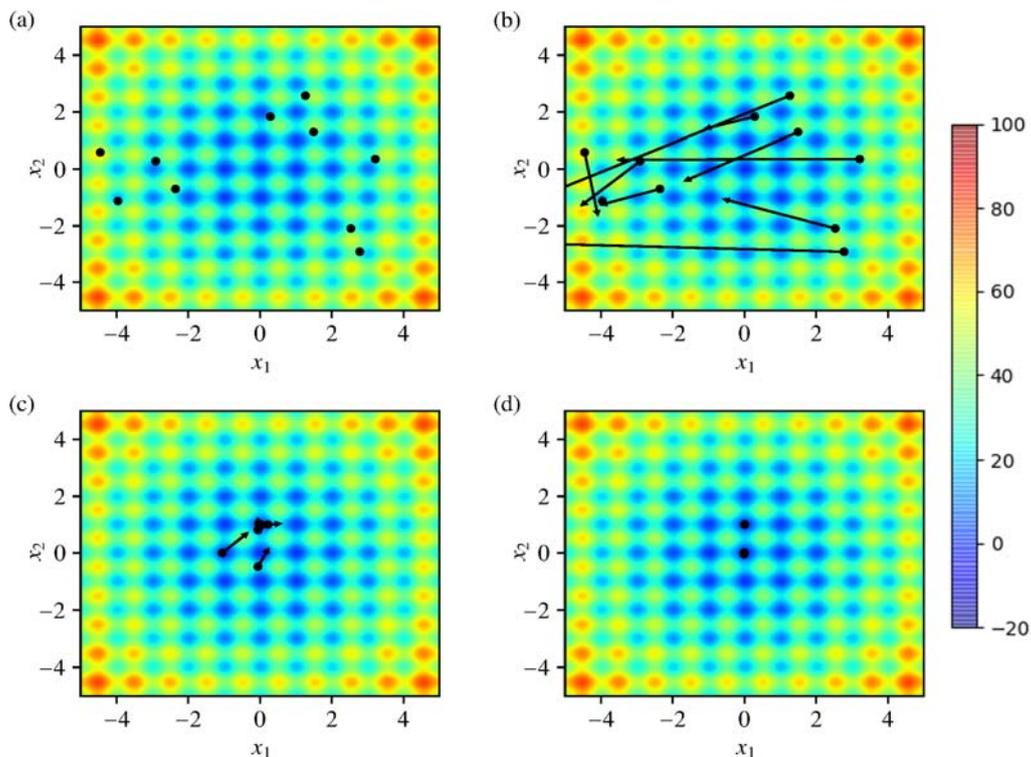


Figure 1: (a) Tirage aléatoire de la position des particules. (b) Première mise à jour de la position des particules, les fêches représentent les vecteurs de vitesse v . (c) Position des particules à l'itération 50. (d) Position des particules à l'itération finale

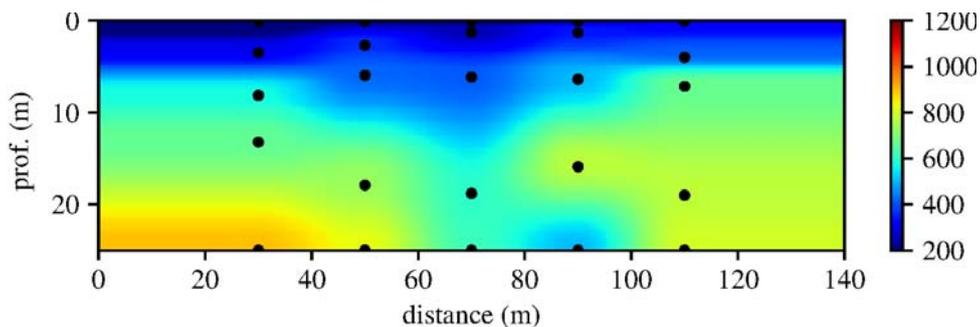


Figure 2: Exemple d'un modèle de vitesse reconstruit par interpolation à partir de

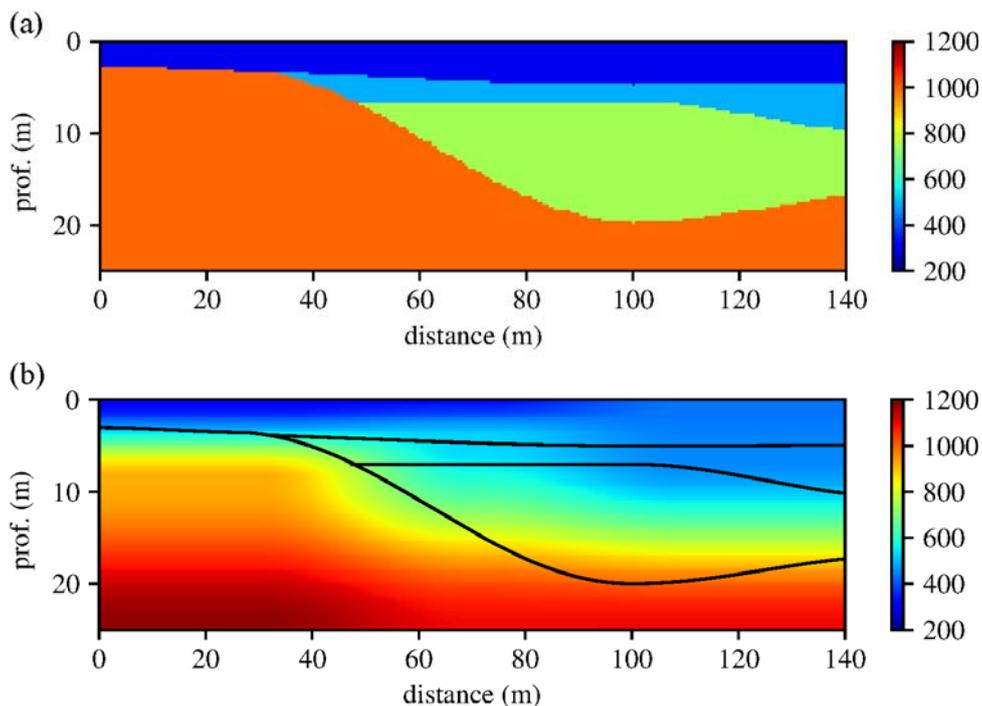


Figure 3: (a) Modèle synthétique de vitesse des ondes S utilisé pour générer les données numériques. (b) Résultat d'inversion (préliminaire) utilisant la méthode

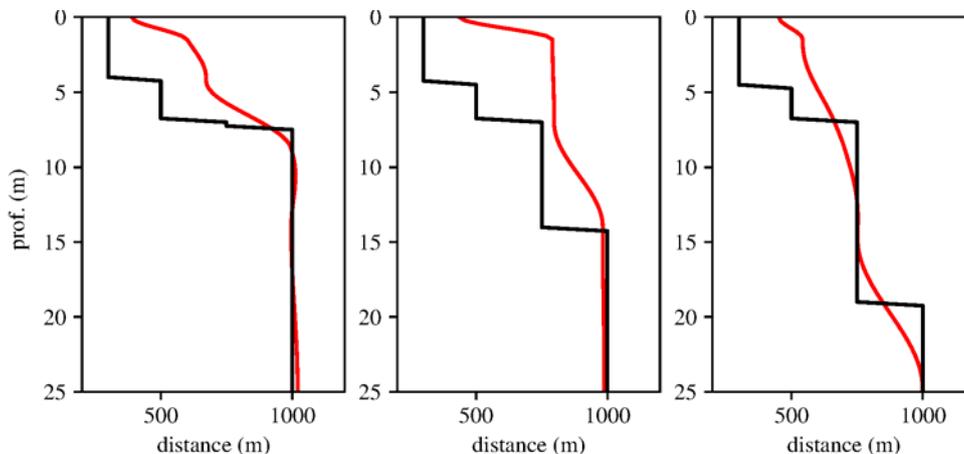


Figure 4: Comparaison des vitesses S en profondeur entre le modèle synthétique (lignes noires) et le modèle reconstruit (lignes rouges) à 50, 70 et 90 m.

mots-clés : ondes de surface ; proche surface ; dispersion ; imagerie ; essaim de particules ;

Effet d'une cavité sur les 2 composantes (horizontale et verticale) des ondes de Rayleigh dans le domaine fréquentiel: approche numérique et expérimentale

Filippi Céline^(1,2), Leparoux Donatienne⁽¹⁾, Grandjean Gilles⁽²⁾, Bitri Adnand,⁽²⁾ Côte Philippe⁽¹⁾

(1) IFFSTAR, Bouguenais (2) BRGM, Orléans celine.filippi@ifstar.fr

In the aim to contribute to identify the capacity of Rayleigh waves for underground cavities detection, we propose a combined approach based on numerical and experimental data obtained in a reduced-scale laboratory. First, the diffraction pattern of a shallow cavity illuminated by the elastic wave-field is analysed in the frequency domain through numerical tests in an homogeneous medium. Then, we propose to calculate the H/V ratio of the wave-field in an experimental heterogeneous medium.

Introduction

La détection des cavités représente un fort enjeu sociétal surtout en milieu urbain et à l'aplomb des axes de communication. C'est pourquoi la prise en considération de cet aléa est devenue depuis plusieurs décennies une préoccupation majeure dans le génie civil. Pour s'adapter aux problématiques du domaine géotechnique, nous considérons dans cette étude des cavités dont le diamètre est inférieur à 10 mètres avec un toit situé à moins de 20 mètres de profondeur. Nous avons choisi d'utiliser une méthode sismique pour détecter les hétérogénéités en complément des méthodes micro-gravimétrique ou radar qui peuvent dans certains contextes être limitées. Nous avons privilégié l'étude des ondes de surface de type Rayleigh (R) dont la faisabilité pour détecter les cavités a été traitée par de nombreux auteurs (e.g. Shtivelman 2002, Xia et al. 2007). L'objectif est de relier la présence de la cavité dans le sous-sol et ses paramètres (taille, profondeur) à des observables robustes présents dans les enregistrements sismiques de surface. Pour cela, nous utilisons une approche combinée basée sur des données numériques obtenues avec un code en éléments spectraux d'une part et sur des données expérimentales menées à échelle réduite d'autre part. La propagation des ondes est étudiée selon la composante horizontale (H équivalente à Sv) et verticale (V). Les résultats montrent que le composante H est très sensible à la présence de la cavité. Nous avons donc étudié, en fonction de ces deux composantes, la distribution de l'énergie contenue dans le champ diffracté pour une configuration donnée. Les perturbations causées par ce champ diffracté se distinguent nettement sur l'onde directe de Rayleigh (onde incidente+champ diffracté avant). Elles sont également mis en évidence lors l'étude des rapports H/V à différentes fréquences.

Outils

Le banc de mesure MUSC a été construit pour reproduire les phénomènes de propagation des ondes sismiques à l'échelle du laboratoire dans un environnement contrôlé. Un modèle réalisé à partir de résine époxyde représente le milieu géologique à étudier. Un interféromètre laser mesure le déplacement des particules au passage des ondes à la surface du modèle. Une nouvelle version de cet interféromètre laser, validée par Valensi et al. (2015), permet actuellement mesurer la composante horizontale de façon synchrone à la composante verticale. Les ondes sismiques sont générées par un transducteur piézoélectrique au contact. Les bras de positionnement permettent de déplacer à la fois la source et le récepteur avec une précision de 10 µm. Les mesures à échelle réduite nécessitent un changement d'échelle : les vitesses sont multipliées par 2 dans MUSC tandis que les longueurs d'ondes et le temps sont multipliés par 10⁻³ (Bretaudeau et al. 2013). Un exemple d'enregistrement obtenu dans un milieu bi-couche qui contient une cavité est présenté Figure 1. La source est un Ricker de fréquence centrale 100 kHz et les récepteurs sont disposés perpendiculairement à la cavité.

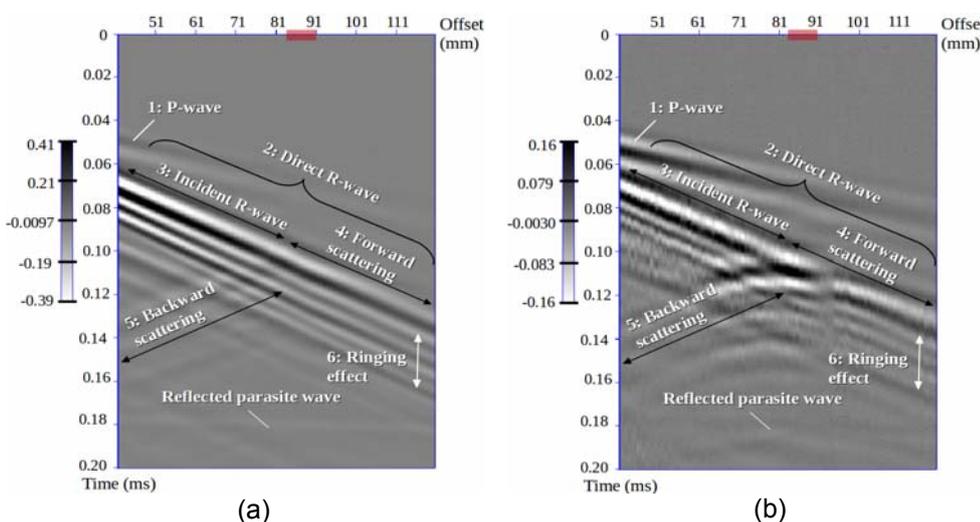


Figure 1: Enregistrement sismique obtenu dans un milieu bi-couche en présence d'une cavité circulaire de 5mm de diamètre dont le toit est à 6mm de profondeur.

(a) Composante V
(b) Composante H
La projection de la cavité en surface est indiquée par le rectangle rouge sur l'axe des offsets.

-Couche 1: $V_p=1400\text{m/s}$, $V_s=1000\text{m/s}$, $e=3\text{mm}$
-Couche 2: $V_p=3000\text{m/s}$, $V_s=2300\text{m/s}$

L'approche expérimentale à partir du banc MUSC a tout d'abord permis de valider l'approche numérique basée sur les éléments spectraux utilisée dans ce papier (code EFISPEC3D <http://efispec.free.fr/> F. De Martin) qui modélise la cavité comme étant une surface libre. En effet, la comparaison des données numériques et expérimentales montrent une très bonne coïncidence (coefficient de corrélation de 0.99) après estimation de l'ondelette source. Les différentes simulations numériques ont donc permis de faire varier les paramètres de la cavité comme sa taille et sa profondeur dans un milieu homogène. Ces derniers sont étudiés en fonction de la longueur d'onde et les résultats sont présentés dans la partie ci-dessous.

Résultats

Dans un milieu homogène, nous avons fait varier le diamètre de la cavité en fonction de la longueur d'onde ($s\lambda$) selon 4 configurations présentées Figure 2. La profondeur du toit de la cavité est fixée à ($d\lambda=0,2$). Nous avons extrait le champ diffracté en soustrayant le champ total dans un milieu avec une cavité par le champ total dans le même milieu mais sans cavité (milieu de référence). Nous obtenons donc un tir résiduel qui contient uniquement les perturbations du signal causées par l'hétérogénéité. L'amplitude du champ diffracté en surface est étudiée en fonction de l'offset pour une fréquence donnée. Les amplitudes sont normalisées par l'amplitude de l'onde R directe à la première trace dans le milieu de référence. L'étude de la répartition d'énergie du champ diffracté a montré l'existence de deux régimes dépendant du diamètre de l'objet:

- Un régime haute fréquence (HF) où la taille de la cavité est grande par rapport à la longueur d'onde ($s\lambda > 0,3$). Les perturbations de plus fortes amplitudes ont lieu derrière l'objet.
- Un régime basse fréquence (BF) où le diamètre de la cavité est faible devant la longueur d'onde ($s\lambda < 0,3$). La répartition de l'énergie semble cette fois-ci quasiment symétrique de part d'autre de l'objet.

Ces résultats ont été également mis en évidence sur des snapshots en profondeur.

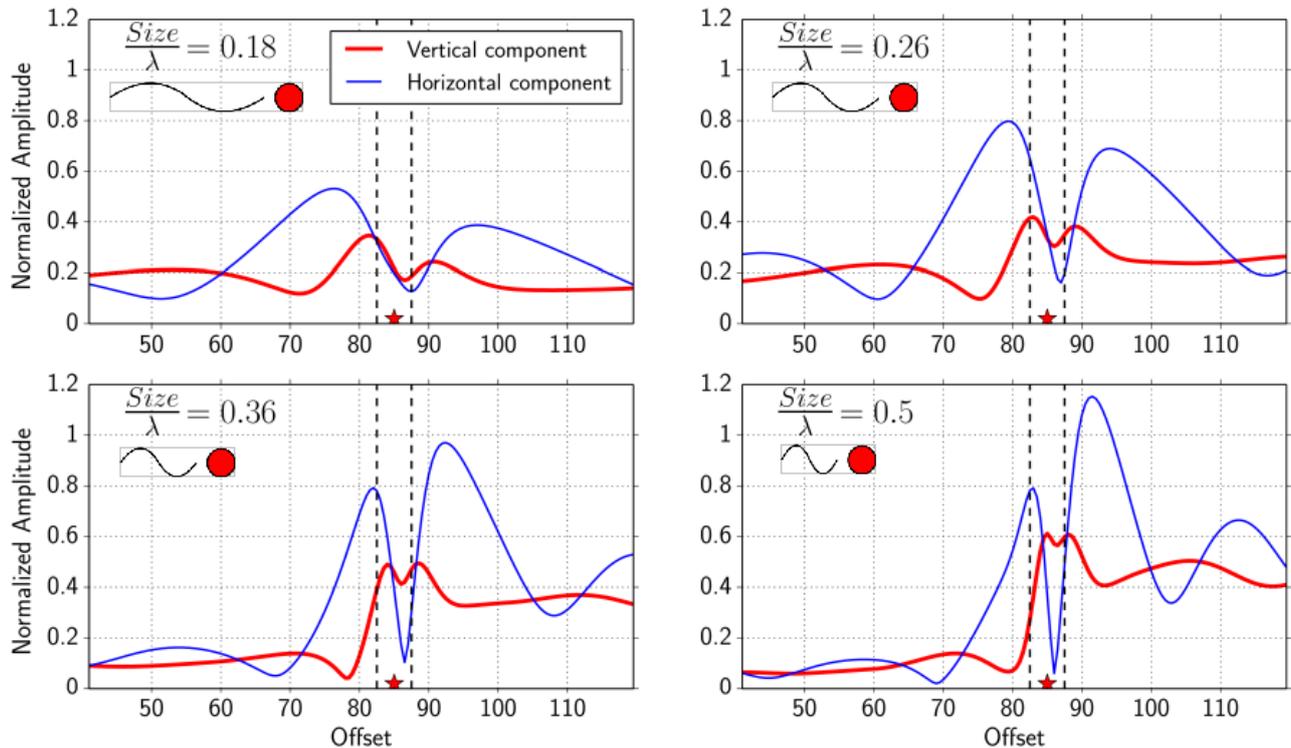


Figure 2: Amplitude du champ diffracté pour différents ($s\lambda$). La profondeur du toit de la cavité par rapport à la longueur d'onde est fixée à 0,2. La courbe bleue représente les amplitudes normalisées du champ diffracté pour la composante verticale et la rouge pour la composante horizontale. Les frontières de la cavité sont indiquées par les pointillés noir.

La présence des perturbations du champ diffracté de part et d'autre de la cavité est causée par la conversion des ondes de Rayleigh en onde de volume. La Figure 3 représente le champ diffracté extrait dans les mêmes conditions que précédemment pour $s\lambda=0,5$ et $d\lambda=0,2$ (régime HF). Sur les deux figures, la diffraction avant et plus énergétique que la diffraction arrière ce qui confirme les précédents résultats. Les offsets pour lesquels les ondes de Rayleigh sont converties en onde de volume (flèches rouges) coïncident avec les perturbations de fortes amplitudes au voisinage de la cavité. Ces conversions d'ondes sont moins énergétiques sur la composante V que sur la composante H. Elles semblent être à l'origine de la forme de la diffraction. En effet, la diffraction sur la composante H est hyperbolique du fait la prépondérance des ondes de volume. En revanche, les branches de la diffraction forment des droites sur la composante V car les ondes de Rayleigh sont majoritairement enregistrées et que leur propagation est linéaire.

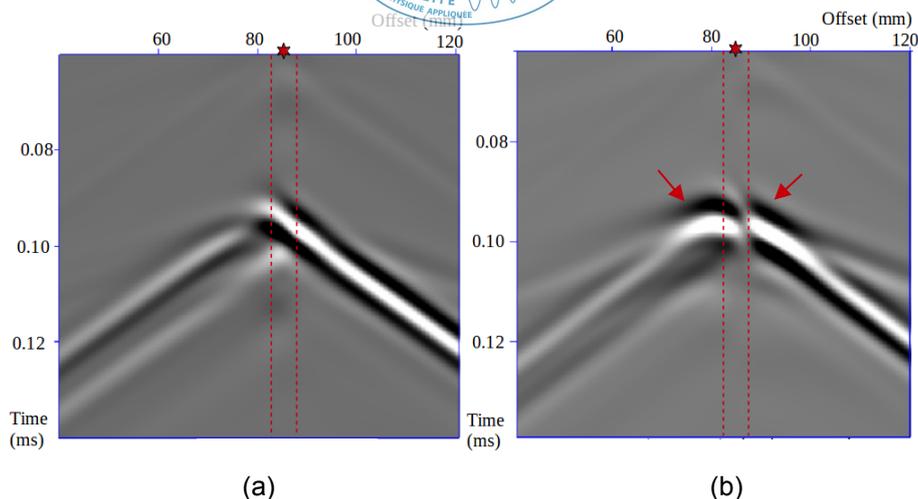


Figure 3: Champ diffracté pour $s\lambda=0,5$ et $d\lambda=0,2$. (a) Composante verticale, (b) Composante horizontale. Les pointillés délimitent les frontières de la cavité à la surface.

En vue des résultats précédents, la majorité des perturbations a lieu derrière la cavité. Les fortes amplitudes de la diffraction avant vont perturber l'onde incidente et révéler la présence de l'objet en créant des interférences destructives comme le montre la Figure 4. Cette figure représente l'amplitude de l'onde R directe normalisée pour une fréquence donnée dans un milieu homogène en présence d'une cavité. L'onde directe a été fenêtrée puis extraite à l'aide de la fonction mute. La taille de la cavité par rapport à la longueur d'onde est fixée à 0,5. Le rapport $d\lambda$ varie de 0,2 à 0,5. Les pics et les creux d'amplitudes (n°3 et 5 sur la composante H) sont causés par les interactions entre le champ incident et le champ diffracté. Ces interactions sont plus fortes pour la composante H que pour la composante V. En effet, la composante V met en évidence une seule anomalie positive au dessus de la cavité lorsque celle ci est très proche de la surface (n°4). En revanche, l'anomalie est visible pour tous les rapports $d\lambda$ sur la composante H. Nous voyons également que plus la profondeur du toit de la cavité est superficielle, plus l'énergie derrière la cavité est faible (n°7). Cela est dû aux interactions destructives causées par le déphasage entre l'onde de Rayleigh diffractée et l'onde incidente. L'énergie de l'onde directe par rapport aux offsets peut donc être reliée à la profondeur de la cavité.

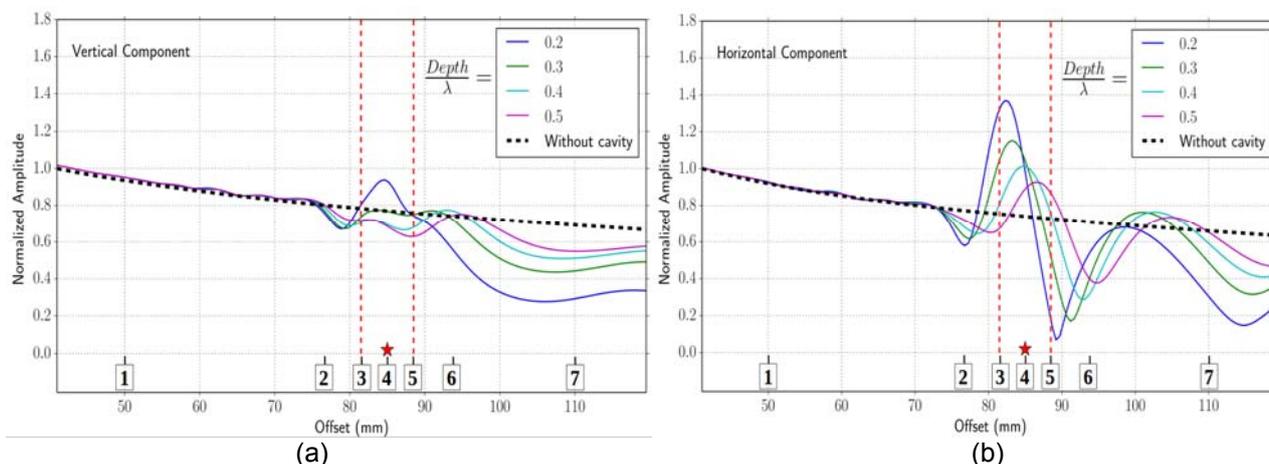


Figure 4: Amplitude normalisée de l'onde directe pour différents ($d\lambda$). Le diamètre de la cavité par rapport à la longueur d'onde est fixée à 0,5. (a) Composante V. (b) Composante H. La courbe en pointillés noir représente l'amplitude de l'onde directe pour un milieu sans cavité. Les bords de la cavité sont délimités par les pointillés rouges.

Pour s'affranchir de certains effets sur les enregistrements liés à la complexité du terrain comme le couplage entre les géophones et le sol ou l'atténuation du milieu, nous avons tracé les rapports des amplitudes de la composante horizontale sur la composante verticale pour une fréquence donnée. La Figure 6 représente les rapports H/V dans les mêmes configurations décrites pour la Figure 4. La composante H est moins forte que la composante V en l'absence d'hétérogénéité (environ 40% moins forte). En revanche, la cavité est marquée en surface par de fortes perturbations positives ou négatives par rapport au milieu de référence sans cavité. A noter que la plus forte anomalie a lieu derrière l'objet pour un offset situé entre 100 et 110mm. Cette anomalie supérieure à 1 confèrent au mouvement particulière causé par les ondes de Rayleigh une forme circulaire. Elle coïncident également avec la conversion des ondes de volume en onde de surface qui influencent le champ d'onde R direct.

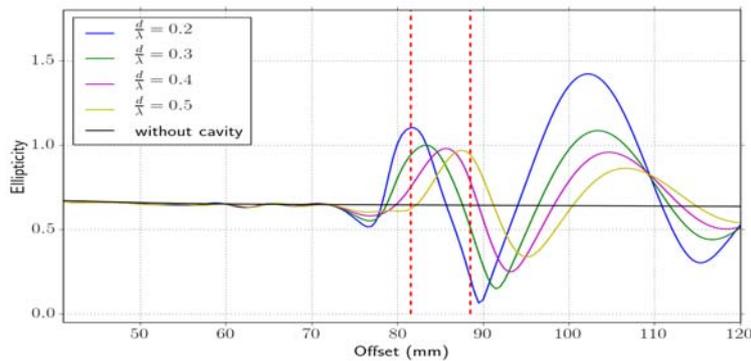


Figure 5 : Rapport H/V de l'onde directe pour différents d/λ . Le diamètre de la cavité par rapport à la longueur d'onde est fixée à 0,5. La courbe noire correspond aux rapports H/V dans un milieu homogène sans cavité. La position de la cavité en surface est délimitée par les pointillés rouge.

Le calcul des rapports H/V a été effectué sur le milieu expérimental bi-couche (Figure 6) dont les enregistrements ont été présentés plus haut Figure 1. Comme le milieu est dispersif et atténuant, l'onde directe Rayleigh ne peut pas être extraite proprement. Nous avons donc décidé de calculer les rapports H/V pour le champ total. La distance entre la source et le premier récepteur étant suffisamment grande, l'onde P a pu être fenêtrée puis extraite.

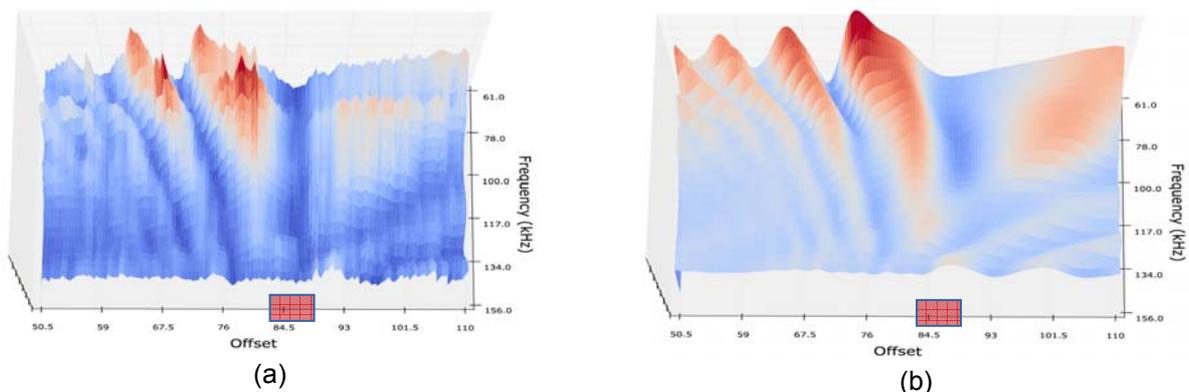


Figure 6 : Rapport H/V calculé pour un milieu bi-couche contenant une cavité de 5mm de diamètre à 6mm de profondeur. Les résultats sont présentés selon la distance par rapport à la source pour plusieurs fréquences. (a) Données expérimentales, (b) Données numériques. La projection de la cavité en surface est marquée par le rectangle.

Les perturbations devant l'objet sont dues à la présence de la diffraction arrière dans l'enregistrement. Les résultats montrent également un pic d'ellipticité suivi d'une forte décroissance au-dessus de l'objet. Cette décroissance est constante quelque soit la fréquence utilisée. Les perturbations H/V permettent donc de localiser l'objet en surface dans un milieu plus complexe.

Conclusion

La composante H est très sensible à la présence d'une cavité. Cette composante du déplacement est convertie en partie en onde de volume de part et d'autre de la cavité. Ces conversions confèrent à la diffraction une forme hyperbolique qui est beaucoup moins visible sur la composante V. L'étude de l'énergie contenue dans le champ diffracté a montré qu'à partir d'une taille donnée, la diffraction arrière est moins énergétique que la diffraction avant. Les interactions entre le champ incident et le champ diffracté sont donc à l'origine de fortes perturbations de l'onde directe en terme d'amplitude derrière l'objet. Elles engendrent donc des anomalies H/V qui permettent de détecter la cavité en surface.

Bibliographie

- Bretaudeau, F., Leparoux, D., Durand, O., Abraham, O., [2011] Small-scale modeling on onshore seismic experiment: Tool to validate numerical & seismic imaging methods. *Geophysics*, 76,101-112.
- Komatitsch, D., Tromp, J., [1999] Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophysical Journal International*, 139, 806-822.
- Shtivelman, V., [2002] Using surface waves for studying the shallow subsurface. *Bollettino di geofisica Teorica ed Applicata*. 44, 223-236.
- Valensi, R., Leparoux, D., Durand, O., Bretaudeau, F. Côte, Ph., [2015] Multicomponent reduced scale seismic modelling: upgrade of the MUSC laboratory with application to polarization observations. *Geophysical Journal International*, 202, 1993-2004.
- Xia, J., Nyquist, J. E., Xu, Y., Roth, J.S.M., Miller, R.D., [2007] Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh wave diffraction. *Journal of applied geophysics*. 62, 244-253.

Mots clés: cavité, onde de surface, onde directe, diffraction, rapport H/V, polarisation.

Utilisation de MNT pour la micro gravimétrie en zone montagneuse

Florsch Nicolas¹, Seoane Lucia², LLubes Muriel², Téreygeol Florian³, Heckes Jürgen⁴

¹ Sorbonne Université, UMI 209 UMMISCO, 75252 Paris Cedex 05

² Université Paul Sabatier, OMP-GET, UM5563, CNRS/IRD/UPS/CNES, 31400 Toulouse

³ LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay 91191 Gif-sur-Yvette,

⁴ Deutsches Bergbau Museum, Bochum, Allemagne

Abstract

Archaeological mining robs are the targets of this field study which involved both ERT and microgravimetry. A DEM has been elaborated with two scales and methods. Close to the station, it has been derived by using photogrammetry on a final 1mX1m grid. Farther, it is the Institut Géographique National data that has been used. The DEM is directly used to compute terrain corrections.

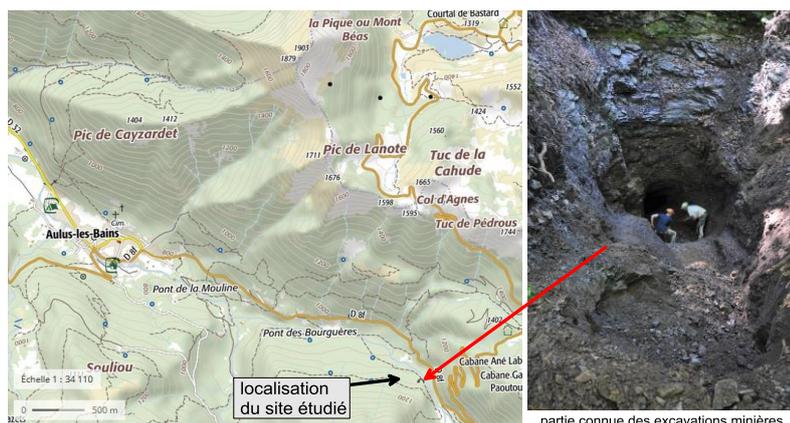
Introduction

Entre la fin du XIIIe s. et le XVe siècle, une importante activité minière visant la production d'argent, de cuivre et de plomb, s'est développée sur la commune d'Aulus-les-bains, dans les Pyrénées ariégeoises. Dans la première moitié du XIVE siècle, elle devint l'une des principales mines d'argent du royaume de France. Les dépilages de ces mines prennent place dans un gîte filonien complexe composé de 2 filons principaux parallèles longs de plus de 300 m et d'une puissance au moins métrique. La partie orientale des grands filons est largement accessible et fait l'objet d'une étude archéologique qui a montré les richesses architecturales et techniques de ces mines. Dans la partie occidentale, les plans des ingénieurs des XIX et du début XXe siècles ayant travaillé à la réouverture de cette mine ont pointé d'anciens travaux qui aujourd'hui sont encore inaccessibles par le souterrain comme par l'extérieur. L'importance des travaux de décombrement, leur coût en temps de travail et en moyens incite à vouloir confirmer, avant travaux archéologiques, la présence de vides entre la surface et une vingtaine de mètres de profondeur.

C'est dans ce contexte que la communauté archéologique travaillant sur ces vestiges a collaboré avec une équipe de géophysiciens interuniversitaire qui lui est historiquement liée par des travaux antérieurs. Les géophysiciens ont proposé deux techniques très complémentaires pour la recherche de vides : la microgravimétrie et la tomographie électrique (ERT). La direction connue du système de faille a naturellement orienté les profils selon une direction qui leur est perpendiculaire.

On relate ici les conditions de mesures et d'exploitation des données de la méthode gravimétrique, qui s'éloigne quelque peu du schéma des livres, en raison d'une topographie accidentée et du mode de calcul de l'anomalie de Bouguer particulier.

Site de Castel Minier / Aulus-les-Bains



Situation et conditions

Le site, bien-nommé « Castel-Minier », se situe à 90 km en plein sud de Toulouse, dans les Pyrénées ariégeoises, sous la route qui monte à l'étang de Lers (qui a donné son nom à la Iherzolite) depuis Aulus-les-Bains (Figure 1, à gauche).

Figure 1: localisation et vue sur les travaux orientaux

Une idée de l'exploitation ancienne est donnée sur la Figure 1, à droite : c'est là un élément de la zone orientale de la mine. Le terrain est pour le moins accidenté. Si la zone centrale du prospect, où les ingénieurs du début XXe ont situé des travaux anciens, comportent des plateformes, l'environnement présente des pentes localement supérieures à 100%, qui rendent la manutention des instruments, et en particulier du gravimètre, délicate. Pour l'occasion, un support spécial en bois, avec des pieds réglables par coulissage dans des cylindres verticaux (qui font goulottes) dotés de vis de serrage, a rendu les plus grands services. On enfonce les trois pieds à la massette, puis on ajuste l'horizontalité du plateau à la précision d'un petit niveau, on serre enfin les vis de blocage avant d'installer le gravimètre, dont le nivellement final ainsi que la stabilité sont ainsi largement facilités. La Figure 2 montre ce trépied ainsi qu'une mise en station du gravimètre.

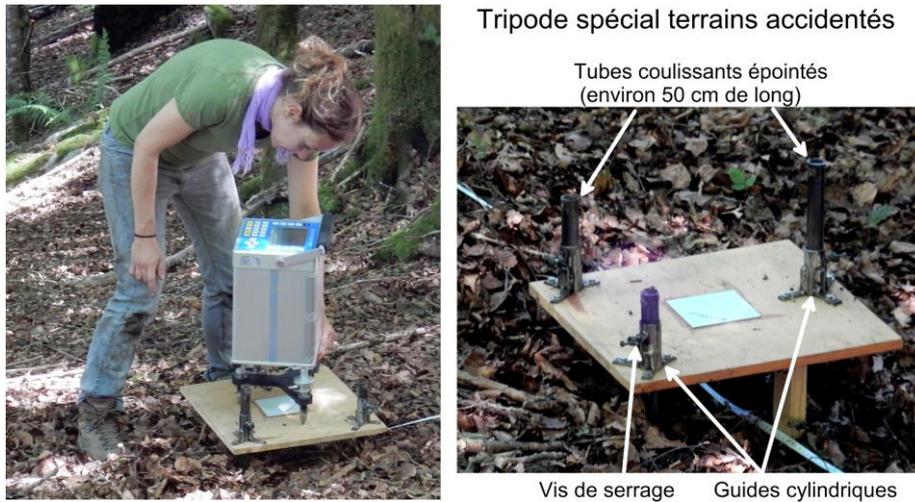


Figure 2 : tripode à pieds coulissants, facilitant la mise en station sur terrain pentu.

Le modèle Numérique de Terrain

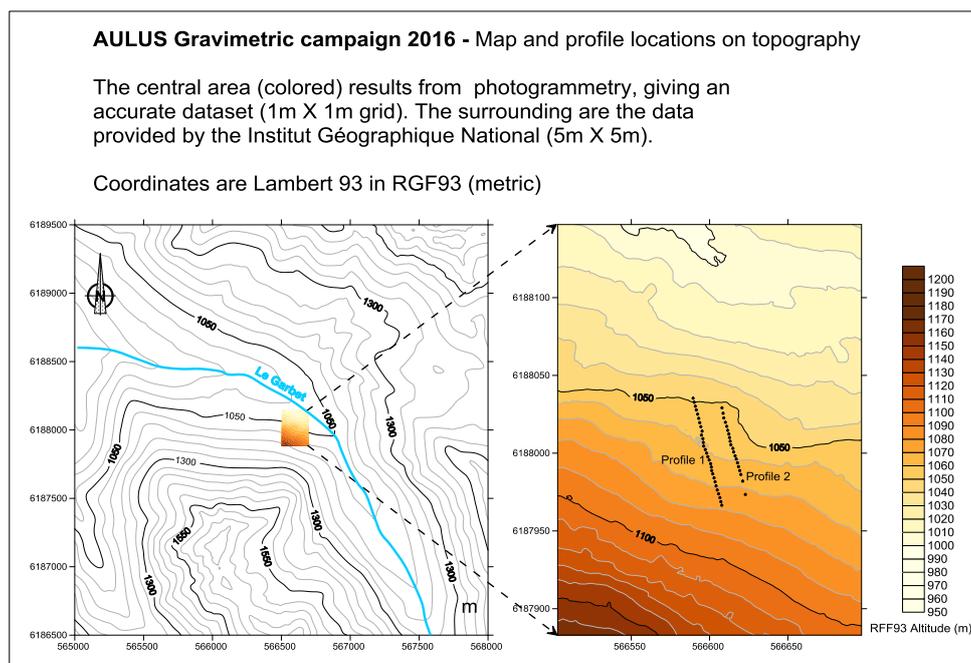


Figure 2: MNT utilisé pour les corrections gravimétriques. La zone colorée est maillée tous les m, celle non colorée, tous les 5m. Les profils gravis sont les points noirs (à droite).

A l'échelle de l'hectare (pour fixer les idées), les données brutes corrigées de la dérive instrumentale, des marées et de la latitude nécessitent, très classiquement, des corrections associées au relief selon

3 définitions : i) les effets d'altitudes (« air libre »); ii) les effets de plateau et iii) les effets de relief (ou « de terrain ») proprement dit (écarts du terrain à l'horizontalité). De plus, on retire une régionale, qu'il est difficile de définir avec rigueur à *cette échelle*. Le MNT que nous avons choisi est en deux parties, illustrées sur la Figure 3. Dans la zone centrale (200mX265m), il a été établi avec une maille interpolée de 1mX1m déduite d'une grille plus fine obtenue par photogrammétrie, calée sur le RGF93. Une deuxième grille de 5m X 5m est issue de la base de l'IGN RGE ALTI et porte sur 3kmX3km. La zone est fortement boisée, avec des petites falaises localement (miroirs de failles).

Un soin particulier est apporté à la jonction entre les deux zones. En effet, il faut qu'il n'y ait ni chevauchement, ni lacune, sinon ce serait autant de structures massives (ou vides) aberrantes pour les calculs de correction à partir du MNT.

Protocole de mesure

Il n'a rien de spécial, si ce n'est qu'au lieu d'appliquer une relecture d'1/3 des points, nous avons préféré, pour ce travail non contractuel, utiliser le temps disponible pour densifier les points sur les profils, avec un écart curviligne entre points de 2.5 m. Les altitudes des piquets sont pris au tachéo. Le retour à la base est effectué au plus toutes les 2 heures, avec un CG5 attaché au BGI de Toulouse.

Mode de calcul des corrections de terrain.

Un profil de Nettleton modifié Parasnis (en ordonnant les altitudes) livre une densité de 2.71. Elle est utilisée pour l'effet de plateau. Dans l'étape suivante, celle des corrections de relief, on pourrait utiliser les tables de Hammer. Mais sachant que l'on dispose d'un MNT « gridé », il est plus cohérent de calculer directement l'effet de parallélépipèdes correspondants au maillage.

Nous trouvons pertinent de rapporter deux éléments cognitifs lors de ces traitements, possiblement utiles à la formation des gravimétriciens. Premièrement, on pourrait penser effectuer le calcul avec des parallélépipèdes dont la base coïnciderait avec le niveau de référence, *incluant de cette manière la correction de plateau*. C'est une erreur, en raison des limites latérales du MNT qui ne sont pas à l'infini ! Cela rajouterait une composante très gênante à la régionale (gênante parce que très variable). Deuxièmement, si l'on considère l'effet de la zone externe, c'est une erreur de penser que son éloignement confère un caractère lisse aux valeurs de g (de cette zone) le long du profil. En effet, l'anomalie correspondante serait lisse si les mesures gravi étaient réalisées le long de parfaites lignes droites. Or, d'un point à un autre, il y a une variation d'altitude irrégulière, qui se répercute dans l'effet de relief, fut-il dû à une *couronne lointaine*. C'est une limite, certainement, à la précision des corrections, et nous n'avons pas quantifié jusqu'à quelle distance il faudrait prendre en compte le relief, cependant il faudrait étudier cette question en détail (ici, on se contente du carré de 3kmX3km).

La Figure 4 montre l'importance des corrections de relief.

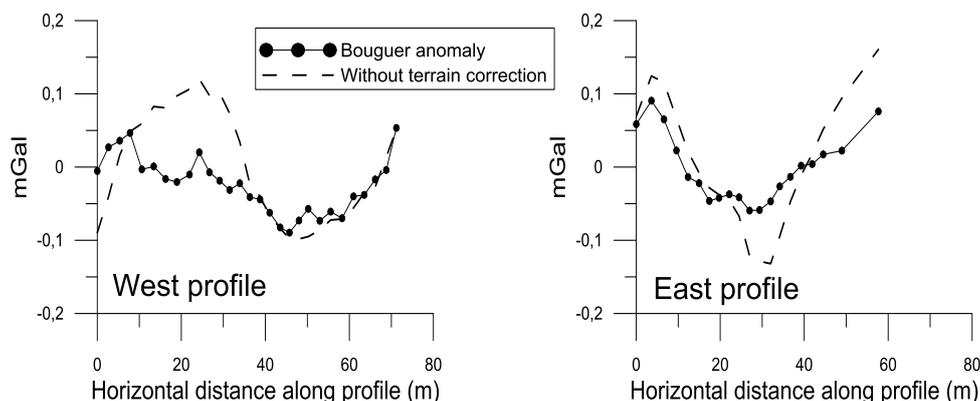


Figure 3 : anomalies de Bouguer. En pointillé, une anomalie corrigée de l'air libre et du plateau, sans la correction de relief. Cela permet d'apprécier l'importance des effets de relief pour cette campagne.

Résultats

Nous avons élaboré des modèles élémentaires à partir de cavités, avec une extension latérale de 8 mètres pour les anomalies nord et de 200 mètres pour les anomalies sud, selon des hypothèses archéologiques. Ces modèles, avec les ajustements manuels, sont représentés sur la Figure 5. La principale limite de ce travail vient de ce qu'il s'est avéré impossible d'étendre les mesures plus loin vers le nord et le sud, ce qui sacrifie ipso-facto un niveau de référence gravimétrique locale (« rejoindre » l'anomalie nulle n'a pas été possible).

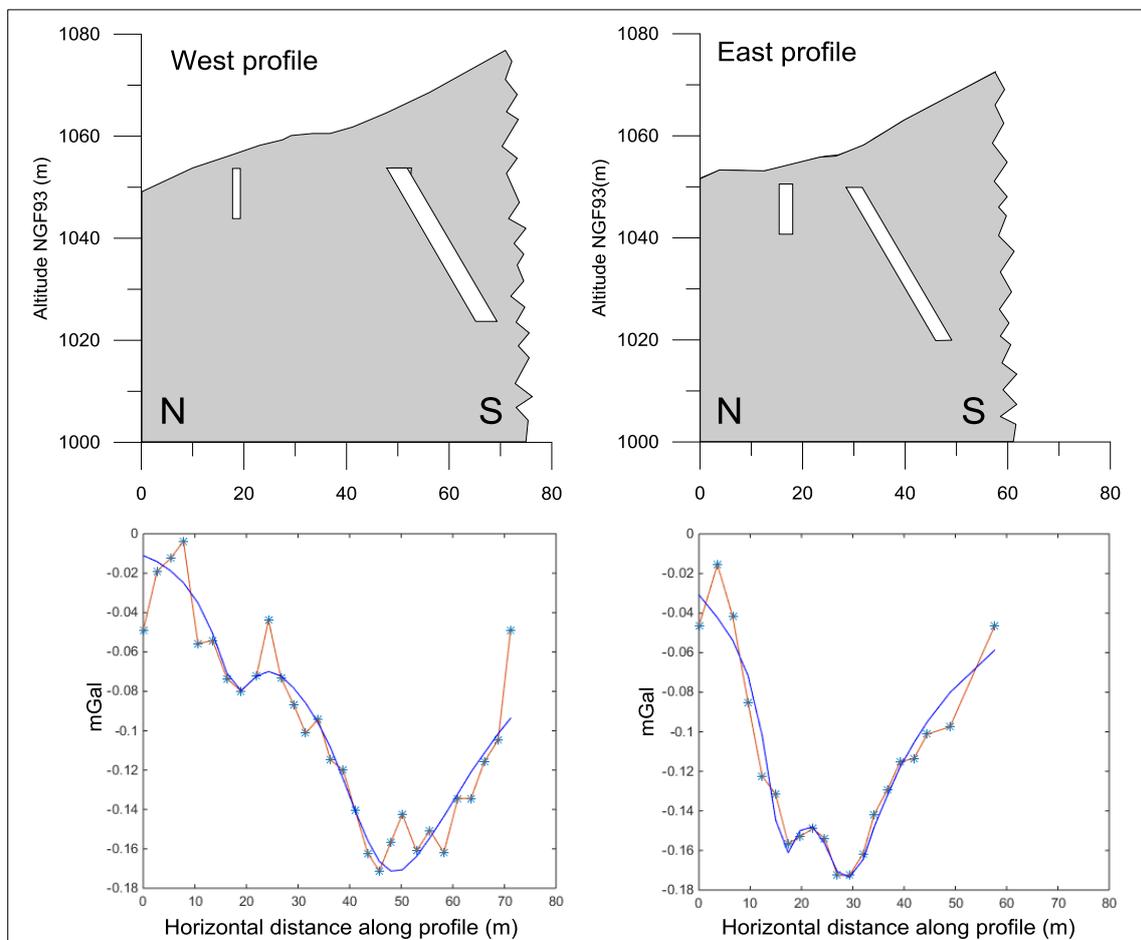


Figure 5 : modèles élaborés pour interpréter les anomalies observées. Le calcul doit être fait le long de la pente, en prenant en compte les positions effectives des points de mesure. De nombreux détails du signal ne sont pas reproduits, pouvant être un bruit de mesure, de pré-traitement ou « géologique » associé à un terrain escarpé et très hétérogène.

Conclusion

Il est facile d'utiliser les MNT modernes pour calculer les corrections gravimétriques. Toutefois cela n'enlève rien à la difficulté de la méthode qui associe délicatesse de la mesure avec prise en compte raisonnée des effets la topographie.

Bibliographie

Blakely, R.J. 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press.

Mots-clés : Gravimétrie, MNT, Montagne, corrections de terrain

Identification et caractérisation du profil d'altération en domaine de socle par imagerie électrique (ERT)

Angélie Portal¹, Pierre Belle², Francis Mathieu¹, Patrick Lachassagne² and Nicolas Brisset³

1. BRGM, Risk Division, 3 avenue Claude Guillemin, Orléans, France.

2. Water Institute by Evian, Danone Waters, Evian-Volvic World, 11, Avenue du Général Dupas - BP 87 - 74503 Evian-les-Bains Cedex, France.

3. BRGM, Direction régionale Guyane, Domaine de Suzini - Route de Montabo, 97333 Cayenne, France.

Introduction

Les formations plutoniques et métamorphiques, lorsqu'elles sont longuement exposées à la surface, développent des profils d'altération profonds, associés à des propriétés hydrauliques et de stockage intéressantes (Boutt *et al.* 2010; Courtois *et al.* 2010). Dans de tels contextes, des aquifères tendent à se développer dans les 100 premiers mètres du profil d'altération (Lachassagne *et al.* 2011, 2017). La caractérisation de la structure du profil d'altération représente un enjeu majeur pour l'évaluation et la gestion de la ressource en eau. L'imagerie géophysique, et la méthode électrique en particulier, est bien adaptée à l'étude des ressources en eau souterraine.

La présente étude est basée 1) sur des données géophysiques de terrain acquises à la fois en domaine plutonique et en contexte métamorphique et 2) sur une approche par modélisation de données synthétiques générées à partir d'un modèle conceptuel du profil d'altération.

L'objectif de ces travaux est d'identifier la signature électrique des différents horizons qui constituent le profil d'altération.

Contexte géologique

- *Sites de mesure*

Une partie des données provient d'investigations réalisées dans la région de Saint-Galmier (Loire, France). La zone de prospection se situe entre deux domaines géologiques distincts séparés par un élément tectonique majeur : une plaine sédimentaire à l'ouest et un massif cristallin à l'est. Ce dernier est majoritairement constitué de gneiss, recoupés par une intrusion de granite porphyrique calco-alcalin (Belle *et al.* 2016, 2017). Les mesures géophysiques ont été focalisées sur l'unité granitique caractérisée par un profil d'altération bien défini (Dewandel *et al.* 2017).

Les autres jeux de données ont été acquis en Guyane Française, sur deux sites différents localisés le long de la rivière Maroni. La première zone, Sparouine, située au nord-ouest, est composée de chloritoschistes à grenat et straulite (série d'Orapu) et de terrasses alluviales (série de Démérara, Belle *et al.* 2017; Choubert 1960). Le second site, Papaïchton, se trouve à l'ouest du département, et se compose de roches volcaniques schisteuses (série de Paramaca), recoupées par des dykes doléritiques (Choubert 1960). Des dépôts sablo-argileux sont également observés.

- *Structure du profil d'altération*

Le modèle conceptuel actuel d'un profil d'altération est constitué (de haut en bas) des niveaux suivants (Figure 1, Dewandel *et al.* 2006; Lachassagne *et al.* 2011, 2017; Wyns *et al.* 1999):

- la cuirasse ferrugineuse ou bauxitique (pouvant être absente sur le terrain) ;
- la saprolite, constituée de matériaux riches en argile, résulte de l'altération du socle sous-jacent. On distingue deux sous-unités : l'allotérite, horizon argileux dans lequel la structure de la roche mère n'est plus visible, qui recouvre l'isaltérite dans laquelle la structure de la roche est encore identifiable. En contexte granitique, la base des isaltérites (entre 15 et 30 m d'épaisseur) montre une structure laminée définie comme l'horizon laminé ;
- l'horizon fissuré, caractérisé par une fracturation dense dans les premiers mètres qui tend à diminuer avec la profondeur ;
- le socle sain.

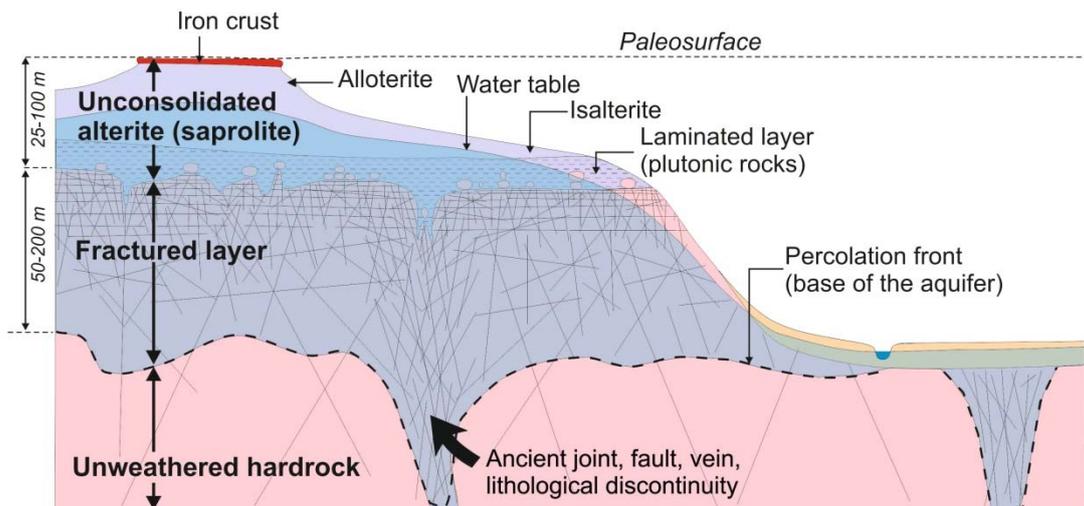


Figure 1 Modèle conceptuel d'un paléo profil d'altération partiellement érodé en domaine de socle (Lachassagne et al. 2017).

Investigations géophysiques

- Paramètres d'acquisition

Cette étude repose sur l'imagerie par tomographie des résistivités électriques (ERT - Electrical Resistivity Tomography). Les données ont été acquises grâce à un résistivimètre SYSCAL-PRO (IRIS Instruments) connecté à 96 électrodes métalliques. Les espacements inter-électrode sont de 10 m sur le site de Saint-Galmier (~250 m de profondeur d'investigation Mathieu et Maurice 2016) et 5 m sur les sites de Guyane française (Mathieu et Baïssset 2015). Les protocoles pôle-dipôle et Wenner-Schlumberger ont été choisis pour les acquisitions, le premier pour son fort rapport signal/bruit et le second pour atteindre une profondeur d'investigation optimale.

Les données brutes ont été filtrées avec le logiciel ProSYS (Iris Instrument), analysées avec le logiciel X2IPI (Robain et Bobachev 2002), et inversées grâce à RES2DINV (Loke et Barker 1996). L'interprétation des modèles de distribution des résistivités électriques est basée sur des données géologiques issues de log de forage et d'observations terrain.

- Résultats

Deux exemples de modèles de distribution des résistivités électriques sont présentés, l'un en domaine granitique (Figure 2) et l'autre en domaine métamorphique (Figure 3).

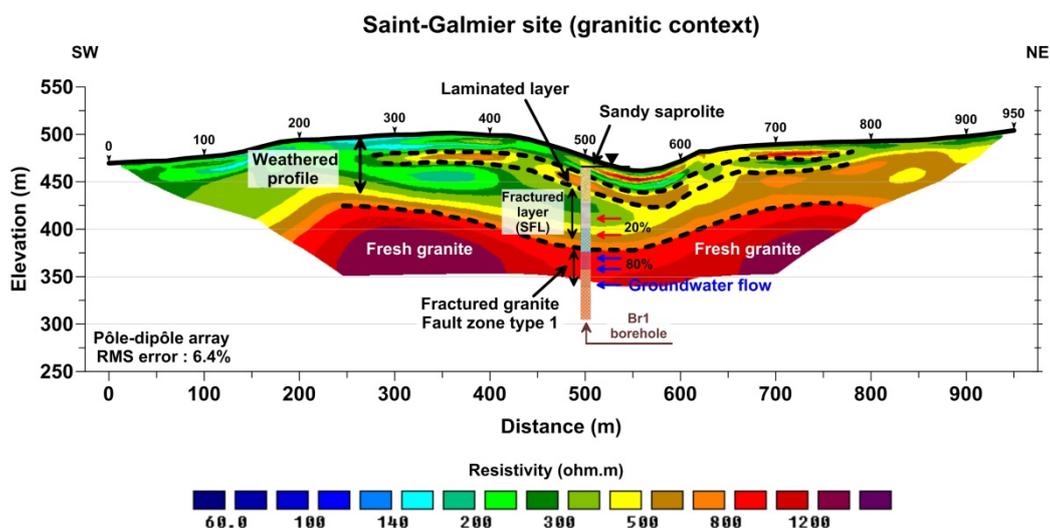


Figure 2 Exemple d'un modèle de distribution des résistivités électriques obtenu en domaine granitique – Site de Saint-Galmier (Loire, France)

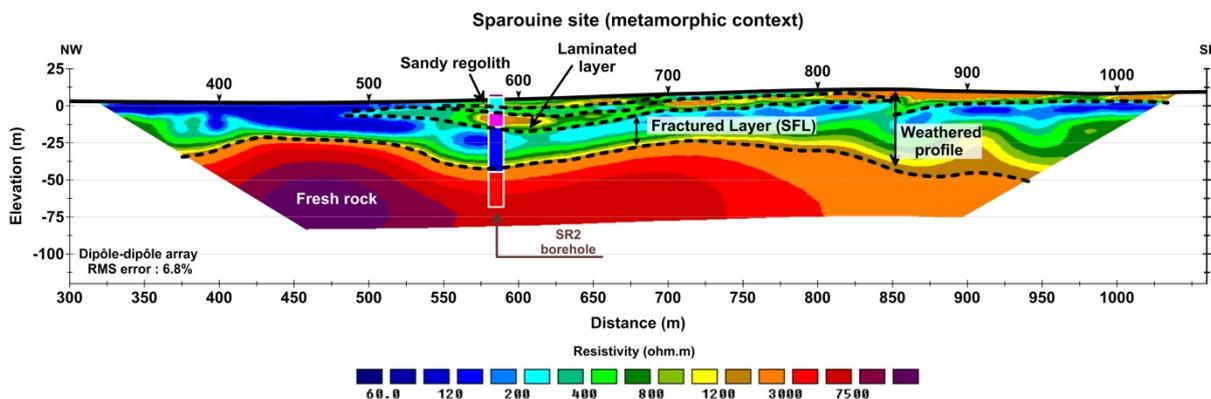


Figure 3 Exemple d'un modèle de distribution des résistivités électriques obtenu en domaine métamorphique – Site de Sparouine en Guyane française

Les modèles montrent (*Belle et al. 2017*) :

- un substratum résistant interprété comme le socle sain non-altéré ;
- une signature complexe du profil d'altération lui-même avec i) un horizon géoélectrique conducteur associé à la saprolite, ii) un niveau résistant interprété ici comme l'horizon laminé et iii) un horizon conducteur correspondant à l'horizon fissuré.

La base du profil d'altération (correspondant à la base de l'horizon fissuré) est caractérisée par un gradient des résistivités électriques ; il n'y a pas de limite nette entre l'horizon fissuré et le socle sain sous-jacent.

Modélisations synthétiques

En complément des mesures de terrain, des modélisations numériques, basées sur des données synthétiques, ont été réalisées. L'objectif est de tester la sensibilité de la méthode électrique ERT à identifier les différents niveaux qui constituent le profil d'altération, et plus particulièrement l'horizon laminé mis en évidence dans la première phase de cette étude. Une série de jeux de données a ainsi été calculée sur la base d'un modèle géoélectrique théorique du profil d'altération. Deux paramètres ont été testés (sur la base des résultats précédents) : la résistivité (entre 250 et 1000 ohm.m) et l'épaisseur (entre 2.5 et 15 m) de l'horizon laminé. Les données synthétiques ont été générées pour un profil de 96 électrodes espacées de 5 m en configuration dipôle-dipôle.

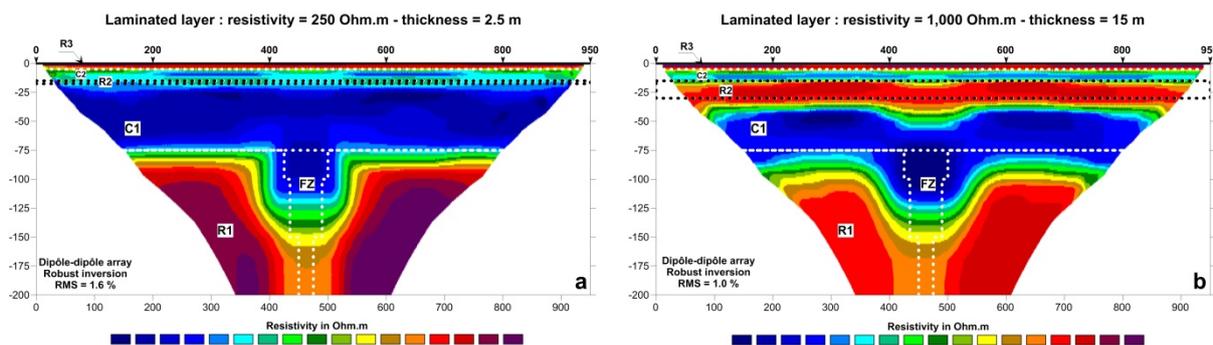


Figure 4 Deux exemples d'inversion des données synthétiques. a : épaisseur de 2.5 m et résistivité de l'horizon laminé de 250 ohm.m. b : épaisseur de 15 m et résistivité de l'horizon laminé de 1000 ohm.m.

Les premiers résultats d'inversion des données synthétiques (**Figure 4**) montrent que l'intercalation d'un horizon résistant (associé à l'horizon laminé) dans le profil d'altération augmente significativement l'épaisseur de la zone de gradient de résistivités électriques à la base de l'horizon fissuré d'une part, et réduit la résistivité apparente du socle sain situé sous le profil d'altération (*Belle et al. 2017*).

Conclusion

Cette étude par imagerie géophysique du profil d'altération en domaine de socle (granitique et métamorphique) a permis de mettre en évidence, de manière détaillée, la signature électrique des différents niveaux qui le constituent. La méthode ERT a également permis d'observer pour la première fois la présence d'un horizon géoélectrique résistant à l'intérieur du profil d'altération, interprété comme l'horizon laminé. L'horizon fissuré est caractérisé par de faibles valeurs de résistivité électrique. L'hypothèse avancée pour expliquer ce résultat est une obturation des fractures de l'horizon fissuré par des matériaux argileux provenant de la saprolite sus-jacente.

La capacité de l'ERT à mettre en évidence l'horizon laminé résistant représente un enjeu important pour l'évaluation de l'épaisseur de la saprolite et le positionnement du toit de l'horizon fissuré, maximisant ainsi le taux de réussite de l'implantation de forages productifs.

Références

- Belle, P., Lachassagne, P., Mathieu, F., Barbet, C., et Bonneval, F. [2016]. Nouvelles avancées dans l'interprétation géologique et hydrogéologique des profils de tomographie électrique en contexte de socle granitique et métamorphique. *Géologues*, **191**, 13-17.
- Belle, P., Lachassagne, P., Mathieu, F., Barbet, C., et Brisset, N. [2017]. Characterization and location of the laminated layer within hard rock weathering profiles from electrical resistivity tomography. Application for water well siting. *Geological Society, London, Special Publications*.
- Boutt, D. F., Diggins, P., et Mabee, S. [2010]. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeology Journal*, **18**(8), 1839-1854. DOI: 10.1007/s10040-010-0640-y
- Choubert, B. [1960]. Carte géologique de la Guyane française à l'échelle du 1/500 000 en couleurs (2 feuilles: Nord et Sud). *Serv. Carte Géol. France, Départ. Guyane*.
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougairé, F. D., Somé, S., et Tapsoba, A. [2010]. Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Ground Water*, **48**(2), 269-283. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2009.00620.x
- Dewandel, B., Alazard, M., Lachassagne, P., Bailly-Comte, V., Couëffé, R., Grataloup, S., ... Wyns, R. [2017]. Respective roles of the weathering profile and the tectonic fractures in the structure and functioning of crystalline thermo-mineral carbo-gaseous aquifers. *Journal of Hydrology*, **547**, 690-707. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.028
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J. C., et Krishnamurthy, N. S. [2006]. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, **330**(1), 260-284. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.026
- Lachassagne, P., Dewandel, B., et Wyns, R. [2017]. Hydrogeology of weathered crystalline/hard rock aquifers. Operational applications for their survey and management. *Geological Society, London, Special Publications*.
- Lachassagne, P., Wyns, R., et Dewandel, B. [2011]. The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, **23**(3), 145-161. DOI: 10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x
- Loke, M. H., et Barker, R. D. [1996]. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**(1), 131-152. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x
- Mathieu, F. et Baïssset, M. [2015] – *Prospection géophysique par la méthode du panneau électrique sur les sites de Sparouine et de l'île Bastien - commune de Saint Laurent du Maroni - Guyane*. Rapport final. BRGM/RP-64467-FR
- Mathieu, F., et Maurice, B. [2016]. *Investigation géophysiques par tomographie de résistivité électrique sur le gisement de Badoit, Saint-Galmier - Campagne 2015-2016*. Rapport final. BRGM/RP-65614-FR
- Robain, H., et Bobachev, A. [2002]. X2IPI : user manual, (1), 25.
- Wyns, R., Baïssset, M., et Parizot, M. [2012]. *Détermination de secteurs favorables pour la recherche en eau souterraine sur la commune de Roura - Guyane*.
- Wyns, R., Gourry, J. C., Baltassat, J. M., et Lebert, F. [1999]. Caractérisation multiparamètres des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré. In BRGM, IRD, UPMC (Eds) (Éd.), *2ème Colloque GEOFCAN, Orléans, France* (p. 105-110).

Mots-clés : hydrogéologie, profil d'altération, ERT, granitique, métamorphique, modèle synthétique

Vers une utilisation de la méthode de Résonance Magnétique Protonique en milieu péri-urbain

Clara Jodry¹, Jean-François Girard¹, Sébastien Penz²

cjodry@unistra.fr, jf.girard@unistra.fr, s.penz@brgm.fr

¹Université de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, ²BRGM

Abstract

The use of the MRS method have been broaden these past ten years. It is in great part due to the different breakthrough in field measurements and signal processing techniques. We give here an overview of common procedures used to improve the signal-to-noise ratio. We also summarize some on-going work using new loop configuration that help further the reduction of ambient noise.

Introduction

L'utilisation de la Résonance Magnétique Protonique (RMP) comme méthode géophysique pour l'exploration hydrogéologique a augmenté au cours des dernières années (Behroozmand et al., 2014). En effet, c'est la seule méthode directement sensible à la quantité d'eau liquide dans le sol. Les applications se sont ainsi multipliées en 1D (e.g. Legchenko et al., 2008 ; Parsekian et al., 2013 ; Vouillamoz et al., 2015) mais aussi en 2D et 3D (e.g. Girard et al., 2007 ; Jiang et al., 2015).

Cependant, le bruit électromagnétique ambiant contamine les mesures RMP ce qui induit un faible rapport signal sur bruit. Les recherches de ces dernières années ont fourni un grand nombre de technique de traitement du signal visant à réduire le bruit dans les mesures (Behroozmand et al., 2014). Ces procédures sont communes à l'ensemble des utilisateurs et il existe aujourd'hui des applications partagées (notamment sous Matlab ©) qui permettent d'analyser, filtrer et visualiser les données brutes de signal RMP (Girard et al., 2015 ; Müller-petke et al., 2016). Dernièrement, Behroozmand et al. (2016) se sont intéressés à un mode opératoire original, utilisant deux boucles séparées comprenant une petite boucle de réception placée au centre d'une grande boucle d'émission contrairement à l'application conventionnelle utilisant une boucle commune à l'émission et à la réception.

Ce papier synthétise les dernières avancées de la recherche concernant l'amélioration du rapport signal sur bruit. On présente tout d'abord une rapide description de la méthode RMP. On reprend ensuite les différentes procédures de traitement du signal qui contribuent à améliorer le rapport signal sur bruit. On revisite les résultats de Behroozmand (2016) et discute les avantages et désavantages de ce dispositif en termes d'amélioration du rapport signal sur bruit.

La méthode RMP

Le phénomène de RMP est basé sur l'interaction entre un champ magnétique induit et les protons d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau, ce qui permet d'avoir un signal uniquement lié à la réponse de l'eau dans le sol (Legchenko, 2013). La méthode consiste à déployer une boucle d'émission dans laquelle on va produire des impulsions de courant alternatif à la fréquence de précession des protons (dite fréquence de Larmor). Ceci génère un champ électromagnétique qui déstabilise les moments magnétiques des protons. Après l'arrêt de l'impulsion électromagnétique, on enregistre la tension aux bornes de la même boucle (ou une autre) engendrée par le champ magnétique émis durant le retour à l'équilibre des moments magnétiques des protons.

On note que, de façon générale, on a une boucle commune à l'émission et à la réception. Cependant, les deux boucles peuvent être séparées tout en restant assez proches l'une de l'autre pour que le volume investigué soit le même (Hertrich et al., 2005). Les applications 2D et 3D s'intéressent à ces aspects pour améliorer le rendement des mesures (e.g. Jiang et al., 2015).

L'amplitude de la réponse enregistrée dépend de la quantité de l'eau dans le sol et son temps de décroissance (durée du signal) résulte de la distribution de la taille des pores dans le sol contenant l'eau (Legchenko, 2013). On obtient alors une information quantitative de la distribution spatiale de la teneur eau par un processus d'inversion basé sur un kernel, ou matrice de sensibilité, qui relie, l'amplitude du signal enregistré, la méthode d'acquisition (taille et forme de la boucle, intensité de l'impulsion, champ géomagnétique) et l'eau dans le sol (Legchenko, 2013).

Une limite majeure de cette méthode est le faible rapport signal sur bruit (Behroozmand et al., 2014). En effet, la réponse du signal RMP est de faible amplitude, de quelques nV à quelques centaines de nV en fonction du type d'aquifère investigué. Cependant, cela reste très faible devant l'amplitude du bruit électromagnétique anthropique (dont lignes et clôtures électriques) ou naturel (activité

magnétique, atmosphérique...). Il est donc d'une primordial de développer des protocoles de mesure et de filtrage numérique pour réduire l'influence de ce bruit dans le signal enregistré.

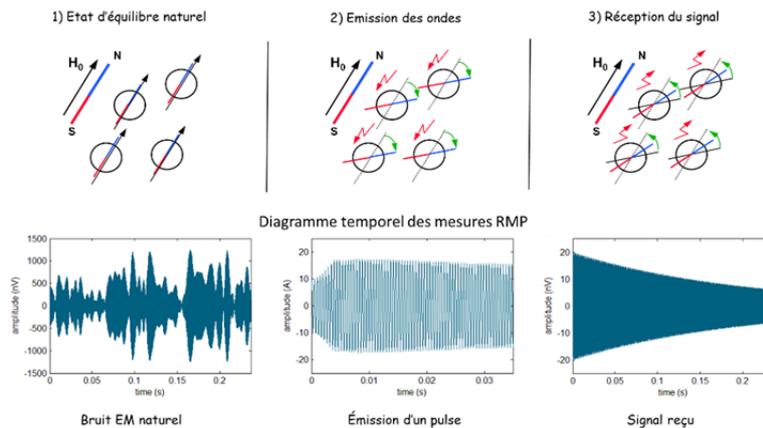


Figure 1. Différentes phases de la mesure de Résonance Magnétique Protonique

Traitement du signal RMP

Sachant que le signal RMP est affecté par le bruit électromagnétique ambiant, on donne ici une liste des procédures et filtres de réduction de ce bruit tel qu'utilisés dans la littérature. On note que l'ordre d'application dépend entièrement de l'opérateur et du milieu étudié et peut ne pas suivre la présentation ci-dessous (Behroozmand et al., 2014).

Les bruits facilement détectables proviennent des décharges électriques courtes communément appelés pics ou spikes. On introduit alors un seuil de rejet basé l'augmentation soudaine de l'amplitude du signal dans une courte fenêtre de temps (Costabel and Müller-Petke, 2014) et les données rejetées sont substituées par des zéros, par la valeur moyenne du signal ou par une valeur centrée réduite. Le plus souvent la bande passante est réduite autour de la fréquence de Larmor et la composante continue est imposée égale à zéro. On cherche ensuite à filtrer les harmoniques du 50 Hz (lignes électriques) dans cette bande passante. Dans ce cas, plusieurs techniques peuvent être appliquées, on en présente trois ici : le filtre Notch, la soustraction de sinusoïde et le filtrage multicanaux. Le filtre Notch peut être appliqué sur chaque harmoniques, sans déformation du signal, du moment que la différence entre l'harmonique du 50Hz et la fréquence de Larmor est supérieur à 4 Hz. En dessous de cette limite, l'application de ce filtre détruit une partie du signal RMP (Legchenko, 2007). Le principe du filtrage des harmoniques par soustraction de sinusoïdes tient dans le fait que les harmoniques se manifestent à des fréquences bien distinctes pf_0 avec p un nombre entier positif et f_0 la fréquence fondamentale. Elles peuvent alors être supprimées en soustrayant leurs sinus à la fréquence, phase et amplitude appropriées (Larsen et al., 2014). On remarque que l'efficacité de cette méthode dépend de la distribution entre les différentes sources de bruit sur le site d'étude. Si on y ajoute l'instabilité de la fréquence fondamentale, l'estimation de celle-ci peut s'avérer difficile et une erreur de 0.01 Hz en 50 Hz peut entrainer un décalage important des harmoniques (quelques Hz) ce qui rend alors la soustraction de sinusoïde inefficace. Une autre méthode de filtrage consiste à utiliser un ou plusieurs enregistrements synchrones de bruit obtenus à l'aide de boucles de référence placées à distance de la boucle de réception (Walsh, 2008). La comparaison et corrélation des deux signaux (signal RMP + Bruit et Bruit seul) permet de faire ressortir le signal RMP et d'atténuer le bruit cohérent.

La dernière procédure de réduction du bruit passe par la répétition des mesures (stacking). Le principe repose sur l'absence de corrélation du bruit dans le temps, et si le bruit est « blanc », l'amplitude diminue en fonction de la racine carrée du nombre de stacks (Legchenko, 2013). C'est un processus assez lent puisqu'il faut souvent compter 100 stacks et plus, sachant qu'une séquence dure environ 6 à 8 s.

Ces techniques de filtrages ne sont pas exhaustives et de nombreuses recherches ont investigués d'autres pistes (Behroozmand et al., 2014). Il est cependant important de rappeler que la variabilité du bruit dans le temps et l'espace réduit l'efficacité de chacune de ces méthodes d'atténuation du bruit. Notamment ce qui concerne la qualité et la corrélation des boucles de références avec la boucle de réception dans le cadre du filtrage multicanaux. C'est pourquoi il est important d'optimiser le déploiement des boucles (émission, réception et référence) sur le terrain.

Loop configuration

Communément, l'investigation 1D par méthode RMP comprend une boucle commune à l'émission et à la réception (boucle coïncidente). Dans ces cas-là, deux configurations de boucle sont utilisées : la boucle carrée (square) et la boucle en huit (8-square). La boucle carrée est la plus facile à mettre en place et permet d'obtenir une profondeur d'investigation assez élevée (Legchenko, 2013). La boucle en huit permet quant à elle une diminution notable du bruit (Trushkin et al., 1994) mais réduit la profondeur d'investigation avec une taille, en général, moitié moins grande. Il serait donc intéressant de diminuer les effets du bruit ambiant tout en gardant une profondeur d'investigation optimisée. Behroozmand et al. (2016) ont introduit une géométrie utilisant deux boucles séparées : une grande boucle d'émission carrée avec, placé au centre, une deuxième boucle carrée de plus petite taille pour la réception du signal RMP. Ils montrent alors les avantages de cette configuration concentrique (Central loop – CL) par apport à la configuration classique d'une boucle coïncidente (Coincidental loop – COIN). Leur idée étant de garder la profondeur d'investigation que permet une grande boucle d'émission et d'utiliser une petite boucle de réception dans laquelle le niveau du bruit sera plus faible.

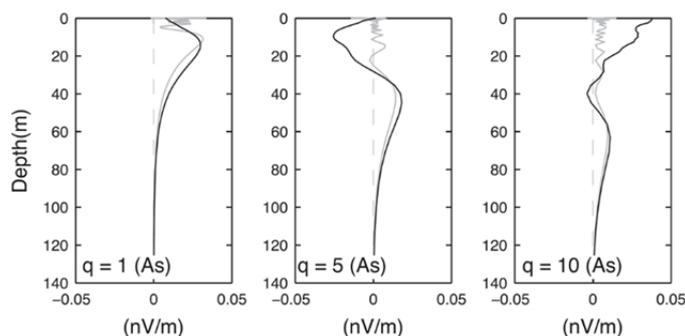


Figure 2. Simulations numérique des Kernels 1D (valeurs normalisées) pour COIN (gris clair) et CL (noir) pour un milieu homogène (100 Ω.m) et trois valeurs de pulses (q). (Behroozmand et al., 2016)

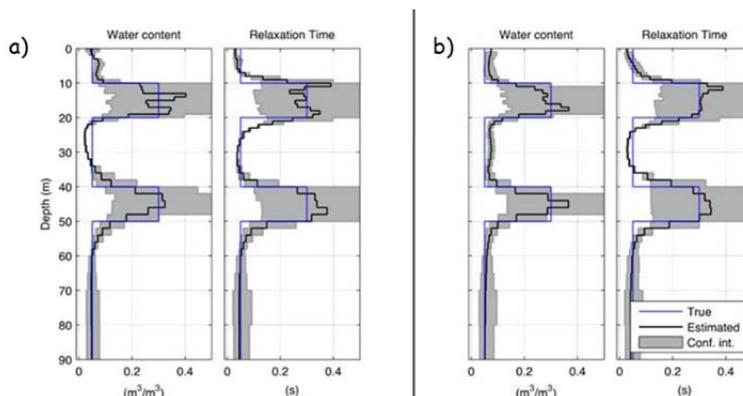


Figure 3. Inversions des données synthétiques (traits bleu et noir respectivement modèles vrai et estimé) en termes de teneur en eau et de temps de décroissance pour a) COIN et b) CL. Les parties grisées indiquent un intervalle de confiance de 68%. (Behroozmand et al., 2016)

Ils basent tout d'abord leurs résultats sur le calcul du kernel 1D qui ici représente la réponse élémentaire d'une couche d'eau à une profondeur et d'une épaisseur données (figure 2). Ils montrent que les kernels de la configuration CL recoupent ceux de la configuration COIN, avec une amplitude légèrement plus forte. L'utilisation de deux boucles séparées concentriques est également très sensible aux couches peu profondes qui ne présentent pas d'oscillations destructives quelques soit le pulse observé contrairement à la boucle coïncidente. Cela indique également qu'une estimation de la profondeur d'une couche d'eau avant inversion des signaux n'est plus possible. Ils s'intéressent ensuite à la résolution des paramètres hydrogéologiques obtenus après inversion en s'appuyant sur des modèles synthétiques (figure 3). Dans les deux cas, ils obtiennent des résultats similaires.

Conclusion

L'application de la méthode de RMP s'est multiplié dans le cadre de recherches hydrogéophysique. Un frein majeur à son utilisation reste le faible rapport signal sur bruit même si, dans de nombreux contextes, les procédures de filtrages améliorent grandement son rendement. L'utilisation d'une boucle coïncidente en 8-square optimise également le filtrage du bruit lors de l'acquisition. Cependant,

cette configuration limite la profondeur d'investigation et donc les applications possibles, notamment lors de la caractérisation des aquifères profonds. L'utilisation de la configuration « Central Loop » peut partiellement palier à ce désavantage, une petite boucle de réception étant moins sujette au bruit ambiant sans perdre en termes de sensibilité et résolution de la méthode. On note cependant que le rapport signal sur bruit n'est pas modifié. Afin de conclure quant à l'efficacité des boucles concentriques, nous effectuons des tests de terrain pour chaque configuration, dans des conditions de bruit impraticables avec les configurations standards. On notera que le gain éventuel de ce changement de mode opératoire s'ajoute aux performances de filtrage pour ainsi augmenter le rapport signal sur bruit.

Remerciements

Les auteurs voudraient remercier le programme Idex de l'Unistra qui finance le post doctorat du premier auteur (contrat n° W16RPD19), qui focalise sur l'amélioration de l'application de la méthode RMP.

Références Bibliographiques

- Behroozmand, A. A., Auken, E., Fiandaca, G. and Rejkaer, S. (2016). Increasing the resolution and the signal-to-noise ratio of magnetic resonance sounding data using a central loop configuration. *Geophysical Journal International*, 205, 243–256. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw004>
- Behroozmand, A. A., Keating, K. and Auken, E. (2015). A Review of the Principles and Applications of the NMR Technique for Near-Surface Characterization. *Surveys in Geophysics*, 36, 27–85. <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9304-0>
- Costabel, S. and Müller-Petke, M. (2014). Despiking of magnetic resonance signals in time and wavelet domains. *Near Surface Geophysics*, 12, 185–197. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013027>
- Hertrich, M., Braun, M. and Yaramanci, U. (2005). Magnetic resonance soundings with separated transmitter and receiver loops. *Near Surface Geophysics*, 141–154.
- Girard, J., Boucher, M., Legchenko, A. and Baltassat, J. (2007). 2D magnetic resonance tomography applied to karstic conduit imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 63, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.08.001>
- Girard, J., Penz, S., Texier, A., Baltassat, J.-M., & Legchenko, A. (2015). Noise removal in MRS applications : field cases and filtering strategies. In *MRS workshop 2015 / 6th International workshop on Magnetic Resonance*, Jun 2015, Aarhus, Denmark. SEG, Special Issue of "Geophysics".
- Jiang, C., Müller-Petke, M., Lin, J. and Yaramanci, U. (2015). Imaging shallow three-dimensional water-bearing structures using magnetic resonance tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 116, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.02.008>
- Larsen, J. J., Dalgaard, E. and Auken, E. (2014). Noise cancelling of MRS signals combining model-based removal of powerline harmonics and multichannel Wiener filtering. *Geophysical Journal International*, 196(2), 828–836. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt422>
- Legchenko, A. (2007). MRS measurements and inversion in presence of EM noise. *Boletín Geológico y Minero*, 118(3), 489–508.
- Legtchenko, A. (2013). Magnetic Resonance Imaging for groundwater. *ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.*, 155p.
- Legchenko, A., Baltassat, J. M., Beauce, A. and Bernard, J. (2002). Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Journal of Applied Geophysics*, 50(1–2), 21–46. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00128-3](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00128-3)
- Legchenko, A., Ezersky, M., Camerlynck, C., Chalikhakis, K., & Girard, J. (2008). Locating water-filled karst caverns and estimating their volume using magnetic resonance soundings. *Geophysics*, 73(5), G51–G61.
- Müller-petke, M., Braun, M., Hertrich, M., Costabel, S. and Walbrecker, J. (2016). MRSmatlab - A software tool for processing, modeling, and inversion of magnetic resonance sounding data. *Geophysics*, 81(4), WB9-WB21. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0461.1>
- Parsekian, A. D., Grosse, G., Walbrecker, J. O., Müller-Petke, M., Keating, K., Liu, L., Jones, B. M. and Knight, R. (2013). Detecting unfrozen sediments below thermokarst lakes with surface nuclear magnetic resonance. *Geophysical Research Letters*, 40(3), 535–540. <https://doi.org/10.1002/grl.50137>
- Trushkin, D. V., Shushakov, O. A. and Legchenko, A. (1994). The potential of a noise-reducing surface NMR groundwater surveys in the earth's magnetic field. *Geophysical Prospecting*, 42, 855–862.

- Vouillamoz, J. M., Lawson, F. M. A., Yalo, N., & Descloitres, M. (2015). Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. *Journal of Hydrology*, 520, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.024>
- Walsh, D. O. (2008). Multi-channel surface NMR instrumentation and software for 1D/2D groundwater investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 66, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.03.006>

Mots Clés : Résonance Magnétique Protonique, Rapport signal sur bruit, filtrage, Boucle concentrique.



Apport des sondages RMP à une meilleure caractérisation d'un aquifère libre en milieu semi-aride (Yousseoufia, Maroc).

**FatimZahra Ihbach¹, Azzouz Kchikach¹, Mohammed Jaffal¹, Konstantinos Chalikakis²,
Roger Guerin³, Es-said Jourani⁴**

(1) Laboratoire L3G, Equipe de recherche « Génie Civil et Géo-Ingénierie », Université Cadi Ayyad, ihbachfatimzahra@gmail.com; a.kchikach@uca.ma; m.jaffal@uca.ma

(2) UMR EMMAH, Université d'Avignon, France, konstantinos.chalikakis@univ-avignon.fr

(3) UMR 7619 METIS. Université Pierre et Marie Curie. Paris. roger.guerin@upmc.fr

(4) Groupe OCP, e.jourani@ocpgroup.ma

Abstract

In the mining district of Yousseoufia (Morocco), an unconfined aquifer situated in the phosphate series is the main resource of drinking and industrial water. An experimental study using MRS soundings has performed in order to better constrain the aquifer parameters. This communication concerns the discussion of the obtained results.

Introduction

Dans les régions arides et semi-arides, les ressources hydriques se limitent souvent aux nappes d'eau souterraines. La reconnaissance de ces dernières par des forages est souvent difficile et coûteuse. De plus, il ne suffit pas de détecter la présence d'eau dans le sous-sol mais de fournir aussi une estimation de sa quantité pour justifier l'implantation fiable de forages d'exploitation et/ou la mise en place de projets industriels et d'agriculture basés sur l'exploitation de cette ressource. La méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP) est un outil qui permet de rationaliser les travaux de prospection et de caractérisation des nappes d'eau souterraines et d'estimer leur potentiel hydrique.

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique, possèdent des moments magnétiques non nul qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal. L'excitation de ces protons par l'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique, dite fréquence de Larmor, modifie cet état d'équilibre et provoque une précession des moments magnétiques autour de la direction du champ magnétique initial. Après coupure du champ exciteur, au cours du retour à l'état d'équilibre, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons, constituant ainsi le signal RMP mesuré. Celui-ci, souvent faible, correspond à une différence de potentiel mesurable, de l'ordre de quelques nanovolts. Son amplitude est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et renseigne donc sur la teneur en eau du sous-sol. L'importance des phénomènes de précession à l'excitation et de relaxation à la coupure du champ perturbateur est aussi fonction de la taille moyenne des pores de la formation aquifère (Nielsen et al., 2011). Ainsi l'amplitude du signal RMP mesurée en fonction de l'intensité du champ transmis nous renseigne sur la teneur en eau dans le sous-sol et sur la profondeur et l'épaisseur de la nappe ; le temps de relaxation (temps de décroissance du signal mesuré), extrait à partir des graphes des sondages RMP, nous renseignent sur la taille moyenne de pores dans la nappe. Il est d'autant plus long que les protons sollicités sont ceux d'une eau peu enserrée dans la roche, donc d'une nappe à potentiel hydrodynamique élevé garantissant un débit suffisant au pompage.

Contrairement aux autres méthodes géophysiques de prospection (méthodes électriques, électromagnétiques, sismiques...), pour lesquels les paramètres mesurés ne concernent pas directement l'eau souterraine mais l'ensemble du milieu poreux, le signal étudié en RMP provient directement et uniquement des molécules d'eau (Chalikakis et al. 2009 ; Legchenko et al. 2004). En effet, la fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que cette méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le sous-sol sont ceux des molécules d'eau (si le milieu n'est pas très riche en matière organique). Ceci implique que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

Dans le centre minier de Youssoufia, le besoin en eau se pose avec plus d'acuité en raison de la succession de plusieurs années de sécheresse. Les autorités locales et le groupe Office Chérifien des Phosphates (OCP) portent un intérêt particulier à l'exploitation de l'eau accumulée dans les anciennes recettes souterraines du phosphate et celui des aquifères intra-série phosphatée pour alimenter les agglomérations en eau potable et les usines de production. La localisation et l'estimation de ces ressources s'avèrent donc nécessaires. Pour ce faire, une étude expérimentale par sondage RMP a été menée dans le gisement phosphaté de Bouchane. L'objectif est de tester la fiabilité de cette méthode par comparaison de ses résultats à ceux issus des données hydrogéologiques basés sur les puits de reconnaissance réalisés par l'OCP et les observations faites au niveau des tranchées d'exploitation.

L'inversion des données RMP acquises donne une coupe hydrogéologique similaire à celle obtenue par les puits de reconnaissance OCP et l'exploitation des données piézométriques. Les volumes d'eau libre contenue dans les aquifères intra-série phosphatée estimés par les deux méthodes sont comparables. Les résultats de l'étude sont donc satisfaisants et ouvrent les perspectives de sa généralisation dans tout le centre minier de Youssoufia et dans d'autres contextes similaires.

Matériels et méthodes

La zone d'étude fait partie du gisement phosphaté de Bouchane situé à environ 26 km à l'est de la ville de Youssoufia sur la route principal n°9 reliant Marrakech à El Jadida. Le climat est de type semi-aride, les précipitations moyennes annuelles calculées sur la période 1993-2011 sont de 199,6 mm. La température moyenne mensuelle pour la même période est de 19,9°C (Ait Khouya, 2005). Dans ce gisement, la série phosphatée s'étale du Maastrichtien au Lutétien (Boujou, 1976) sur une puissance moyenne de 40 m. De structure tabulaire, elle est constituée d'une alternance régulière de couches de phosphate meuble et/ou calcaire phosphaté et d'intercalaires stériles formés de niveaux argileux et de calcaire siliceux. D'un point de vue hydrogéologique, les puits de reconnaissance réalisés par l'OCP et les observations faites au niveau des tranchées d'exploitation du phosphate montrent deux principaux aquifères intra-série phosphatée. La nappe inférieure correspond en réalité à un système aquifère encaissé dans les niveaux de phosphate marno-sableux du Maastrichtien au Thanétien. La nappe supérieure plus importante en termes de puissance et de débit est encaissée dans la formation marnocherteuse de l'Yprésien et du Lutétien inférieur (Ait Khouya, 2005). Le substratum imperméable de la nappe supérieure est formé par une épaisse couche d'argile plastique de l'Yprésien inférieur qui marque un niveau repère pour l'exploitation dans tout le bassin phosphaté des Gantour auquel appartient le gisement de Bouchane. L'intégration de données issues de nombreuses coupes lithologiques, des piézomètres, des puits de reconnaissance et des puits locaux domestiques a permis d'établir la carte piézométrique de la nappe supérieure et d'en rehausser ses caractéristiques hydrodynamiques. Faute de disponibilité des données des essais de pompage, nous avons estimé, en se basant sur la bibliographie, une valeur moyenne de la porosité de la formation aquifère yprésienne et lutétienne à environ de 4%. L'intégration de ce paramètre avec les données spatiales relatives à la côte du toit et du mur de la nappe dans le logiciel Gestion des Données Minières (GDM) a permis d'évaluer le volume d'eau de la nappe supérieure à 22 832 548 m³. Ce volume englobe aussi la quantité d'eau libre que celle adsorbée ou emprisonnée. Ce chiffre peut être facilement critiqué vue l'approximation faite sur la valeur de la porosité et les interpolations et extrapolations effectuées par le logiciel GDM lors des calculs par blocs du volume global d'eau. C'est dans cette optique qu'a été

menée l'étude par RMP, en vu de mieux appréhender les réserves hydriques et les paramètres hydrodynamiques de la nappe.

Sur le terrain, nous avons réalisé un sondage RMP en étalant une boucle de 100*100 m centrée sur un puits de reconnaissance OCP pour confronter les résultats géophysique aux données du puits. Le matériel utilisé est de type NUMIS PRO d'IRIS Instruments disponible à la FSTM de Marrakech (Fig. 1). La variable de la mesure est le niveau d'excitation (produit de l'intensité du courant à la fréquence de résonance par la durée d'impulsion), la grandeur mesurée est le champ magnétique de relaxation créé par les protons excités qui reviennent à leur niveau d'équilibre et le paramètre physique que l'on cherche à déterminer est la teneur en eau des différentes couches du sous-sol. Nous avons tout d'abord mesuré le bruit électromagnétique ambiant pour en tenir compte lors de l'acquisition et le champ magnétique local pour calculer la fréquence de Larmor d'excitation. Compte tenu de la faiblesse de son amplitude, le signal RMP doit être accumulé lors de l'acquisition, en utilisant le logiciel PRODIVINER, pour diminuer l'influence relative du bruit électromagnétique naturel ou anthropique. La courbe d'un sondage RMP (Fig. 2) est un graphique qui représente l'amplitude initiale du champ de relaxation des protons en fonction de l'intensité d'excitation.

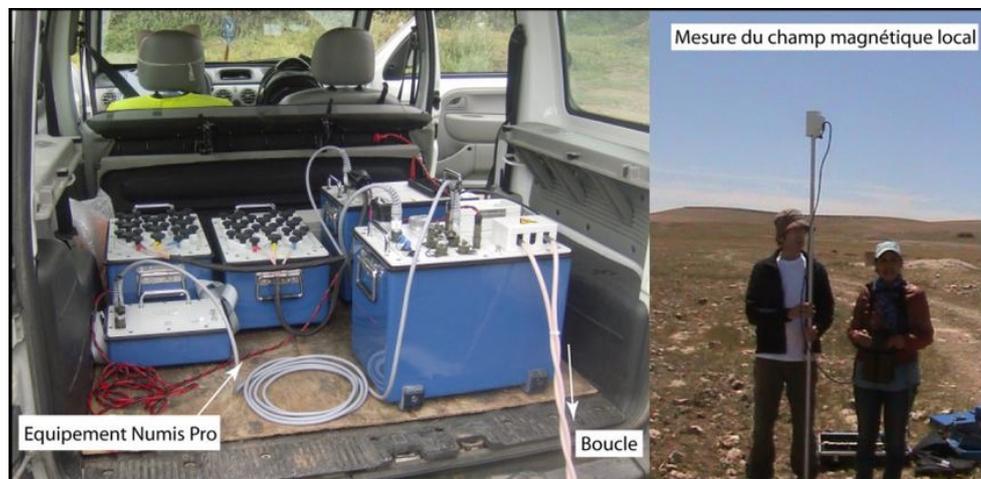


Figure 1 : Equipement utilisé

L'inversion des données est faite avec l'hypothèse d'un sol stratifié à l'échelle de la boucle, ce qui est le cas dans le secteur étudié. Cette inversion a été effectuée par le logiciel SAMOVAR et nécessite tout d'abord la préparation d'une matrice d'inversion précisant notamment les propriétés du champ géomagnétique et le modèle géo-électrique du site. Le logiciel utilisé permet de choisir entre plusieurs types d'inversion (Continuous inversion, Smooth inversion, Block inversion, etc.).

Résultats et discussions

La figure 2 montre les résultats obtenus par le sondage RMP réalisé à Bouchane. L'amplitude du signal mesuré varie en fonction de l'impulsion d'excitation et donc de la profondeur. Ceci indique la présence d'eau dans le sous-sol et que la teneur en eau varie d'un niveau à l'autre. On remarque bien que le signal RMP est nettement distingué du bruit électromagnétique heureusement très faible dans le site étudié. On peut facilement lire la profondeur des couches aquifères et la teneur en eau libre qui estime la porosité de la roche si le milieu est saturé.

Globalement, deux horizons aquifères peuvent être distingués : le premier se situe entre 20 et 30 m, le second entre 32 et 52 m. La teneur moyenne en eau est respectivement de 2.5% et 5%. Les résultats du sondage RMP réalisés sont très comparable à ceux qui ressortent des reconnaissances directes et analyse piézométrique. Les deux aquifères identifiés correspondent en effet à la nappe supérieure encaissée dans la formation marno-cherteuse de l'Yprésien et du Lutétien inférieur. La faible puissance des intercalaires argileux imperméables ne permet pas de les identifier au niveau de la signature RMP. En considérant les niveaux saturés, c'est-à-dire situé en dessous du niveau piézométrique relevé au niveau des puits de reconnaissance et des piézomètres, nous avons estimé, à partir des résultats d'inversion, une porosité moyenne de l'ordre de 3.75%. L'épaisseur moyenne

déduit du modèle calculé est d'environ 30 m. Sachant que la superficie du secteur étudié de 19 242 500 m², on en déduit un volume d'eau globale de l'ordre de 22 513 700 m³. Cette valeur est très comparable à celle ressortie par le calcul direct en utilisant les données piézométriques. De plus le niveau piézométrique relevé dans un puits situé au centre de la boucle RMP est à 21.23 m de profondeur. La figure 2 montre que ce dernier est à environ 21.23 m. Le temps de décroissance du signal RMP est relativement faible (100-150ms), l'aquifère n'est donc pas très perméable dans son ensemble.

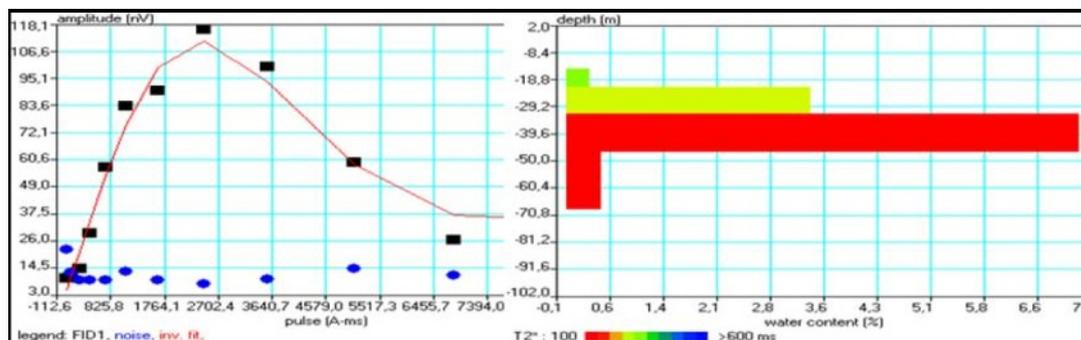


Figure 2 : Résultats du sondage RMP réalisé à Bouchane (Youssoufia, Maroc)

Conclusions

Cette étude montre clairement l'efficacité de la méthode RMP pour prospector les ressources hydriques souterraines et évaluer leur importance dans le contexte géologique du gisement de Bouchane: Le modèle hydrogéologique issu de la RMP corrobore avec les données hydrogéologiques réelles du site et les volumes d'eau calculés par l'analyse piézométrique directe et par la RMP sont très comparables.

Les conditions exceptionnelles du bruit électromagnétique très faible encourage à utiliser cet outil même si l'amplitude du signal RMP est relativement faible (aquifère peu perméable). Les perspectives de généraliser une telle étude sur l'ensemble du district minier de l'OCP sont donc bien ouvertes. Ceci constitue d'ailleurs un axe de recherche d'un projet financé en cours dans le cadre d'un partenariat OCP-UCA. Des levés RMP combinés avec ceux TDEM seront réalisés au cours des trois prochaines années dans les centres miniers de Youssoufia, Benguérir et Khouribga. Lors des futures investigations, on déterminera de la perméabilité des aquifères par une excitation à deux impulsions successives qu'on calera sur des essais de pompage.

Références

- AIT KHOUYA J. (2008). Synthèse hydrogéologique de la zone noyée de Youssoufia. Rapport géol. inédit N°455, Service géologique de Youssoufia, 45 p.
- Boujo, A. (1976). Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphate crétaé-éocène des Ganntour, Maroc occidental. PhD Thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de géologie, 227 p.
- Chalikakis K., Nielsen R., Legchenko A., Feldberg Hagensen T.F. (2009). Investigation of sedimentary aquifers in Denmark using the magnetic resonance sounding method (MRS). C. R. Geoscience 341, pp. 918-927.
- Legchenko A, Baltassat JM, Bobachev A, Martin C, Robain H, Vouillamoz JM (2004). Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. Ground Water, 42, pp. 363-373.
- Nielsen R., Hagensen T.F., Chalikakis K. and Legchenko A. (2011). Comparison of transmissivities from MRS and pumping tests in Denmark. Near Surface Geophysics, 9, 211-223.

Mots-clés : Résonance magnétique des protons, Eau souterraine, Caractérisation, Youssoufia.

Etude hydrogéophysique de l'aquifère de la craie dans la région de Beauvais (Picardie) – Campagne 2016-2017

Pascale Lutz, Constance Mathé, Yaëll Conchis

UniLaSalle Beauvais – 19, rue Pierre Waguet – 60000 Beauvais – France

constance.mathe@etu.unilasalle.fr - yaell.conchis@etu.unilasalle.fr - pascale.lutz@unilasalle.fr

Le contexte

Cette étude porte sur l'aquifère de la craie, la ressource en eau la plus importante de Picardie, tant par son extension que par sa très grande exploitation. UniLaSalle utilise les méthodes géophysiques depuis plusieurs années (tomographie électrique et sondage par Résonance Magnétique des Protons notamment), afin d'en améliorer les connaissances. La campagne 2016-2017 se distingue par une prise de mesures régulières, au même endroit, à proximité du campus UniLaSalle, afin de suivre l'évolution de la teneur en eau, de la perméabilité et de la transmissivité du sous-sol, et ainsi effectuer un suivi des propriétés de l'aquifère.

Le mur de l'aquifère de la craie est marqué par les marnes argileuses du Turonien (étage du Crétacé inférieur), appelées Dièves bleues au nord, ou argiles de Gault de l'Albien, au sud. Ces couches marneuses assurent la perméabilité de l'aquifère de la craie. La nappe est stockée dans la craie du Sénonien au Turonien inférieur ("craie picarde") et est la plus importante de l'Oise. Il est capté sous la formation du Tertiaire. L'aquifère de la craie est un aquifère à nappe libre, car il ne comporte pas de toit imperméable sur la formation de la craie picarde. Le niveau de sa zone saturée varie donc en fonction des apports d'eau externes.

UniLaSalle se situe sur une entité du bassin Parisien, l'anticlinal de Pays de Bray, également appelé Boutonnière. Cette appellation provient de l'anticlinal crevé du Pays de Bray, marqué par une importante faille hercynienne orientée nord-ouest, sud-est. Sur le site du campus, la campagne de mesures s'est déroulée en deux endroits : sur le site expérimental de la plateforme hydrogéologique, et au Nord de la forêt de l'Hôtel-Dieu, au nord du campus.

Le site expérimental de la plateforme hydrogéologique UniLaSalle est composé de 3 forages de la base de données Infoterre du BRGM ; 5 forages et 14 piézomètres non carottés réalisés en 2013 et 2014 d'une profondeur de 110 m permettant d'effectuer des mesures piézométriques et des diagraphies ; 1 forage carotté de 110 m réalisé en mai 2015 afin de préciser la lithologie.

Les résultats issus des différentes méthodes géophysiques ont été comparés et corrélés avec les données de relevés piézométriques effectués sur le site hydrogéologique de la plateforme Hydrogéologique UniLaSalle. L'ensemble des résultats informera sur : quels sont les capacités de ces méthodes géophysiques à caractériser un aquifère et suivre son évolution ?

Les raisons de la recherche

La campagne 2016-2017 s'inscrit dans la continuité de l'acquisition de données hydrogéophysiques sur l'aquifère de la craie par UniLaSalle (Lutz and Zouhri, 2016). Cet aquifère est notamment sollicité par de nombreux ouvrages domestiques, agricoles et industriels. Il assure également plus de la moitié de l'alimentation en eau potable. La protection de cette ressource nécessite une connaissance approfondie de l'aquifère crayeux. En plus de nos données à petite échelle, la caractérisation de cet aquifère a été menée par plusieurs organismes (BRGM par ex.), afin d'assurer le suivi quantitatif et qualitatif de l'aquifère. Les procédés sont divers mais majoritairement destructifs, tels que les essais de pompage, ou les forages carottés. C'est pourquoi les méthodes géophysiques, majoritairement non destructives, ont été choisies dans le cadre de notre étude.

Les méthodes mises en œuvre et les mesures réalisées

La première partie de la campagne 2016-2017 a consisté en des tomographies électriques, afin d'en connaître davantage sur les formations du site d'étude. Plusieurs profils ont été réalisés dans le Verger du campus d'UniLaSalle, sur le site expérimental à proximité du forage carotté, ainsi qu'au

nord de la forêt de l'Hôtel-Dieu, au nord du campus. Les mesures ont été réalisées grâce à un système multi-électrodes 4 canaux (Résistivimètre ABEM TERRAMETER SAS 4000 et multiplexeur ES1064eC), en utilisant 64 électrodes et le traitement a été effectué via le logiciel RES2DINV. Les deux protocoles d'acquisition "gradient" et "pôle-dipôle" ont été utilisés, car ils permettent d'obtenir respectivement des sections de résistivité de bonne résolution et de plus grande profondeur d'investigation.

En complément, une deuxième méthode hydrogéophysique a été utilisée durant la campagne : la Résonance Magnétique des Protons (RMP). Le matériel utilisé est le système "NumisPoly" d'Iris Instruments et le logiciel d'acquisition "Prodiviner". Cette méthode permet principalement d'estimer la teneur en eau en fonction de la profondeur, ainsi que la perméabilité et la transmissivité. Des mesures préalables aux sondages RMP doivent être réalisées : (i) mesures du bruit électromagnétique qui détermine la faisabilité des mesures RMP et le type de boucle (boucle carrée si le bruit est inférieur à $0,1 \mu\text{V}$; boucle en huit si le bruit est compris entre $0,1$ et $1 \mu\text{V}$) ; (ii) mesures du champ magnétique qui doit être stable à 20 nT près et dont la valeur moyenne permet d'estimer la fréquence d'excitation à appliquer (égale à celle dite "de Larmor"). Ces mesures préalables ont permis de déterminer les zones possibles sur le site pour réaliser des sondages RMP. Il s'avère malheureusement que le niveau bruit au niveau du site expérimental de la plateforme UniLaSalle est trop important pour mener des sondages RMP. Par contre, plus au nord, la partie nord de la forêt de l'Hôtel-Dieu possède les conditions requises pour la réalisation de sondages RMP en boucle carrée.

Il a ainsi été décidé de réaliser des sondages RMP à boucle carrée de 100 m de côté, afin d'atteindre une profondeur maximale de l'ordre de 90 m . Un total de 4 sondages RMP, côte à côte 2 par 2, ont ainsi été réalisés selon une périodicité de 1 mois à 1,5 mois, d'octobre 2016 à juin 2017. Ces derniers ont été réalisés selon des paramètres d'acquisition identiques, notamment : utilisation de l'option "double pulse" pour plus de précisions sur l'estimation des valeurs des paramètres, aucun filtre à l'acquisition, 16 moments, rejet des mesures si le niveau de bruit est supérieur à 2000 nV , stack de 80.

Des tomographies électriques ont été réalisées à proximité des sondages RMP afin de déterminer un modèle de résistivité permettant de construire une matrice d'inversion des données RMP adaptée et précise. Le traitement des données de sondages RMP a été effectué à l'aide du logiciel SAMOVAR, en adoptant des paramètres de régularisation et un facteur de calibration de la perméabilité identiques pour chaque sondage et chaque période de mesures. L'effet de certains paramètres a été testé, tel que l'application ou non d'un filtre passe-bande 50 Hz et le nombre de couches. Le niveau de bruit sur le site étant variable selon la période de mesures, la comparaison temporelle des résultats a été effectuée après application d'un filtre 50 Hz .

Les principaux résultats

- **Tomographie électrique**

La section de résistivité en protocole "gradient" passant à proximité du forage carotté C, du forage F3 et le piézomètre Pz1 du site expérimental permet de réaliser un "calage des valeurs de résistivité avec la géologie" (Figure 1). Le report du niveau de la nappe, connu grâce aux relevés de piézométrie (environ à 40 mètres de profondeur), sur la section acquise en "pôle-dipôle" révèle que la craie saturée correspond, à cet endroit, à des valeurs de résistivité supérieures à 130 ohm.m . Ces informations ont permis d'améliorer l'interprétation des autres sections de résistivité obtenues sur le site expérimental et celles au nord de la forêt de l'Hôtel-Dieu.

Deux profils tomographiques perpendiculaires, orientés N-S et E-W, se croisant en leur milieu, ont été réalisés au niveau des boucles de sondage RMP afin de déterminer un modèle de résistivité nécessaire pour la génération de la matrice d'inversion des données RMP (Figure 2). Leur interprétation a été réalisée en prenant en considération les résultats du "calage des valeurs de résistivité avec la géologie" issu des tomographies réalisées à proximité du forage carotté sur le site expérimental UniLaSalle.

• Résonance Magnétique des Protons

Un exemple de résultat est présenté Figure 3, relative au sondage RMP "F6" acquis début juin 2017. Concernant les paramètres d'inversion, il est à noter dans ce cas l'application notamment :

- D'un filtre passe-bande étroit de 50 Hz, diminuant ainsi le niveau de bruit et améliorant le calage entre la courbe de sondage mesurée et celle calculée (Figure 3e) ;
- D'un coefficient de calibration de la perméabilité Cp de $3,5 \cdot 10^{-8}$, valeur estimée pour la craie du bassin parisien (Vouillamoz, 2003).

Les résultats consistent donc en un modèle de teneur en eau jusqu'à 90 m de profondeur (Figure 3b), ainsi qu'une estimation de la perméabilité et la transmissivité (Figures 3c et 3d). De tels diagrammes ont également été obtenus pour 3 autres sondages RMP ("F4", "F5" et "F7") réalisés au nord de la forêt de l'Hôtel-Dieu, et ce, tous les mois et demi environs, d'octobre 2016 à juin 2017.

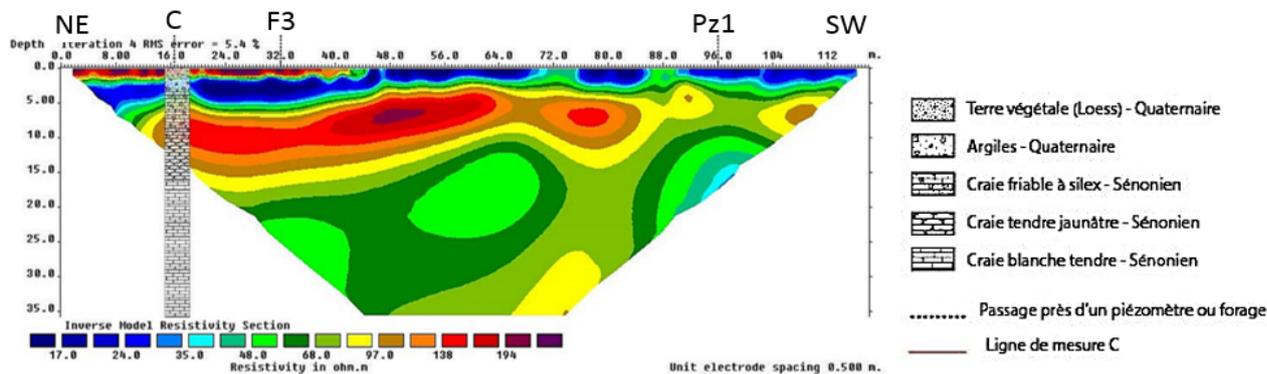


Figure 1 : Corrélation entre les données du forage carotté et les valeurs de résistivité, sur le site expérimental UniLaSalle.

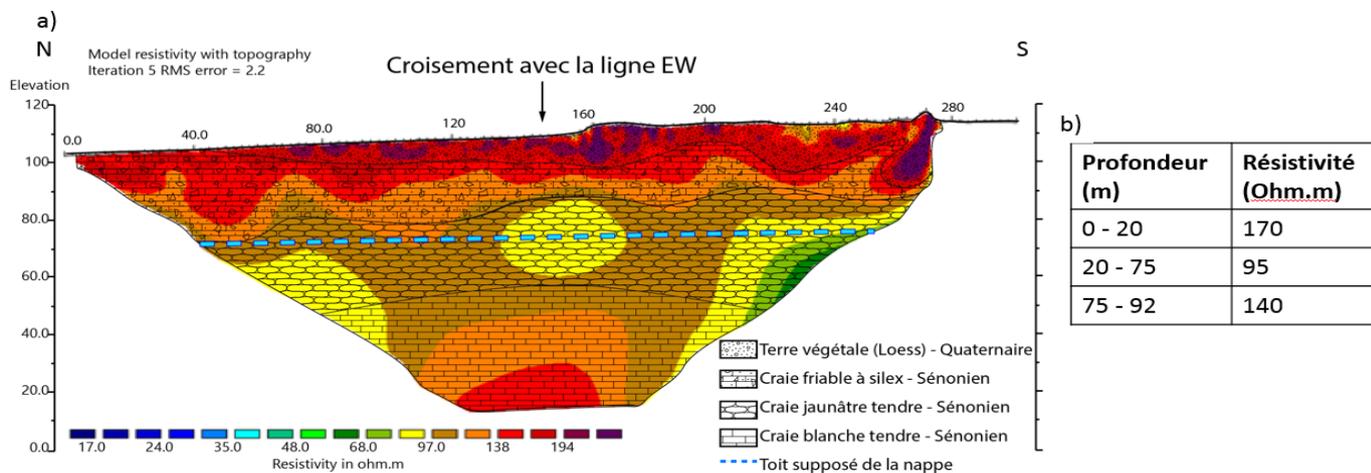


Figure 2 : a) Section N-S de résistivité en pôle-dipôle au nord de la forêt de l'Hôtel-Dieu, à proximité des sondages RMP et b) modèle de résistivité associé.

Discussion et conclusion

La figure 4 présente ainsi l'évolution temporelle des modèles de la teneur en eau relative au sondage RMP "F6". Le report sur ces diagrammes du niveau piézométrique mesuré au niveau du site expérimental UniLaSalle facilite leur interprétation ; il est alors possible d'estimer le niveau de la nappe à partir des résultats RMP et d'en suivre l'évolution temporelle. Une analyse similaire est réalisée pour chaque sondage, ainsi qu'au sujet des courbes de perméabilité et de transmissivité. Les mesures réalisées lors de cette campagne permettent ainsi de mieux caractériser l'aquifère de la craie au nord de Beauvais et d'en suivre les fluctuations. Cette étude pourra être complétée à l'avenir par des pompages d'essai au niveau du site expérimental de la plateforme UniLaSalle, afin d'obtenir un

facteur de calibration Cp plus approprié à la craie picarde, réaliser une comparaison méthodologique et estimer la variabilité spatiale des caractéristiques de l'aquifère.

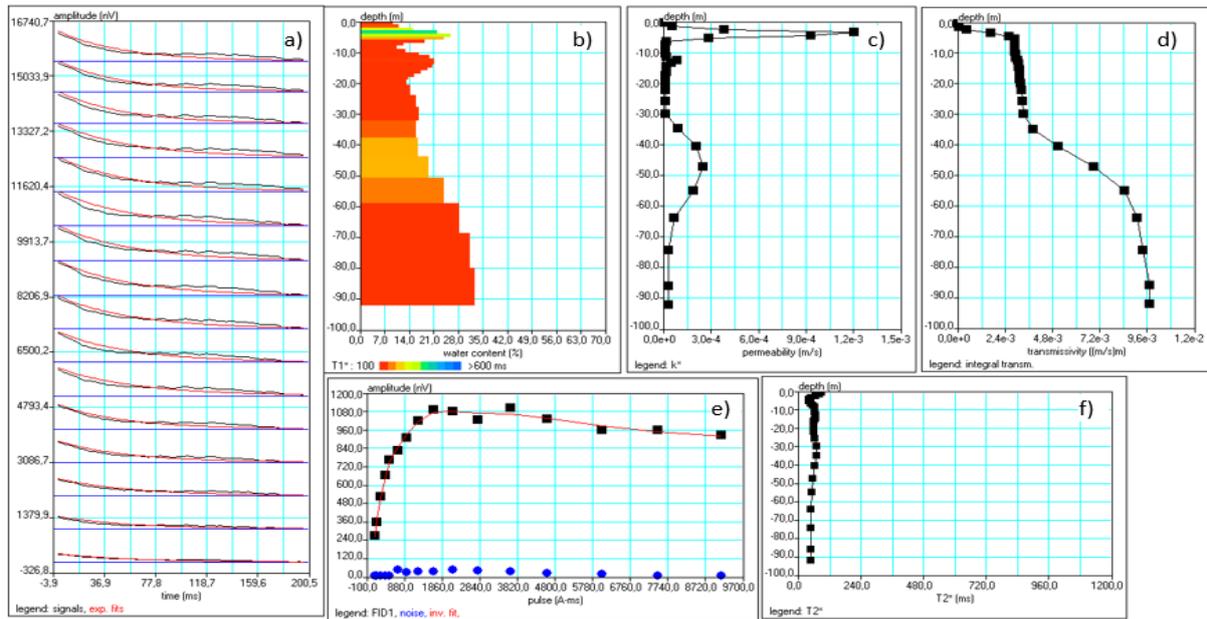


Figure 3 : Résultats obtenus après traitement pour le sondage RMP "F6" pour le mois de juin 2017 : a) Courbes de relaxation pour les 16 moments ; b) Modèle de teneur en eau en fonction de la profondeur ; Courbes c) de perméabilité et d) de transmissivité en fonction de la profondeur ; e) Courbes de sondages mesurée (carrés noirs) et calculée (trait rouge), et niveau de bruit après stack (points bleus) ; (f) Temps de relaxation T2*.

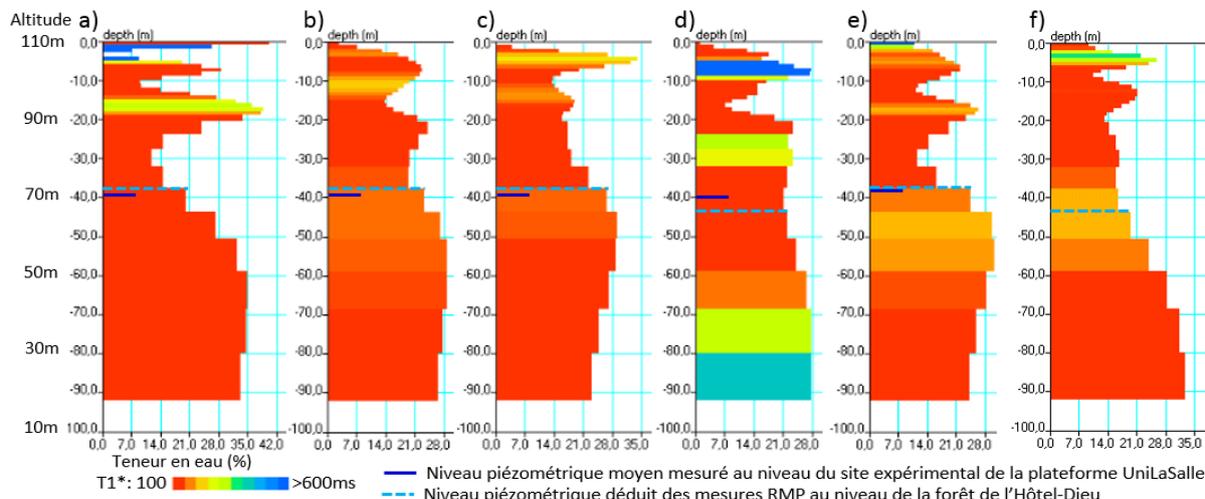


Figure 4 : Modèles de teneur en eau obtenus après traitement pour le sondage RMP "F6" pour les mois de a) octobre 2016, b) novembre 2016, c) décembre 2016, d) janvier 2017, e) mars 2017 et f) juin 2017.

Bibliographie

Lutz P., Zouhri L. (2016) The 2015-2016 Magnetic Resonance Soundings Campaign applied to the chalk aquifer (Beauvais, North of France). *22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics -Near Surface Geoscience, 4-8 September 2016, Barcelona, Spain.* DOI: 10.3997/2214-4609.201602073.

Vouillamoz J.M. (2003) La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique. *Thèse de doctorat, Université de Paris-XI, Orsay.* 315 p.

Mots clés : Aquifère de la craie, Beauvais, site hydrogéologique expérimental, tomographie électrique, sondages par Résonance Magnétique des Protons, suivi temporel, niveau piézométrique.

PERMEABILITY ESTIMATION through FULL WAVE SONIC

Jean Luc Mari^a, Ana I. López^b, Beatriz Benjumea^c, J.L.García-Lobón^d

^a IFP Energies nouvelles, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France

^b Independent Researcher, Granollers, Barcelona, Spain

^c Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Parc de Montjuïc. E-08038 Barcelona, Spain

^d Instituto Geológico y Minero de España (IGME), E-28760-Tres Cantos, Madrid – Spain

Abstract – Résumé

Acoustic logging is run, mainly to measure the velocities of the geological formations. Attempts to predict permeability from acoustic data have been made by several researchers. The historical focus has been on predicting permeability from P-wave velocity and attenuation. Through a field example, we show how acoustic parameters can be used to evaluate the permeability. The acoustic results are compared with core measurements and Lugeon tests.

La diagraphe acoustique est principalement utilisée pour mesurer les vitesses des formations géologiques. De nombreux chercheurs ont utilisé les mesures de vitesse et d'atténuation des ondes de compression pour prédire les valeurs de perméabilité. A travers un exemple, nous montrons comment certains paramètres acoustiques peuvent être utilisés pour estimer la perméabilité. Les résultats acoustiques sont comparés avec des mesures laboratoires sur échantillons et des essais Lugeon.

Keywords: full waveform acoustic logging, permeability, porosity, specific surface, core, Lugeon tests.

Introduction

In Spain, the Geological Survey of Spain (IGME, 2009) conducted a selection of suitable areas including seal and reservoir for CO₂ injection and storage based on extensive geological studies, including acquisition of logging data, core analysis, and Lugeon tests. We had the opportunity to have the Full wave sonic data recorded in the SB-4 borehole drilled in the Las Ventanas Formation (limestone) located in the Bajo Segura Basin (SE Spain). In a first step, we describe the methodology used to evaluate permeability from full wave form acoustic data. In a second step, we present the SB-4 field case.

Permeability estimation from acoustic data

In addition to velocity measurement, the acoustic data can be processed to measure acoustic parameters for each wave such as amplitude, attenuation, frequency, distortion of the acoustic signal. The acoustic distortion of the refracted P-wave is measured by a qualitative dimensionless attribute called Shape Index (Ic) attribute (Lebreton and Morlier, 1983). Ic is obtained calculating the ratio $A1+A3$ to $A2$ where $A1$, $A2$ and $A3$ are the amplitudes of first three picks of the refraction wavelet. Ic variation indicates the presence of criss-cross patterns, fractures or permeable zones (Mari *et al.*, 2011). Ic can also be used as a permeability indicator (Lebreton and Morlier, 1983).

Attempts to predict permeability from acoustic data have been made by several researchers (Morlier and Sarda 1971, Lebreton and Morlier 1983, Fabricius *et al.* 2007). The historical focus has been on predicting permeability from P-wave velocity and attenuation.

Laboratory experiments (Morlier and Sarda, 1971) have shown that the attenuation of a clean formation can be expressed in terms of three structural parameters: porosity, permeability and specific surface. Both theoretical and experimental studies have identified the relation between acoustic attenuation and petrophysical parameters:

$$\delta = \left(\frac{CS}{\varphi}\right) \left(\frac{2\pi k f \rho_f}{\mu}\right)^{1/3} \quad \text{Equation 1}$$

Where δ is the attenuation (dB/cm), C is the calibration coefficient, S is the Specific surface (cm²/cm³), φ is the porosity, k is the permeability (mD), f is the frequency (Hz), ρ_f is the fluid density, and μ is the fluid viscosity (centipoises).

It is necessary for computing the permeability from 1, to measure the attenuation of the formation and calculate the effective specific surface of the formation. Theoretically, the effective specific surface S can be calculated from the porosity φ and the Klinkenberg permeability k (given in m² in equation 1 but typically reported in mD) by using Kozeny's equation:

$$K_{index} = C_k \frac{\varphi^3}{S^2} \quad \text{Equation 2}$$

$$S_g = S/(1 - \varphi) \quad \text{Equation 3}$$

Where φ is the porosity, S is the Specific surface, S_g is the Specific surface with respect to grain volume and C_k is the Kozeny's factor.

The Kozeny's factor can be calculated from the porosity via a simple model of linear 3D interpenetrating tubes (Mortensen *et al.*, 1998). The specific surface S_g with respect to the bulk volume is given in 1/m in 2 but typically reported in m²/cm³. Fabricius *et al.* (2007) have found that the specific surface with respect to grain volume (S_g) is apparently independent from porosity. In an attempt to remove the porosity effect on V_p/V_s and mimic a reflected φ vs log (S_g) trend, they propose to use the following relationship between porosity φ , V_p/V_s and S_g :

$$\log(S_g \cdot m) = a \cdot \varphi + b \left(\frac{V_p}{V_s}\right) + c \quad \text{Equation 4}$$

Mari *et al.* (2011) described a methodology for obtaining an indicator of permeability log (Ik-Seis) based on porosity φ , specific surface, P-wave attenuation and frequency:

$$Ik - Seis = \frac{(\varphi \cdot \delta / S)^3}{f} \quad \text{Equation 5}$$

Where φ is sonic porosity, δ is the attenuation, S is the specific surface, and f is the P-wave frequency.

Field example

Several geophysical logs were acquired in the SB-4 borehole up to 140 m depth. Three standard probes were used: Gamma Ray (GR), Full Wave Sonic (FWS) and Acoustic televiewer (ABI). The full wave sonic tool has three receivers spaced 20 cm between them to record full-waveform data generated by a monopole source located 60 cm from the first receiver. Measurements for all the probes were made in the upward direction to minimize depth errors. The analysis of the acoustic data shows that the geological formation is an acoustic slow formation. The acoustic waves recorded are refracted P-waves and Stoneley waves. The acoustic data are here used to measure the P-wave velocity (V_p) of the formation and the Stoneley wave velocity (V_{st}). The shear velocity of the formation has been estimated indirectly from the Stoneley wave dispersion equation. A simplified version of the dispersion equation (White, 1965) can be used if the Stoneley velocity is estimated at low frequency. To estimate V_s , the density ρ of the formation must be known. The White's equation is written as follows:

$$\frac{1}{V_{st}^2} - \frac{1}{V_f^2} = \frac{\rho_f}{\rho} \cdot \frac{1}{V_s^2}$$

Equation 6

Where V_{st} is the Stoneley velocity at low frequency, V_f is fluid velocity, V_s is the shear velocity of the formation, ρ is the density of the formation and ρ_f is fluid density.

Since a density log (gamma-gamma) and a Neutron log have not been recorded, the acoustic porosity log, given by the Raymer-Hunt-Gardner is used to compute a density log given by the following equation:

$$\rho = (1 - \phi)\rho_{ma} + \phi\rho_f$$

Equation 7

Where ρ_{ma} is the theoretical matrix density, ρ_f is the fluid density and ϕ is the porosity.

The density log and the Stoneley-wave velocity log have been used to compute a shear velocity log V_s , using equation 6, and the associated mechanical logs such as V_p to V_s ratio and Poisson's ratio logs. Figure (top) shows some of the mechanical parameters (Poisson's ratio, attenuation, shape index) observed in the reservoir zone. We can observe an increase of the attenuation in the 130-140 m depth interval. The shape index I_c shows a peak at 140 m depth. At 140 m, we observe high values for porosity, Poisson's ratio, attenuation and shape index which are indicators for a highly permeable layer. The a, b, c coefficients from equation 4 have been adjusted in order to obtain permeability values, given by K_{index} (equation 2), which are in agreement with the results obtained by the Lugeon and laboratory tests. Figure (top) also shows the specific surface log expressed in m^2/cm^3 and the K_{index} log expressed in mD and noted pseudo permeability. The K_{index} log confirms the results obtained by the Lugeon tests. It clearly shows the two sections (105 – 110 m and 115 – 120 m depth), where Lugeon permeability indicates a very impermeable formation and a section (135 – 141 m of depth) where Lugeon permeability indicates a highly permeable formation (39.5 mD). In section 135 – 141 m of depth, the acoustic permeability K_{index} is ranging between 17 to 33 mD. In practice, the parameter I_k -Seis computed from equation 5 is proportional to permeability k . In comparison with K_{index} , it takes account the frequency of the acoustic signal and the attenuation of the formation. The refracted P-wave frequency is centred round 13 kHz and varies between 12 and 14 kHz. I_k -Seis can be expressed in mD after calibration. Here the calibration has been done by using the K_{index} . The comparison of the I_k -Seis and K_{index} is shown in the table (figure, bottom left). The correlation coefficient between the logs is high (0.92). The effect of the attenuation mainly affects the low permeable zones (105 – 110 m and 115 – 120 m depth). The shape index I_c points out the high permeable zone at 140 m. It also indicates the limits between the low permeable zones and the high permeable zones. At the limits, converted waves (reflected refracted waves) indicated by crisscrosses are generated. Consequently, distortions of the acoustic signal can be observed through the shape index. The long wavelength variation of the shape index shows a strong correlation with K_{index} and after calibration can be converted in mD (I_c - K , figure bottom right).

Conclusion

Combining full waveform acoustic parameters (wave velocities, specific surface estimated from Poisson's ratio and acoustic porosity, pseudo-permeability given by I_k -Seis, Shape index I_c), hydraulic conductivity (laboratory tests) and permeability data (Lugeon permeability), a more accurate transmissivity assessment in the reservoir geological formation has been achieved.

References

- IGME (2009). Estudio preliminar de las formaciones favorables para el almacenamiento subterráneo de CO₂ en España. IGME. Grupo de Almacenamiento de CO₂.
- Fabricius, I.L., Baechele, G., Eberli, G.P. and Weger, R. (2007). Estimating permeability of carbonate rocks from porosity and V_p/V_s . *Geophysics* 72 (5), 185 – 191.

- Lebreton, F. and Morlier, P. (1983). Une diagraphie de perméabilité par méthode acoustique. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, n° 26 – 27.
- Mari, J.L., Gaudiani, P. and Delay, J. (2011). Characterization of geological formations by physical parameters obtained through full waveform acoustic logging. J. Phys. Chem. Earth.
- Mari, J.L. and Guillemot, D. (2012). Detection of porous and permeable formations: from laboratory measurements to seismic measurements. Oil & Gas Science and Technology, vol. 67 (2012), No. 4, 703-721.
- Morlier, P., Sarda, J.P. (1971). Atténuation des ondes élastiques dans les roches poreuses saturées, Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol 26, N° 9, p. 731-755.
- Mortensen, J., Engstrom, F. and Lind, I. (1998), The relation among porosity, permeability, and specific surface of chalk from the Gorm field, Danish North sea; SPE Reservoir evaluation & engineering, 1, 245-251
- White, J.E. (1965). Seismic waves: Radiation, transmission and attenuation. McGraw-Hill Book Company, New York

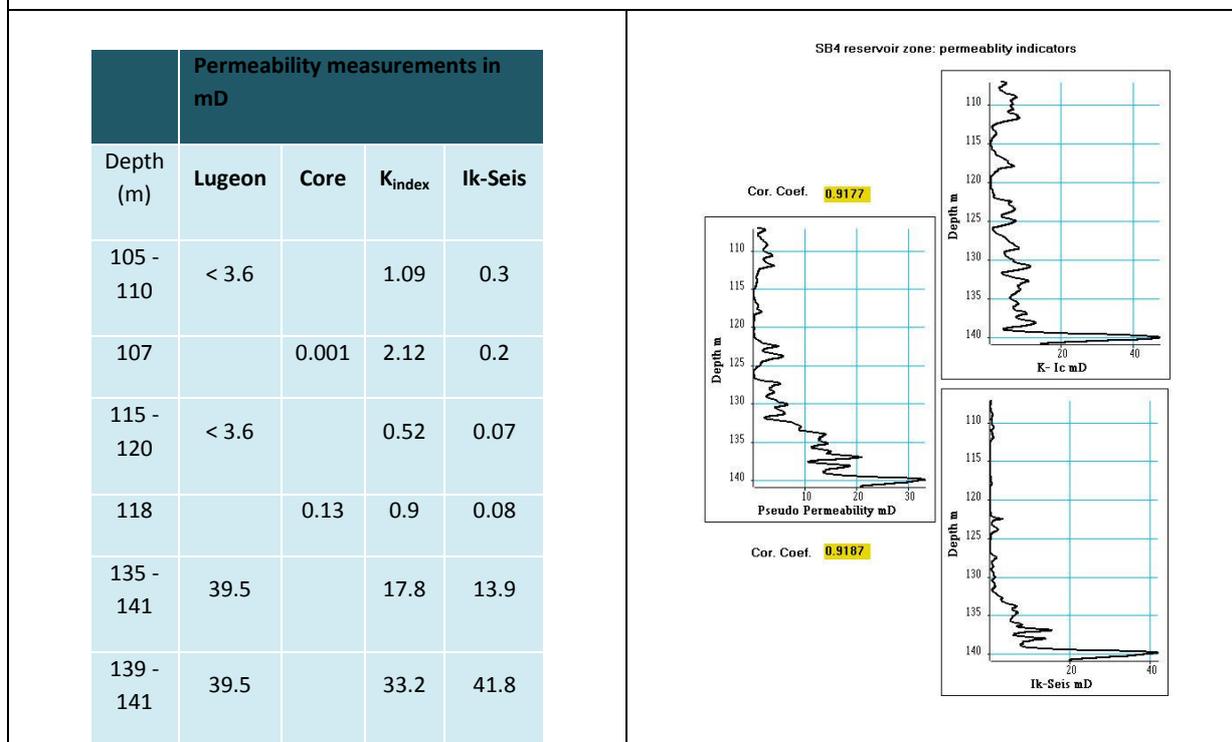
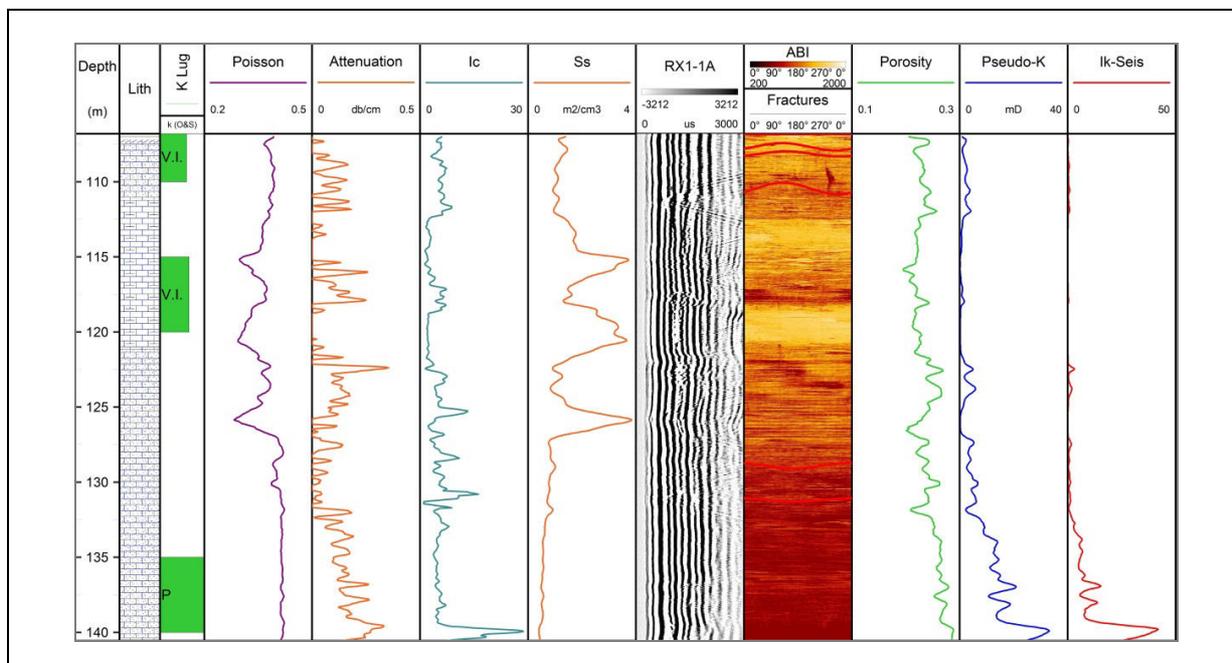


Figure.Top: Well logs in reservoir zone (Las Ventanas Fm.) in SB-4: lithological interpretation column, Lugeon permeability by Olalla & Sopena (1991) classification, Poisson's ratio, attenuation log, shape index (Ic), specific surface (Ss), FWS for first receiver (RX1-1A), Acoustic Borehole Image (ABI) and fractures identified from it, sonic porosity, pseudo permeability (Pseudo-K) and parameter Ik-Seis. Bottom left: table, bottom right: comparison of acoustic permeability indicators (K_{index}, K-Ic, Ik-Seis).

Présentation d'un outil géophysique de caractérisation des mouvements de sol et de leur évolution dans le temps et dans l'espace

Exemple des Alpes-Maritimes

Par Jean-Dominique GIRAUD, Dr es Sciences, Dr en Géologie
2GI-consultant 287 Route du Champ d'Astier 06260 La Penne
Email : jean-dominiquegiraud@la poste.net

Abstract : We present here the results of landslides analysis obtained by geophysical methods in the department of Alpes-Maritimes (France).

The geophysics appears to be a powerful tool to measure and knowledge the landslides, and also contribute for the geological hazards prevention.

I) Introduction : Les mouvements de sols dans les Alpes-Maritimes :

Nombre de communes...	... avec un PPR approuvé...		... avec un PPR prescrit...		... couvertes par un PPR approuvé et touchées par un mouvement de terrain au moins 3 fois depuis 20 ans	... classées à risque de mouvement de terrain	... sur le territoire
	... révisé ou en cours de révision	... ou une procédure antérieure valant PPR approuvé, sans PPR prescrit	... et avec procédure antérieure	... et sans procédure antérieure			
Alpes-de-Haute-Provence	33	1	3	16	2	199	200
Hautes-Alpes	44	1	0	12	0	155	177
Alpes-Maritimes	53	0	2	12	35	163	163
Bouches-du-Rhône	41	13	2	14	27	119	119
Var	0	12	3	8	0	153	153
Vaucluse	0	0	0	1	0	112	151
Provence-Alpes-Côte d'Azur	171	27	10	63	64	901	963
France métropolitaine	2 290	455	77	1 611	533	14 148	36 570

Le département des Alpes Maritimes est le plus touché de la région PACA par les mouvements de terrain. Les mouvements de terrain déclarés 35 fois en 20ans et 163 communes classées en risque MVT.

II) L'étude des mouvements de sol : Géologie Géotechnique et Géophysique

Les études de mouvements de terrain sont le plus souvent réalisées par des géologues ou des géotechniciens. La contribution de la géophysique est encore discrète et n'est pas suffisamment reconnue.

L'outil géophysique est pourtant le plus performant pour étudier les sites affectés par les mouvements de terrain, car sa mise en œuvre est légère. De plus, l'information obtenue par la géophysique est une image continue du sous sol et non pas ponctuelle comme celle obtenue par les sondages géotechniques classiques.

III) Contribution de la géophysique à l'étude des mouvements de terrain dans les Alpes Maritimes :

A) Notre expérience

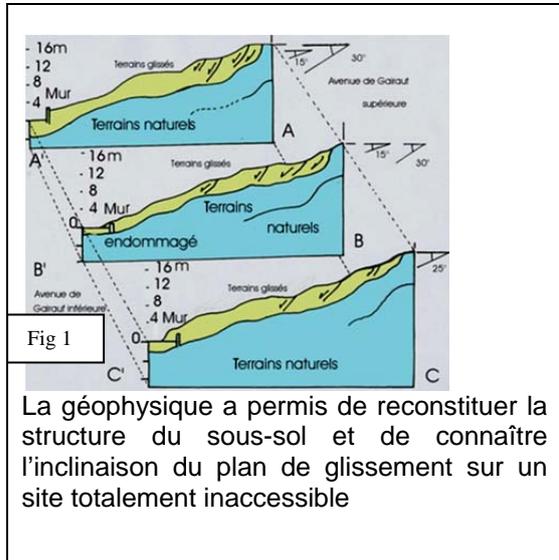
JD GIRAUD (1995) a mis au point une technique d'investigation et d'auscultation du sous-sol au travers de la Méthode A.C.Ptm. déposée à l'I.N.P.I.

Cette méthode non destructive s'appuie sur les techniques de prospection que sont la sismique réfraction et le sondage V.L.F. (very low frequencies)

Notre protocole d'intervention et notre méthode ont déjà donné des résultats concluants particulièrement en zone urbaine.

Nous présentons les résultats obtenus dans trois villes des Alpes Maritimes particulièrement exposées au risque MVT.

La ville de Nice



Reconstitution en 3 dimensions du site du glissement de terrain de Gairaut-



Photo 1 :Le glissement de terrain de Gairaut- (Octobre 2000)

En 2001 nous avons étudié les nombreux glissements de terrain qui ont affecté la ville de Nice, ceci à la demande de la Direction de la Prévention des Risques Urbains.

La ville de Menton



Photo 2 ;La coulée de boue du Mont Gros

La ville de Menton a subi en 2001 de très importants dommages dus à d'importantes coulées de boue qui ont déferlé sur la ville (photo 2).

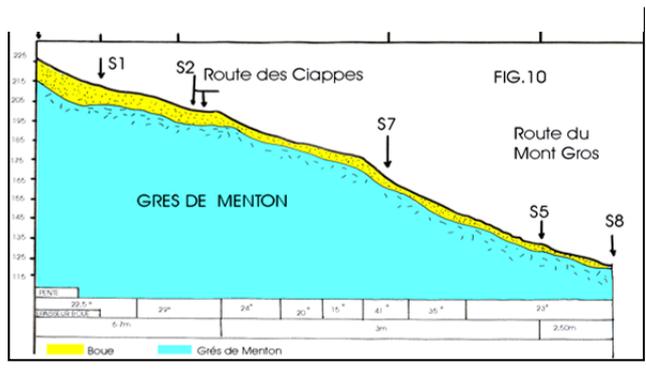


Fig.2 : coupe géologique obtenue par sondages

La contribution de la géophysique à l'étude de ce type de mouvement de terrain a été précieuse car aucun engin de reconnaissance classique ne pouvait évoluer sur ces zones instables. L'utilisation en parallèle de la méthode électrique et de la sismique-réfraction a permis d'obtenir une caractérisation optimale des coulées (géométrie, lithologie, paramètres physiques...) Fig.2

La ville de Grasse

La ville de Grasse est elle aussi exposée au risque glissement. Deux sites particulièrement touchés ont été récemment étudiés par 2GI Consultant en utilisant la technique A.C.P.tm. En 2016 2GI-consultant est intervenu à la demande de la DGST de la ville de Grasse pour étudier un glissement de terrain important au niveau de l'avenue de Croisset. Là encore on doit faire face à un évènement déclaré et rechercher des parades (Fig.3)

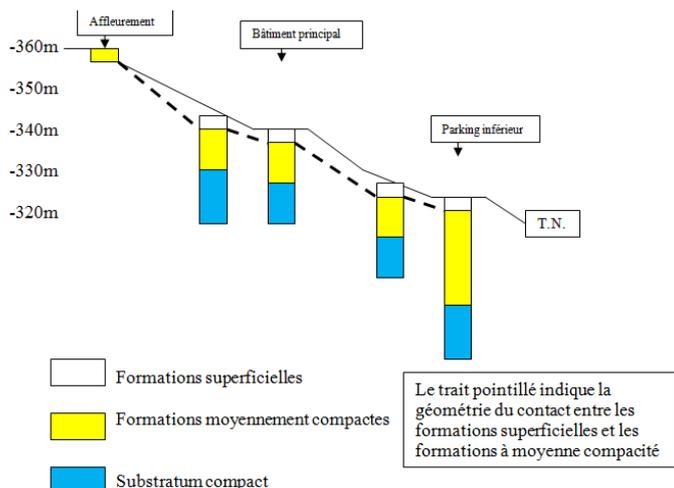


Fig.3 : Coupe du glissement de l'avenue F.de Croisset GRASSE (2016)

B) La prévention est possible grâce à la géophysique :

La géophysique est une technique de prospection du sous-sol qui permet de mesurer les paramètres physiques des terrains « in situ ». La géophysique est une méthode non destructive et le terrain sondé n'est pas déformé ou altéré comme c'est par exemple le cas lors d'un carottage.

Lorsqu'un mouvement de terrain se déclenche, la structure des terrains est modifiée. Dans le cas d'un glissement de terrain la zone amont du glissement a tendance à se décompresser, la zone aval au contraire se comprime.

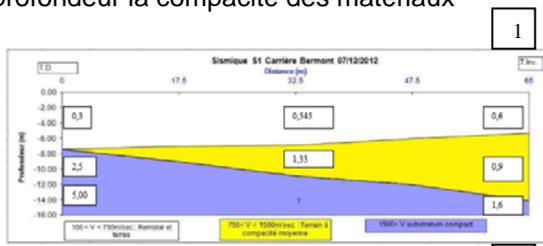
L'étude des vitesses de propagation des ondes sismiques dans les terrains concernés par le glissement étant fonction de leur compacité on pourra, en cas de variation brutale de la compacité, prévoir l'imminence d'un glissement.

La géophysique peut donc contribuer à la prévention des risques de mouvements de sol

IV) Mise en place d'un suivi géophysique pour caractériser et suivre l'évolution dans le temps d'un mouvement de terrain :

A la demande de la Préfecture des Alpes Maritimes le Bureau d'Etudes INGEOTECH alors détenteur de la méthode ACPtm a été chargé d'évaluer la stabilité d'un massif rocheux exploité en carrière et ceci en raison du risque éboulement présent sur le site de l'exploitation..

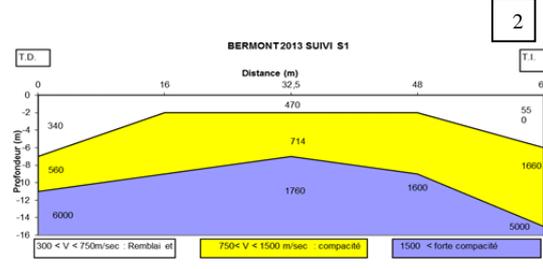
On a réalisé sur le site des mesures géophysiques par sismique réfraction pour déterminer en profondeur la compacité des matériaux



Les deux profils sismiques réalisés en 2012(1) et en 2013(2) montrent un tassement des formations de surface (figuré blanc) et un affaissement des terrains sous-jacents (plus compacts) figurés en jaune.

SUIVI GEOPHYSIQUE :

Les mesures sismiques ont été réalisées de 2005 à 2013 et ont permis de détecter de très légères variations de constitution du massif.



On a donc pu conclure à la stabilité de la carrière confirmée par ce suivi

V) Perspectives d'avenir

Suite aux résultats obtenus par la géophysique sur les sites sensibles du département des Alpes Maritimes, il est possible d'envisager la création d'un outil de caractérisation des mouvements de sols et de suivi de leur évolution.

Cet outil servira en particulier aux collectivités locales et territoriales dans le cadre de la connaissance des zones à risque mais avant tout il ouvre des perspectives nouvelles pour la géophysique dans le cadre de la prévention

----- :-----

BIBLIOGRAPHIE

Colas G & Pilot G (1976) Description et classification des glissements de terrain. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Numéro spécial, 2, 21-30.

J. L. Durville, « Mécanismes et modèles de comportement des grands mouvements de versants », in *Bull. A.I.G.I.* 45, 1992

Y. Gautier, *Catastrophes naturelles*, Cité des sciences et de l'industrie-Pocket, Paris, 1995

J.D.Giraud 1994- Les techniques de prospection du sous-sol-*Société de l'Industrie Minérale Guide de l'exploitant*

J.D.Giraud (2000) Principe de la méthode A.C.P.tm Fondements théoriques-*Publication interne Ingeotech*

Risques générés par les grands mouvements de versants, ouvr. coll. franco-italien, Univ. de Grenoble, 1998

Mots clés : mouvements de sols, glissement ,risques naturels, prévention

Combinaison de méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic d'ouvrages hydrauliques

Théo Dezert (IFSTTAR Nantes – Cerema Blois), Yannick Fargier (Cerema Blois), Sérgio Palma Lopes (IFSTTAR Nantes), Philippe Côte (IFSTTAR Nantes)

theo.dezert@ifsttar.fr, yannick.fargier@cerema.fr, sergio.lopes@ifsttar.fr,
philippe.cote@ifsttar.fr

Abstract

We introduce here a new database framework for levee investigation. This work insists on the benefits of such a structure to propose new method investigation combinations and to provide a significant quantity of references for the research community. We are considering on an equal footing geophysical and geotechnical investigation methods, taking into account the environmental constraints, the pathologies and the failure modes of the levees.

Introduction

Environ 8 000 km de digues ont été identifiées en France (Mériaux et al., 2005). Ces structures, d'après le décret n°2007-1735 (12/11/2007), sont considérées comme "structures hasardeuses" et nécessitent une surveillance particulière pour prévenir le risque de rupture pouvant mener à des pertes humaines (53 décès attribués aux inondations de Le Faut-sur-Mer en 2010) et à des désastres économiques (les inondations de 2016 sont responsables d'environ 1 milliard d'euros de dommages matériels en France).

Quatre types de mécanismes peuvent mener à la rupture des ouvrages de protection contre les inondations (François et al., 2016) : la surverse, le glissement de talus, l'érosion externe et l'érosion interne. Diverses propriétés physiques des ouvrages (perméabilité hydraulique, compacité...) et caractéristiques (présence d'hétérogénéités dans le corps de digue ou fondation, présence de conduites...) associées à des pathologies spécifiques (faible compacité, forte perméabilité hydraulique...) caractérisent ces mécanismes. Les méthodes de prospection géophysique et géotechnique permettent de définir des propriétés physiques particulières afin de prévenir les cas de rupture. Cependant, bien que plusieurs études aient été réalisées sur une (Abu-Hassanein et al., 1996; Samouëlian et al., 2003) ou deux (Beck, 2008; Karaoulis et al., 2012) méthodes d'investigation, la combinaison justifiée d'un plus grand nombre de méthodes demeure rare.

L'objectif de ce travail est d'introduire une nouvelle structure de base de données qui pourrait être développée ultérieurement. Un de ses principaux intérêts est qu'elle met sur un pied d'égalité (1) les méthodes géophysiques fournissant de l'information physique sur de larges volumes de sous-sol avec des résultats entachés d'un certain niveau d'incertitudes, et (2) les méthodes géotechniques fournissant une information plus ponctuelle mais aussi plus fiable. Un des objectifs de cette nouvelle représentation de l'information, reposant sur une méthodologie rigoureuse, est d'assister les agences et les gestionnaires d'ouvrages à choisir les méthodes les plus pertinentes pour caractériser la vulnérabilité d'une levée, en fonction d'un type de pathologie et de contraintes environnementales. Un des autres objectifs de ce travail est de proposer des réflexions nouvelles grâce aux nombreuses références bibliographiques fournies. Cette étude propose également un grand nombre de liens entre les pathologies et observables physiques.

Liens entre pathologies et mécanismes menant à la rupture d'ouvrage hydraulique de protection

Pour prévenir la rupture d'une levée en terre, il est nécessaire de s'intéresser à ses propriétés physiques et caractéristiques. Les propriétés physiques dites « pathologiques » d'une digue peuvent être associées à plusieurs mécanismes menant à la rupture d'ouvrage (Figure 1). Les différents mécanismes considérés ici sont les mécanismes d'érosion interne (suffusion, érosion de contact, érosion de conduit et érosion régressive) et les mécanismes de glissement de talus.

Les relations entre les pathologies et les mécanismes menant à la rupture (Figure 1) ne sont pas nécessairement unidirectionnelles. Une forte perméabilité hydraulique mènera par exemple au développement de la suffusion ; mais ce mécanisme d'érosion interne conduira à son tour à

l'augmentation de la perméabilité hydraulique. La plupart des propriétés physiques du sol, au sein d'une levée, tendent vers des valeurs extrêmes au cours du développement des mécanismes de rupture, accélérant la modification des caractéristiques d'ouvrage.

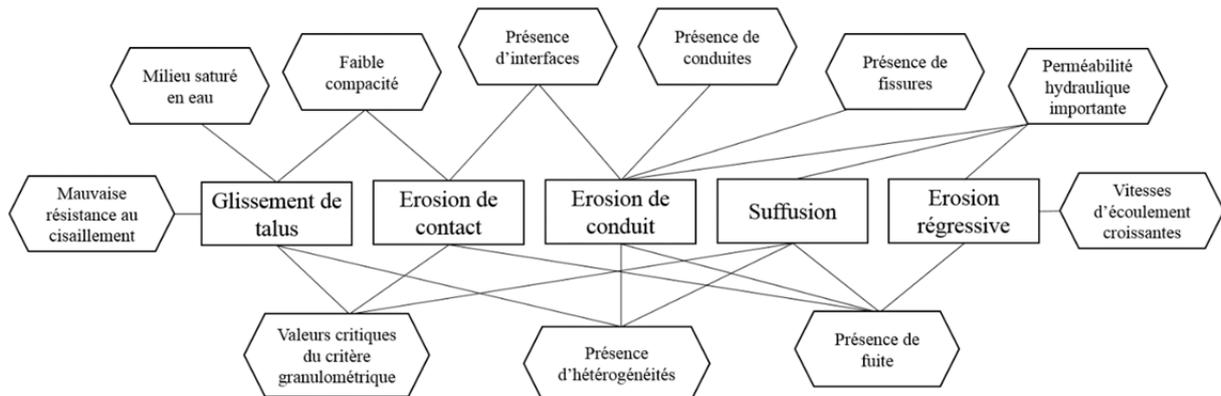


Figure 1. Diagramme présentant les liens entre les pathologies (hexagones) et les mécanismes pouvant mener à la rupture d'ouvrage (glissement de talus et quatre mécanismes d'érosion interne) (rectangles).

La complexité des phénomènes de rupture de digues est que plusieurs mécanismes peuvent en être à l'origine. Par conséquent, plusieurs pathologies sont en général impliquées dans les processus. Pour cette raison, il est nécessaire d'être capable de lier les méthodes d'investigation aux propriétés physiques du sol pouvant être estimées, ceci afin de caractériser correctement l'ouvrage étudié.

Exemple de prospection sur digue par méthode électrique

La tomographie de résistivité électrique (TRE) est une méthode géophysique classiquement utilisée pour la prospection des digues. Sa sensibilité à de nombreuses propriétés physiques et sa rentabilité (temps, coût) (Kumar, 2012) en font un bon exemple d'étude. Sur le même diagramme (Figure 2) sont représentées : les particularités de la méthode (vitesse d'acquisition, coût, profondeur d'investigation...) et sa capacité à évaluer les propriétés physiques des digues. Les épaisseurs des axes sont directement fonction de la forte ou faible capacité de la TRE à définir les propriétés des digues. Comme l'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre dépend des facteurs limitants et des conditions environnementales,

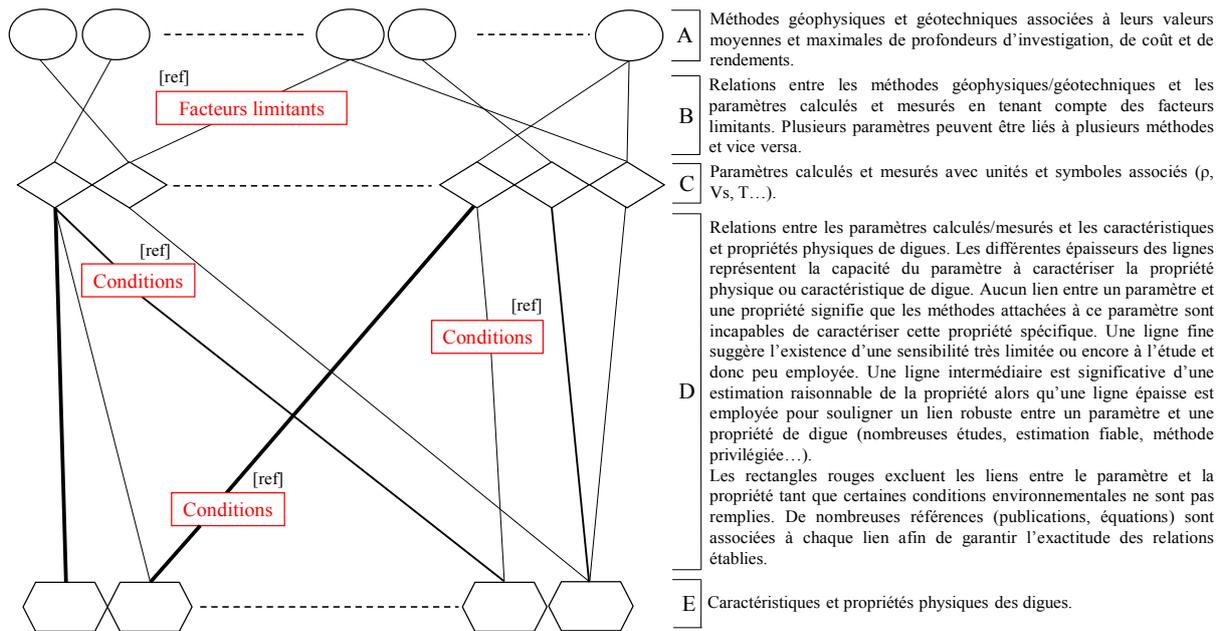


Figure 3. Diagramme généralisant la Figure 2, présentant la structure de base de données, liant diverses méthodes géophysiques et géotechniques à des propriétés de sols et caractéristiques d'ouvrages.

D'un côté, la mise en évidence de l'information peut permettre à l'utilisateur de retrouver certaines combinaisons conventionnelles de méthodes (ex. combinaison de TRE et de sondage CPT). D'un autre, la prise en compte de conditions environnementales ou de limites particulières (Figure 3D, rectangles rouges), peut faire ressortir des combinaisons moins évidentes de méthodes. En effet, l'utilisateur serait libre d'utiliser des critères de recherche en fonction de ses objectifs (profondeur d'investigation, vitesse d'acquisition, coût, fiabilité de la méthode...) ainsi que des conditions limitantes connues (présence de ligne haute tension, racines, structures enfouies, topographie...). Ainsi, pour une étude spécifique, les combinaisons de méthodes les plus appropriées ressortiraient avec des niveaux de pertinence et des références bibliographiques associés.

Conclusions

Ce travail, s'appuyant sur de nombreuses références bibliographiques, présente une nouvelle structure de base de données pour les digues de protection contre les inondations, en utilisant l'exemple de la TRE. La base de données complète devrait permettre aux agences et gestionnaires d'ouvrages de sélectionner, sous certaines conditions, des combinaisons appropriées de méthodes d'investigation. Ces choix de méthodes permettront d'estimer au mieux si les valeurs d'une ou de plusieurs propriétés physiques sont pathologiques, et si elles sont susceptibles de mener à la rupture de l'ouvrage. La représentation graphique, associée à la base de données, fournirait un aperçu rapidement compréhensible de la majorité des méthodes géophysiques et géotechniques utilisées dans le cadre de la prospection sur digues. Grâce à toutes les références bibliographiques incluses, cet outil pourrait s'avérer utile pour la communauté des chercheurs, mettant en évidence des combinaisons de méthodes rarement soulignées, et ouvrant de nouvelles voies de réflexion.

A l'avenir, cette structure pourrait être utilisée sous forme de plateforme participative, permettant aux chercheurs d'améliorer la structure des données en incluant plus de connaissances avec des références académiques associées. Afin de contraindre la modélisation d'ouvrages, nous initiions actuellement un travail basé sur la théorie des masses de croyance (Dempster, 1967), avec l'intention de prendre en compte un spectre plus large d'informations à fusionner telles que les inspections visuelles et les analyses d'échantillons. Ce travail permettra de prendre en compte à la fois (1) les incertitudes et (2) les imprécisions propres à chaque méthode de prospection et qui sont fonction de l'environnement. L'objectif étant de permettre la combinaison de données issues de sources hétérogènes, non uniformément réparties spatialement.

Références

- Abu-Hassanein, Z.S., Benson, C.H. and Blotz, L.R. [1996] Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**, 397–406.
- Archie, G.E. [1952] Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *Aapg Bulletin*, **36**, 278–298.
- Beck, Y.L. [2008] Evaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques: Application géotechnique, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M. and King, D. [2008] The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: Analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Science*, **173**, 707–720.
- Bièvre, G. [2007] Méthodes géophysiques pour la reconnaissance des digues des voies navigables. *Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales*.
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R. and Bosch, F.P. [2011] Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, **19**, 1169–1180.
- Dempster, A.P. [1967]. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. *Ann. Math. Stat.* **38**, 325–339.
- François, D., Mériaux, P. and Monnet, J. [2016] Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai. *Presses des Ponts : Publications IREX*.
- Huntley, D. [1986] Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers. *Ground Water*, **24**, 466–474.
- Karaoulis, M., Revil, A., Zhang, J. and Werkema, D.D. [2012] Time-lapse joint inversion of crosswell DC resistivity and seismic data: A numerical investigation. *Geophysics*, **77**, D141–D157.
- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. [2013] An introduction to geophysical exploration. *John Wiley & Sons*.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. [1966] Electrical methods in geophysical prospecting. *Pergamon Press Inc*.
- Kumar, D. [2012] Efficacy of electrical resistivity tomography technique in mapping shallow subsurface anomaly. *Journal of the Geological Society of India*, **80**, 304–307.
- Mériaux, P., Tourment, R. and Wolff, M. [2005] Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationale des ouvrages. *Ingénieries-EAT, Special issue*, 15–21.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A. and Bruand, A. [2003] Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 1319–1326.

Mots-clés

Combinaison ; méthodes géophysiques ; méthodes géotechniques ; digues ; TRE



Apports d'une maquette de digue pour l'intégration des méthodes géophysiques aux diagnostics de sûreté des ouvrages hydrauliques en remblai : l'exemple de la résistivité

Christophe Vergniault, EDF CEIDRE TEGG, 905 avenue du camp de menthe, 13097 Aix en Provence, christophe.vergniault@edf.fr

Barthélémy Steck, EDF R&D, 6 quai Watier, 78400 Chatou, barthelemy.steck@edf.fr

Jean-Robert Courivaud, EDF CIH, Savoie technolac, 73373 Le Bourget du Lac, jean-robert.courivaud@edf.fr

Gratien Vincelas, CEREMA, 10 chemin de la poudrière, 76121 Le Grand Quevilly, gratien.vincelas@cerema.fr

Abstract

Geophysical methods could be useful for dyke investigations but we must know the limitations of these methods for each use case. In this paper we present a methodology based on a dyke mock up, dedicated to leakage detection, and the results obtained with electrical resistivity tomography.

1 Contexte

En tant qu'exploitant, EDF doit garantir à la fois la performance de ses installations hydrauliques et le niveau de sûreté de celles-ci. Les études menées depuis de nombreuses années sur la surveillance et l'auscultation des digues par méthodes géophysiques (par exemple [François2016], [Jodry2016]) ont permis de définir un protocole d'étude mis en œuvre dans le cadre des diagnostics de sûreté sur les digues en remblai. Les acquisitions géophysiques se déroulent en 2 temps (globales et à grand rendement, puis locale avec une maille plus fine).

En parallèle et en conformité avec les recommandations de l'AFTES sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques (GT32.R2F1, 2012), EDF a développé une capacité de contrôle de la qualité des données brutes et d'interprétation pour les méthodes géophysiques les plus usuelles en géotechnique, afin de valider tous les résultats exploités. L'expertise des données, ainsi que la cohérence des résultats avec les observations (inspections visuelles) soulèvent encore un certain nombre de questions sur les limites de certaines méthodes, les pratiques de mise en œuvre et d'analyse. EDF a donc souhaité disposer d'une maquette en environnement contrôlé, avec des infiltrations, pour :

- élaborer une méthodologie de mise en œuvre des méthodes géophysiques (principalement des méthodes électriques et acoustiques) pour la détection d'infiltration, en évaluant les performances, les paramètres influents,
- déterminer les gammes d'application des différentes méthodes géophysiques,
- comparer voire coupler différentes méthodes géophysiques,
- valider des codes d'inversion numérique par l'obtention de données expérimentales consolidées,
- tester de nouvelles méthodes géophysiques

L'objet de cet article est de montrer les apports d'une étape de validation des méthodes en environnement contrôlé pour le développement d'une méthodologie globale de mise en œuvre des mesures géophysiques, en se focalisant sur les résultats obtenus sur la mesure de résistivité électrique. Cet environnement contrôlé peut être un site dédié bien connu comme dans [Bièvre2017] ou une maquette représentative d'un phénomène précis.

2 Présentation de la maquette de digue

L'ouvrage a été conçu conjointement par EDF et le CER et réalisé par le CER. Il est géométriquement représentatif de certains ouvrages du parc EDF et dispose d'infiltrations contrôlées (cf. Figure 1). Ces infiltrations sont établies par un contraste de perméabilité entre un cheminement déterminé et l'encaissant et le débit de fuite associé est lié à la charge hydraulique. L'ouvrage dispose de deux zones d'infiltrations permettant de couvrir des débits de l'ordre de quelques litres par minute. La digue

construite a une longueur de 22 m, une hauteur de 3 m et un fruit de 2/1 ; le réservoir quant à lui peut avoir une charge maximale de 2 m.

De plus, l'ouvrage est instrumenté, ce qui permet d'avoir sa température intérieure (par levée et en 3D par fibre optique) et sa teneur en eau sur différentes levées. Une station météo permet également d'avoir les paramètres d'environnement.

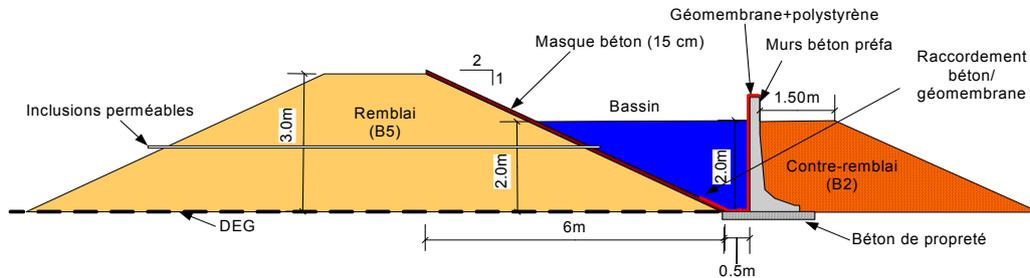


Figure 1 : Plan de coupe de la maquette de digue

Ainsi, une telle maquette peut permettre d'étudier les potentialités de différentes méthodes géophysiques dans le cas d'applications sur digue et plus spécifiquement sur la détection de fuites. On peut également tester de nouveaux protocoles de mesure et des couplages entre méthodes de physiques différentes.

3 Analyse des résultats de résistivité électrique

Parmi les différentes méthodes testées, cet article se focalise sur les mesures de résistivité électrique. Lors de cette étude, deux codes d'inversion commerciaux ont été utilisés : Res2DInv et ERTLab. Le premier ne permettant qu'une analyse purement 2D et l'insertion d'interfaces en a priori alors que le second permet la prise en compte d'effet 3D et d'a priori un peu plus complexes, mais pour un temps de calcul plus long.

3.1 Etude du contact

Le premier aspect étudié concerne l'étude du contact. En effet, que ce soit en fonction de la nature du terrain ou pour une utilisation en time lapse, le contrôle de la résistance de contact est important pour pouvoir interpréter correctement les mesures. De la même façon que dans [Athanasidou2007] et [Lutz2010], et en lien avec Georeva France, nous avons comparé des mesures faites avec des électrodes plantées classiquement et des électrodes plates de côté 20 cm, soit 1/10 de l'espacement inter-électrodes. Sur un terrain graveleux, la différence de résistance de contact entre les deux est assez importante (cf. Figure 2). Il faut noter qu'en fonction du milieu le temps de mise en œuvre est équivalent voire plus rapide que de planter des électrodes avec une pénibilité moindre.

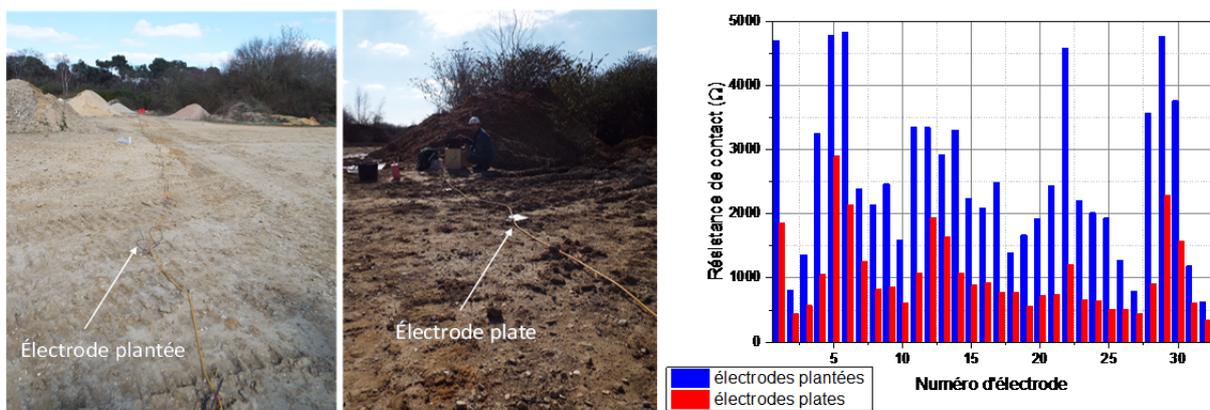


Figure 2 : comparaison des résistances de contact entre électrodes plantées et électrodes plates

Dans une telle configuration, nous avons comparé les résultats des profils inversés par Res2DInv et comme le montre la Figure 3, les pseudo sections sont équivalentes. Etant donnée la dimension des

électrodes plates, cela semble cohérent. En effet, les électrodes plates font 1/10^{ème} de l'espacement inter électrode or le maillage choisi sur Res2DInv est 1/4 de cet espacement, nous confirmons donc que l'hypothèse d'injection ponctuelle reste vérifiée.

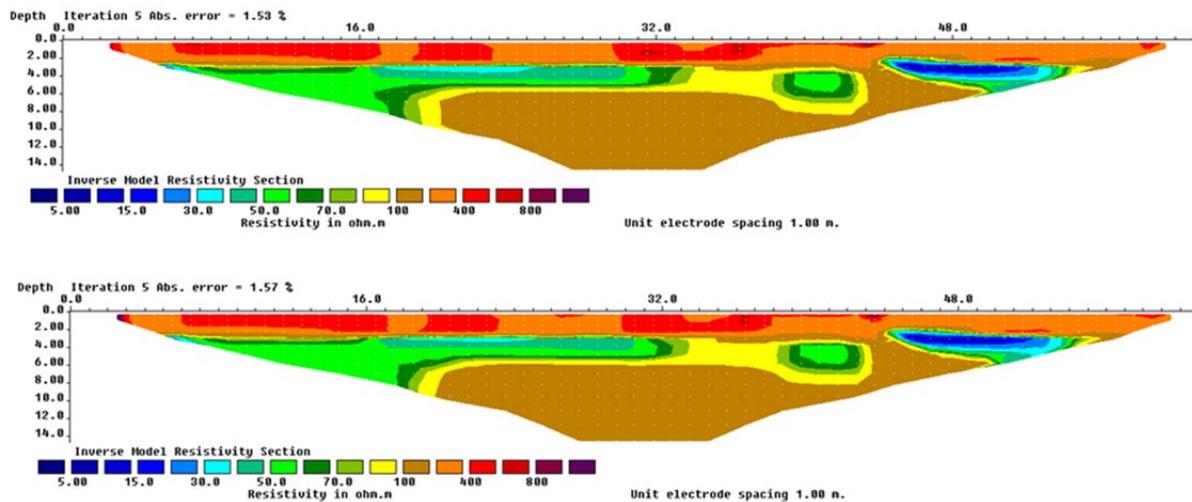


Figure 3 : Pseudo section inversée par Res2DInv. En haut, avec les électrodes plantées, en bas avec les électrodes plates

3.2 Influence de la topographie et du réservoir

A la suite des travaux de [Fargier2011], la maquette a permis de tester la prise en compte de la topographie et du réservoir sur l'inversion des données TRE.

Dans un premier temps, nous avons effectué un profil longitudinal sur trois lignes : une au centre de la crête (profil 1), une à 20 cm du bord de la crête côté réservoir (profil 3) et une dernière à 20 cm du bord de la crête du côté opposé (profil 2). Les inversions ont tout d'abord été réalisées en 2D sans prise en compte de la topographie. La Figure 4 montre l'écart relatif dans cette approche entre le profil du milieu de la crête et ceux des bords.

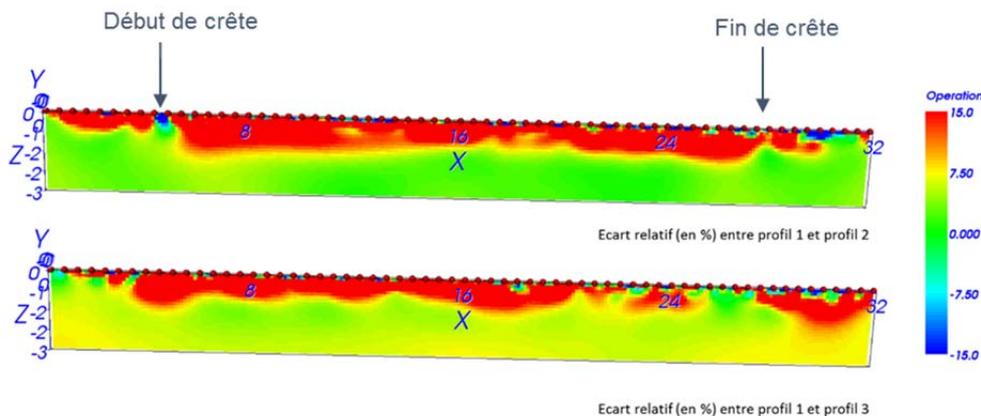


Figure 4 : écart relatif entre les pseudo-sections sur les bords de la crête et celle au centre, inversées sans prise en compte de la topographie (inversion ERTLab).

Dans un second temps, les inversions ont été réalisées en prenant en compte la topographie 3D de la digue. Le profil central est similaire à la première inversion et il n'y a plus d'écart entre les trois profils avec cette approche.

Ainsi, nous concluons que pour le profil central, il n'y a pas d'effet de topographie alors qu'à une distance d'une modification topographique inférieure à l'espacement inter électrode, il y a un effet et il faut la prendre en compte dans l'inversion.

De plus, il n'y a pas d'écart significatif entre les profils 2 et 3. Le réservoir, dans la configuration de la maquette de digue (à savoir un remblai d'environ 100 $\Omega \cdot m$ et une eau à 20 $\Omega \cdot m$), n'a donc pas d'effet sur la mesure TRE.

3.3 Application pour la détection de fuites

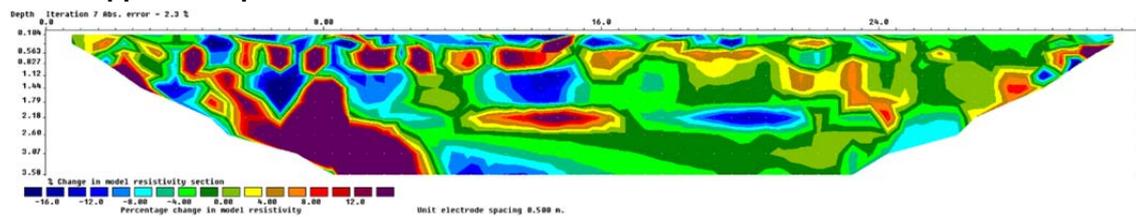


Figure 5 : écart relatif des pseudo-sections (sous Res2DInv) entre un profil avec fuite et un profil sans fuite

Ainsi, dans les configurations de la digue CER, à savoir une fuite assez ponctuelle (10 cm à 2.7 m de profondeur) et guidée et un contraste de résistivité entre le sol et l'eau assez faible (un ratio de l'ordre de 4), la fuite ne peut pas être détectée par une unique mesure TRE. Un couplage avec d'autres méthodes ou une mise en œuvre d'un traçage (saumure, thermique) est donc nécessaire pour établir la présence de zones de fuites.

4 Conclusion sur les perspectives d'emploi de la maquette

La construction et l'exploitation d'une maquette ont permis de disposer d'un environnement contrôlé permettant de tester les performances de plusieurs méthodes géophysiques.

Sur l'exemple de la résistivité électrique montré dans cet article, cette maquette permet à EDF d'affiner ses recommandations de mise en pratique de la méthode sur ses ouvrages. En particulier, on peut noter la possibilité d'utiliser des électrodes plates, une condition entre la largeur de la crête et l'espacement inter électrode pour la prise en compte de la topographie.

Une perspective d'utilisation de la maquette est de l'utiliser en tant que cas maîtrisé pour valider des modélisations numériques de certaines méthodes géophysiques, ce qui permettrait d'exploiter ces modélisations pour la transposition maquette/site réel à partir d'un nombre déterminé de données d'entrée (en particulier pour le potentiel spontané et la mise au potentiel).

5 Bibliographie

- [Athanasidou2007] E. Athanasidou et al., «Non destructive DC resistivity surveying using plate-base electrodes,» *Near surface geophysics*, pp. 273-282, 2007.
- [Bièvre2017] G. Bièvre et al., «Integration of geotechnical and geophysical techniques for the characterization of a small earth-filled canal dyke and the localization of water leakage» *Journal of applied geophysics*, vol 135, pp. 1-15, 2017.
- [Fargier2011] Y. Fargier, Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre, *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, 2011.
- [Francois2016] François D. et al., Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai, Projet ERINOH, Presses des ponts, 2016.
- [Jodry2016] C. Jodry, Développements méthodologiques pour l'imagerie et le suivi temporel par méthodes géoélectriques des structures de protection contre les inondations fluviales ou les submersions marines, *Thèse de doctorat*, Université Nantes Angers Le Mans (Unam), 2016.
- [Lutz2010] P. Lutz et L. Zourhi, «A comparison of peak and plate electrodes in electrical resistivity tomography: application to the chalky groundwater of the Beauvais aquifer,» *Hydrological processes*, vol. 24, pp. 3040-3052, 2010.

Mots clés : résistivité électrique, digue, inversion, maquette

Surveillance d'une digue maritime par écoute du bruit de fond sismique au cours d'un cycle de marée

Anaëlle Joubert, Mathieu Le Feuvre, Philippe Côte
anaelle.joubert@ifsttar.fr ; mathieu.le-feuvre@ifsttar.fr ; philippe.cote@ifsttar.fr

IFSTTAR / GERS

Introduction

Suite à de récents événements climatiques de grande ampleur, la protection des ouvrages à la mer est devenue une thématique prioritaire des politiques publiques. En effet, peu de dispositifs permettent la détection précoce de phénomènes d'érosion interne et dans la plupart des cas, les gestionnaires ont recouru à l'inspection visuelle. Des méthodes de tomographie par résistivité électrique ou des analyses de variation de température par fibre optique sont parfois implantées sur des sites sensibles, mais ces analyses restent occasionnelles.

Nous proposons une méthode de sismique passive utilisant les ondes de surface générées par la houle et le ressac lors du contact avec la structure dans le but d'en mesurer les propriétés mécaniques internes. L'acquisition est réalisée au moyen d'un dispositif d'enregistrement continu des ondes sismiques, positionné linéairement en crête de digue.

Les ondes de surface sont de plus en plus utilisées pour des applications de surveillance, notamment parce que, sous certaines conditions, leur très grande énergie permet de reconstruire facilement la réponse impulsionnelle du milieu de propagation par inter-corrélation du bruit sismique ambiant. En effet, dans le milieu de la sismologie, Shapiro et Campillo [2004,2005] ont montré que l'inter-corrélation du bruit sismique diffus convergeait vers la fonction de Green du milieu. Le Feuvre et al. [2015], ont montré que l'utilisation du bruit généré par le choc des vagues sur une digue était pertinent pour son diagnostic, en terme de contenu fréquentiel, de répartition spatiale des sources de bruit et de leur contenu énergétique. Parallèlement à ces travaux, Planès et al. [2016] ont utilisé l'inter-corrélation de bruit d'origine anthropique pour l'étude des variations relatives de vitesse des ondes de surface dans un corps de digue durant un cycle de marée. Lors de la montée de l'eau sur la structure, les zones potentiellement affectées par de l'érosion sont plus perméables et laissent pénétrer l'eau dans le corps de digue. Ceci modifie les propriétés de propagation des ondes, par exemple leur vitesse. Ainsi, les variations de vitesse observées ont été mises en relation avec des fuites d'eau visibles.

Nous montrons ici qu'il est possible d'utiliser le bruit des vagues pour réaliser le suivi mécanique à la fois du corps d'ouvrage et de son substratum, à l'échelle d'un cycle de marée. La structure étudiée, une digue en terre protégée par un parement empierré, se situe dans la baie de Bourgneuf, sur la côte Atlantique.

Méthode

Inter-corrélation des données

Nous avons montré que 10 minutes d'enregistrement suffisait à atteindre une fonction d'inter-corrélation stable, l'enregistrement est donc subdivisé en segments de 10 minutes. Les fonctions d'inter-corrélation sont calculées pour toutes les paires de capteurs, soit 552 signaux pour chaque segment de 10 minutes.

Le processus appliqué avant l'inter-corrélation inclut un blanchiment des données afin de compenser les éventuelles variations d'énergie de la source.

La [figure 1a](#) montre un exemple de 10 minutes d'enregistrement et la [figure 1b](#) présente un exemple d'inter-corrélation des données, sommées par distance équivalentes entre les capteurs. Nous remarquons que l'onde de surface est bien reconstruite, et que les parties causales et anti-causales sont relativement symétriques, ce qui est un indice de la bonne reconstruction de la fonction de Green. Néanmoins, nous soulignons le fait que la parfaite reconstruction de la fonction de Green n'est pas indispensable pour des applications de surveillance, par contre la stabilité spatiales des sources de bruit est nécessaire.

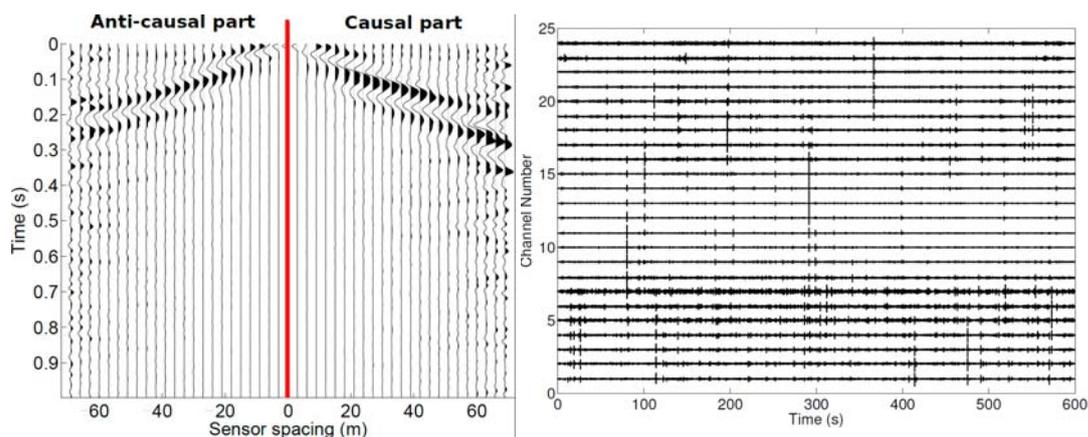


Figure 1 : gauche : enregistrement de 10 minutes de bruit sismique à marée haute, par 24 capteurs positionnés en crête de digue. droite : résultat de l'inter-corrélation entre toutes les paires de capteurs, sommées par distance équivalentes.

Mesure de variations relatives de vitesse

Les fonctions d'inter-corrélation sont utilisées pour le calcul du diagramme de dispersion, permettant de définir des bandes de fréquences pertinentes pour l'analyse du corps de digue ou de son substratum. Les signaux sont filtrés puis fenêtrés afin d'isoler les ondes de surface directes sur lesquelles seront calculées les variations relatives de vitesse. Nous calculons le délai δt entre les inter-corrélations fenêtrées (figure 2) et une inter-corrélation choisie à un temps de référence. Ce temps de référence est défini comme le début du contact entre la mer et la digue.

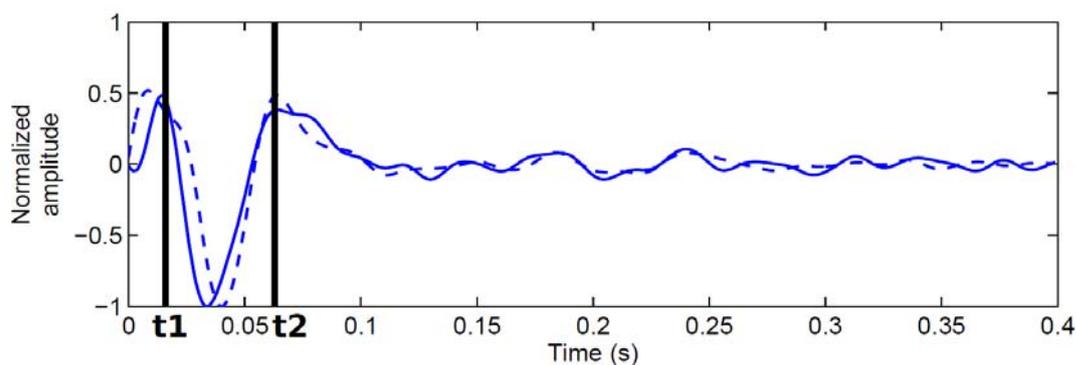


Figure 2 : Fenêtrage de la fonction d'inter-corrélation calculée pour une paire de capteurs à deux temps différents, en pointillé : le temps de référence, en trait plein : à marée haute.

Mesure de variation d'atténuation

Nous avons observé que l'amplitude des ondes reconstruites variaient dans le temps (figure 3). Afin de suivre leur évolution, nous avons choisi d'estimer l'atténuation des ondes de surface pour des distances de propagations équivalentes et à des temps différents, en calculant la différence entre le coefficient d'atténuation à un temps 't' et celui au temps de référence.

L'intérêt principal de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir des résultats directement en fréquence, permettant une meilleure estimation des profondeurs investiguées.

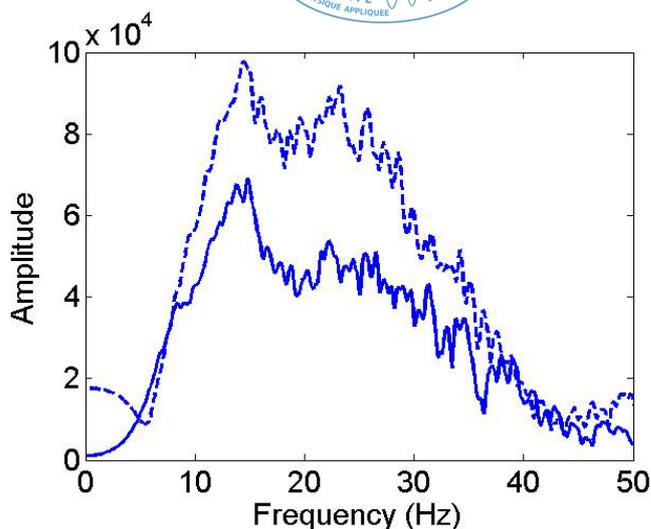


Figure 3 : amplitude spectrale des ondes reconstruites, à deux temps différents, en trait plein : le temps de référence, en pointillé : à marée haute.

Discussion et résultats

Le temps de référence étant le niveau le plus bas sur la digue, la [figure 4](#) montre les variations relatives de vitesse calculées à marée haute, pour une bande de fréquence comprise entre 5 et 15 Hertz. L'axe des abscisses correspond au centre de chaque paire capteurs et l'axe des ordonnées correspond à leur espacement. Cette représentation permet de visualiser l'ensemble des résultats obtenus à chaque temps.

Nous observons une diminution de la vitesse de propagation des ondes de surface, principalement dans la deuxième partie du profil, entre $x=30\text{m}$ et $x=50\text{m}$. L'évolution temporelle en deux points de cette zone est montrée [figure 5](#), en fonction du niveau de la mer. La vitesse décroît environ de 4 % quand le niveau d'eau est le plus haut et retourne à sa valeur initiale en fin de cycle.

La [figure 6](#) présente, également pour la marée haute, les variations du coefficient d'atténuation, calculés pour chaque paire de capteurs espacé de 6 mètres. L'axe des abscisses représente le centre de la paire considérée. Nous observons une zone de variation cohérente avec la zone définie par le calcul des variations de vitesse, qui, de plus, évolue de façon graduelle avec le niveau de la mer.

Les deux méthodes de calcul mettent en évidence une zone de variation importante en vitesse et en atténuation sur la seconde moitié du dispositif, que l'on peut interpréter comme la conséquence d'une pénétration d'eau lors de l'augmentation du niveau marin sur la structure. Cette interprétation est cohérente avec l'observation d'une fuite d'eau sur le parement de la digue quand la mer se retire.

Nous proposons une interprétation mécanique de nos résultats : la pénétration d'eau augmente la pression interstitielle et diminue la contrainte effective dans le milieu ainsi que le module de cisaillement (Santamarina, 2001), diminuant la vitesse des ondes de cisaillement et donc celle des ondes de surface.

Les résultats obtenus en atténuation requièrent une analyse plus approfondie.

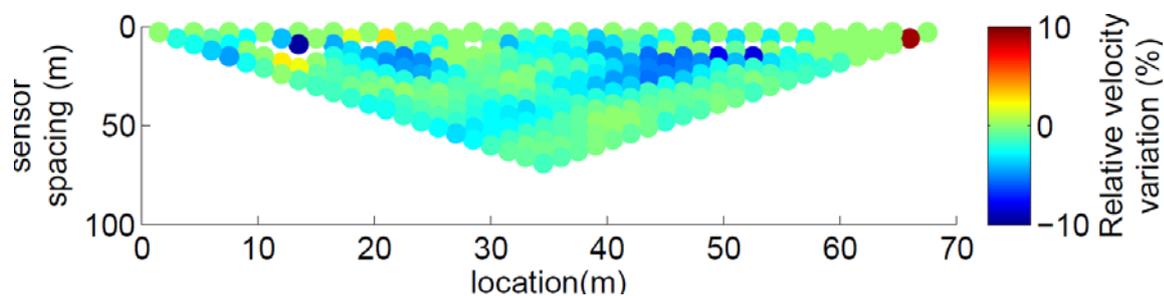


Figure 4 : résultats des variations relatives entre le temps de référence et la marée haute. L'axe des abscisses représente le centre de chaque paire, l'axe des ordonnées, l'espacement entre les capteurs.

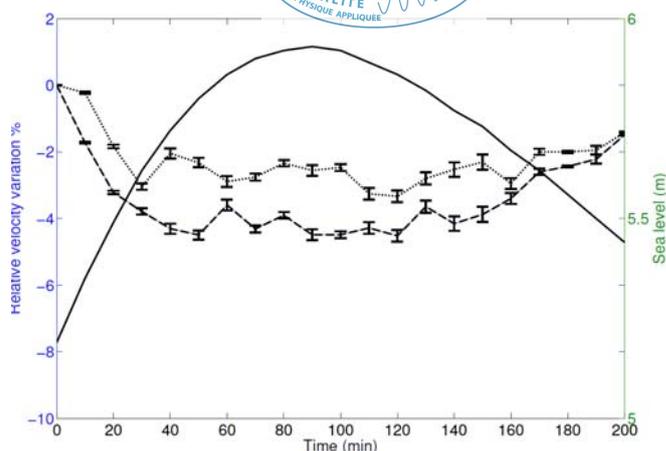


Figure 5 : visualisation des variations relatives de vitesse de deux points de la pseudo-section (figure 4), en fonction de la hauteur d'eau.

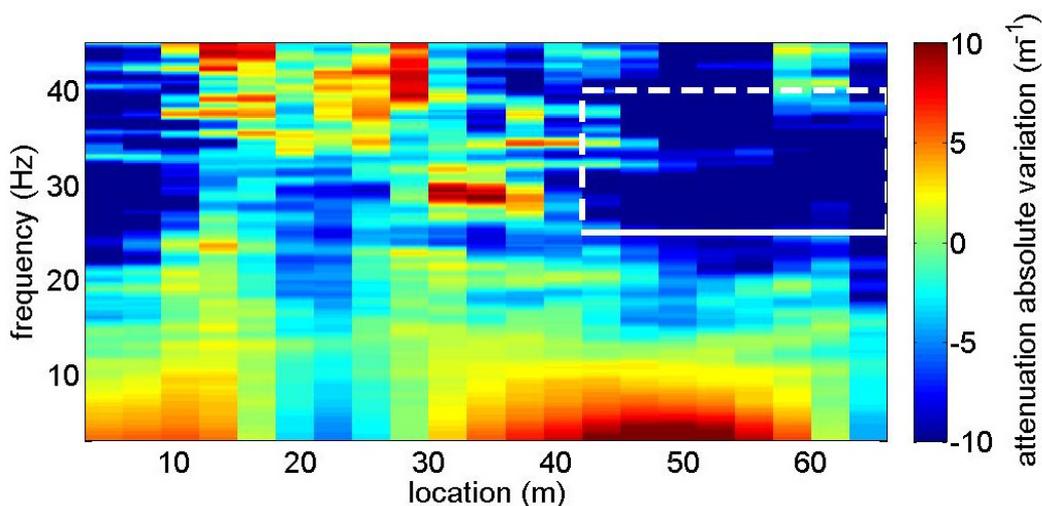


Figure 6 : différences d'atténuation calculées pour des paires espacées de 6 mètres.

Conclusion

Notre expérience a montré qu'il était possible d'utiliser le bruit sismique induit par la houle et le ressac pour surveiller les défenses côtières. En effet, seulement 10 minutes d'enregistrement suffisent à reconstruire une fonction d'inter-corrélation stable dans une bande de fréquence pertinente. Les variations calculées en vitesse et en atténuation sont interprétées comme la conséquence d'une infiltration d'eau. L'application du calcul des atténuations permet d'obtenir des résultats nouveaux directement dans le domaine fréquentiel.

La relation précise entre fréquences mesurées et profondeur est à l'étude, notamment au travers de modélisations numériques, et permettra d'inverser les variations mesurées. Des systèmes de surveillance à long-terme sont par ailleurs en cours de test, afin de détecter le plus tôt possible des signes d'érosion interne et de permettre une meilleure compréhension du vieillissement des structures côtières.

Références :

Le Feuvre, M., Joubert, A., Leparoux, D. and Côte, P. [2015] Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 36–51.

Planès, T., Rittgers, J.B., Mooney, M.A., Kanning, W. and Draganov, D. [2017] Monitoring the tidal response of a sea levee with ambient seismic noise. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 255 – 263.

Santamarina, J.C., Klein, A. and Fam, M.A. [2001] Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1(2), 130–130.

Shapiro, N.M. and Campillo, M. [2004] Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7), n/a–n/a. L07614.

Shapiro, N.M., Campillo, M., Stehly, L. and Ritzwoller, M.H. [2005] High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise. *Science*, 307(5715), 1615–1618.

La sismique par ondes de surface appliquée aux barrages en remblai et aux digues

Christophe Vergnault :

EDF-CEIDRE-TEGG

christophe.vergnault@edf.fr

Adnand Bitri :

BRGM

a.bitri@brgm.fr

Au gré de leurs projets respectifs, EDF et le BRGM ont mené séparément des travaux sur la méthode de reconnaissance MASW appliquée sur des digues, à partir d'un retour d'expérience de plusieurs cas d'étude pour le premier et à partir d'une série de modélisations pour le second. Il s'avère que ces travaux convergent et sont complémentaires. En effet, les constats à partir des données réelles de l'un, sont expliqués par les modélisations de l'autre et vice et versa.

1 Généralités sur la méthode

Les ondes de surface sont classiquement utilisées pour déterminer un profil vertical des vitesses de cisaillement de façon non invasive (profil 1D de Vs). De plus, la succession de profils 1D en onde de cisaillement peut permettre de cartographier des évolutions relatives longitudinales de la rigidité des terrains sous-jacents (pseudo 2D). En s'appuyant sur un certain nombre d'informations externes pour contraindre le modèle, le log Vs 1D peut également être exploité pour des calculs de stabilité statique et dynamique. Plusieurs retours d'expériences permettent d'évaluer qu'en moyenne le résultat à une fiabilité de +/- 20% jusqu'à 30 m.

Le principe de la méthode consiste à générer un choc en compression à la surface du sol. Les ondes de Rayleigh vont alors se propager à proximité de la surface du sol et vont être enregistrées par la chaîne de récepteurs (géophones verticaux). L'analyse de leurs vitesses de phase dans le domaine fréquentiel (diagramme de dispersion) va permettre de calculer un ensemble de vitesses sismiques S du sous-sol par une opération itérative d'inversion. En MASW, le milieu du groupe de récepteurs dont les enregistrements sont analysés est le point d'application du profil vertical des vitesses de cisaillement (log Vs).

Le dispositif terrain est composé d'un enregistreur sismique relié à un câble sur lequel sont disposés de 24 à 96 géophones à la surface du sol. Il est à noter que ce dispositif permet également d'enregistrer les ondes réfractées (Vp), mais avec une profondeur d'investigation plus faible pour un même linéaire de flûte. En effet, la profondeur d'investigation d'un dispositif de sismique réflexion peut être approximée à $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de la longueur de la flûte d'enregistreur contre $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ pour les ondes de surface.

2 Constat d'EDF à partir d'analyse MASW sur des digues

2.1 Observations

L'exemple choisi pour illustrer certains résultats de MASW sur les digues a été acquis sur un barrage d'altitude en remblai de 15 m de haut (large de 3 m en crête et 15 m à la base). Les mesures par ondes de surface ont été réalisées en mode passif et actif, suivant un profil en crête (cf. figure 1), composé de 24 géophones espacés de 2 m.

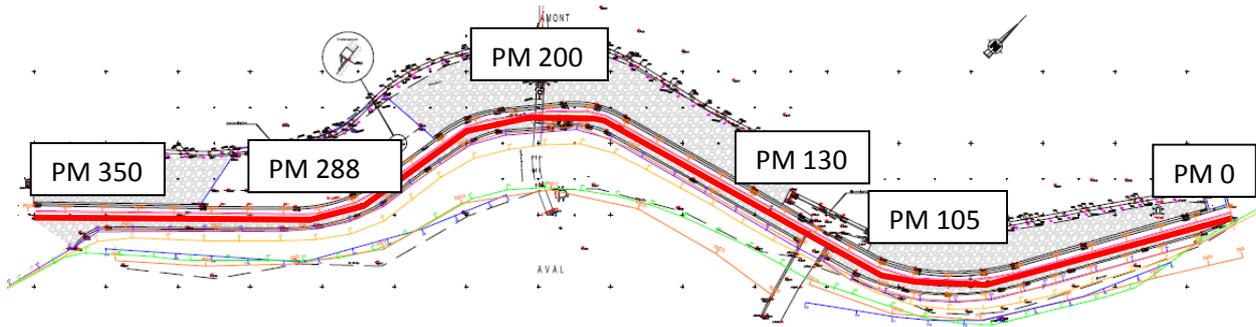


Figure 1 : Vue de dessus du barrage, avec la localisation des différents profils (rouge profil MASW en crête)

Intéressons-nous au profil 1D réalisé dans une portion rectiligne de l'ouvrage, au Point Métrique 288 (PM 288), où le contact avec le substratum est plus ou moins plan. Le diagramme de dispersion du profil MASW à ce PM 288 (cf. figure 2a) permet de constater une faible continuité de l'énergie du mode fondamentale au-delà de 30 Hz et une amplification ponctuelle d'autres modes, potentiellement harmoniques. En raison de ces sauts d'énergie, les pointés des fréquences supérieures à 30 Hz est bien souvent impossible, soit bien avant d'atteindre la limite en lien avec l'aliasing spatial du dispositif ($\lambda_{min}=2\Delta x$). En mode passif, bien qu'ils ne semblent pas aussi marqués, ces sauts existent ce qui écarte tout lien avec des effets de champ proche (cf. figure 2b).

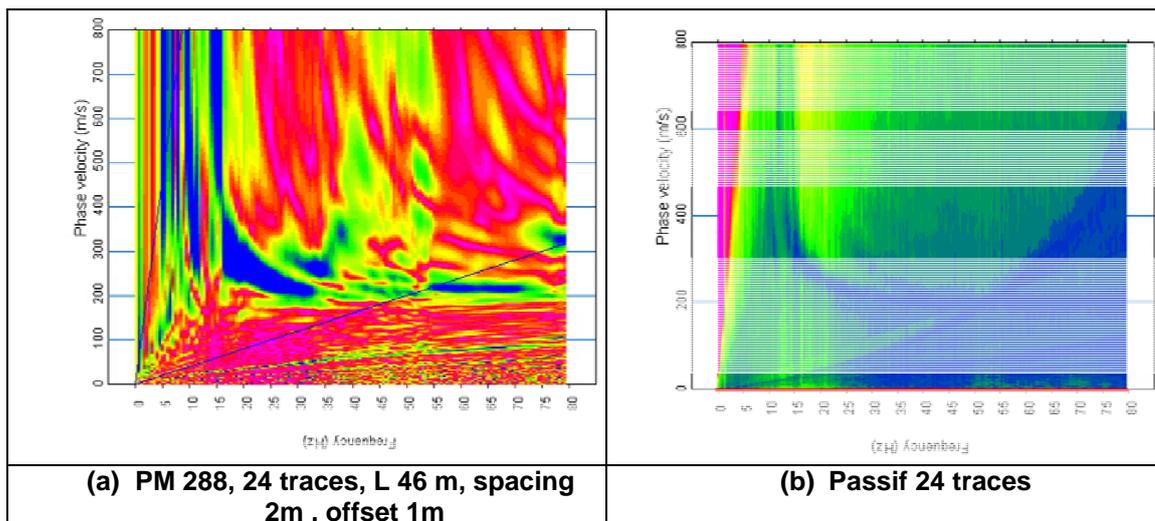
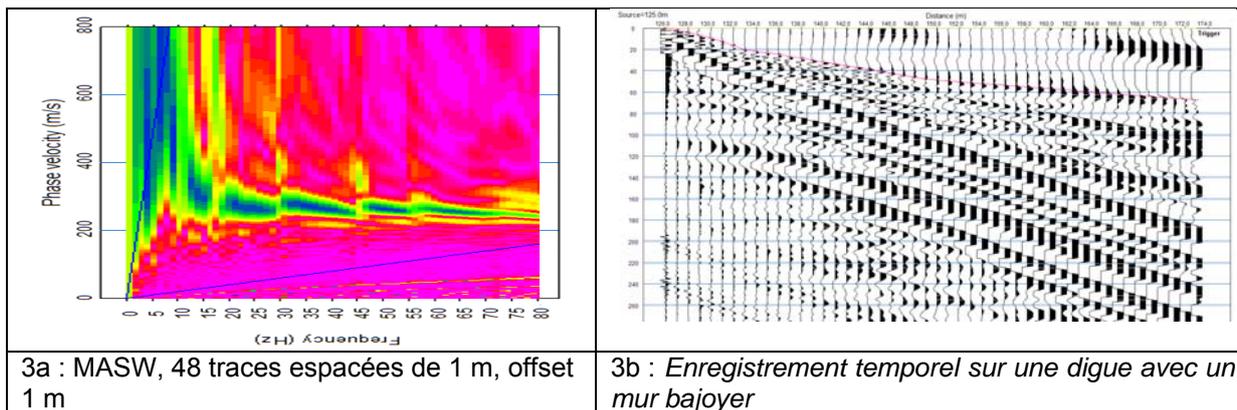


Figure 2 : Diagramme de dispersion au PM 288 en mode actif (a) et passif (b)

Un autre exemple sur une autre digue en remblai d'une vingtaine de mètre de haut et 10 m de large en crête, mais dont le parement amont est un bajoyer vertical en béton armé, montre une signature plus amplifiée du phénomène de dominance des modes pseudo-harmoniques dans le domaine fréquentiel. Dans ce cas d'étude, même l'acquisition passive est fortement affectée. La visualisation du signal dans le domaine temporel (cf. figure 3b) permet d'identifier des arrivées réfléchies, matérialisant l'existence d'échos latéraux affectant les ondes de volume. A ce niveau, on ne peut que suspecter que les échos observés dans le domaine temporel impactent également les ondes de Rayleigh et donc le diagramme de dispersion.



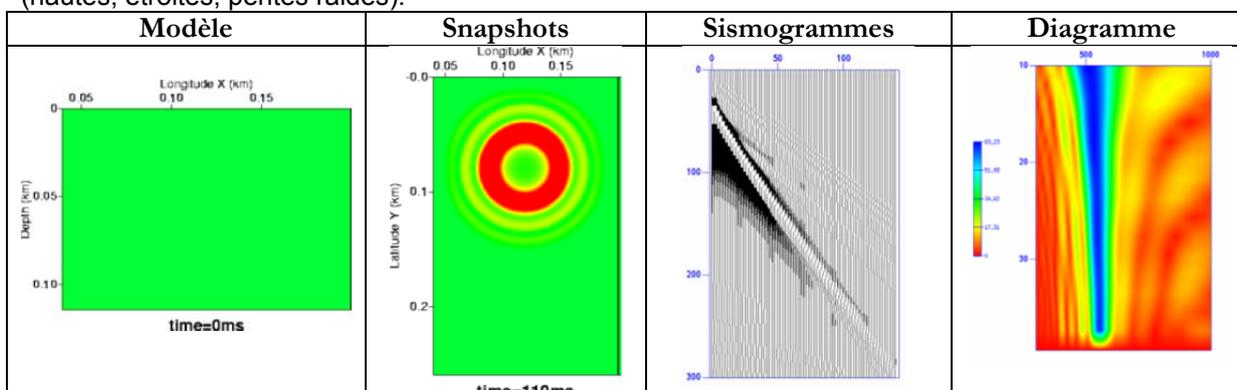
3 Modélisation faite par le BRGM de mesures MASW sur des digues

Les travaux présentés sont ceux de Adam Naylor réalisés durant son stage de Master 2 d'IsTerre (tutelle S. Garambois) au sein du BRGM (tutelle : P. Jousset et A. Bitri). Quatre modèles synthétiques de propagation d'ondes dans des milieux élastiques hétérogènes 3-D ont permis d'étudier l'effet de la topographie : le modèle homogène sans topographie (cf. figure 5 ligne 1), le modèle homogène avec topographie (cf. figure 4 ligne 2), le modèle hétérogène sans topographie (cf. figure 5 ligne 3), et le modèle hétérogène avec topographie (cf. figure 4 ligne 4). La simulation des tirs et enregistrements en lien avec ces modèles a été générée avec le code EFD3D- WPMP (Elastic Finite Difference 3-D Wave Propagation Modelling Package) développé par P. Jousset en 2006. Dans un deuxième temps l'influence des paramètres géométriques de la digue a été également étudiée. Les résultats clefs pour des enregistrements en crête de digue sont présentés sur la figure 4.

La série d'image du front d'onde (cf. figure 4, colonne 2), 110 à 120 ms après le tir, montre que lorsque le milieu est homogène, le front s'ovalise suivant l'axe de la digue mais les ondes énergétiques arrivent quasiment à la même position avec et sans topographie. Lorsque le milieu à 2 couches, les ondes de surface semblent piégées dans la digue qui joue le rôle de guide d'ondes.

La série des sismogrammes (cf. figure 4, colonne 3), montre que lorsque le milieu est homogène, la topographie se traduit juste par une amplification de l'onde directe (cf. phénomène est accentué pour des digues étroites). Lorsque le milieu à 2 couches, d'autres ondes apparaissent en arrière-plan du cône d'onde de surface et elles interfèrent avec elles en présence d'une structure topographique (échos, modes supérieurs ?).

La série des diagrammes de dispersion (cf. figure 4, colonne 4), montre que lorsque le milieu est homogène, la topographie influence quasiment pas le diagramme de dispersion, sauf en amplitude (ce phénomène est accentué par des fortes pentes). Lorsque le milieu à 2 couches, 2 modes sont identifiables sur le diagramme de dispersion et la topographie semble amplifier l'énergie du mode supérieur au détriment du mode inférieur. Ce phénomène est amplifié par des digues élancées (hautes, étroites, pentes raides).



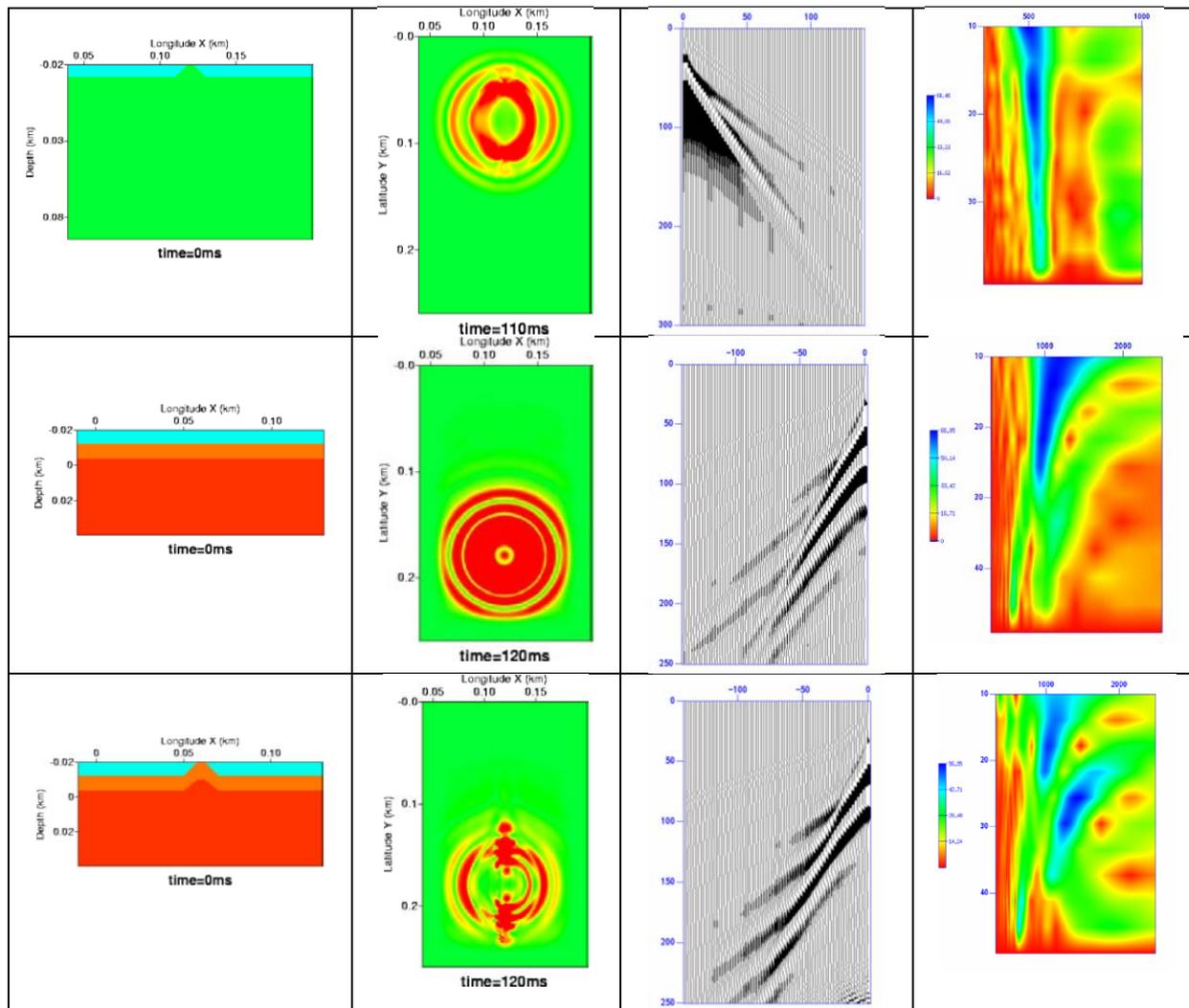


Figure 4: 4 Modèles étudiés et leurs résultats clés (respectivement image du front d’ondes, sismogramme, diagramme de dispersion)

4 Conclusion

Sur les digues et barrages, les mesures MASW sont bien affectées par des effets 3D, qui se traduisent par une amplification ponctuelle d’autres modes, (échos, harmoniques). Ce point est relativement peu pénalisant pour des structures modérément élancées, mais peut rendre l’analyse impossible pour des structures très élancées (noyau, bajoyer vertical). Par ailleurs, en raison de ces sauts d’énergie, le pointé des plus hautes fréquences est bien souvent impossible même avant d’atteindre la limite en lien avec l’aliasing spacial du dispositif ($\lambda_{min}=2\Delta x$). En conséquence, sur les digues, bien souvent la fiabilité du résultat MASW sur les 3 à 5 premiers mètres peut être mise en doute et potentiellement beaucoup plus si la structure est élancée. L’interpréteur doit donc prendre en compte ce phénomène. Il est à noter que ces sauts d’énergie existent évidemment en mode passif, mais ne semblent pas aussi marqués. La redondance de mesures MASW acquises de différentes manières (MASW actif avec tirs aux deux bouts pour confirmer l’hypothèse que le sous-sol est tabulaire, MASW passive pour confirmer l’absence d’effet notable lié au champ proche) reste donc la meilleure façon de fiabiliser l’analyse des données. D’une façon plus globale, on constate que bien souvent les méthodes géophysiques ont été développées pour une finalité première très différente des nouveaux cas d’application émergeant au cours du temps. Ceci nécessite de s’interroger en continu sur la validité de la méthode vis-à-vis du cas étudié. D’ailleurs, cet exemple confirme qu’en amont des campagnes géophysiques de toutes natures, il est souhaitable de simuler la réponse, spécifique à la structure étudiée, de la méthode géophysique devant être mise en œuvre pour aider au design de la campagne, voire à l’écartement d’une méthode.

Imagerie du contact d'un barrage avec sa fondation, par un pseudo Profil Sismique Vertical (PSV) en ondes S

Christophe Vergniault, EDF CEIDRE TEGG, 905 avenue du camp de menthe, 13097 Aix en Provence, christophe.vergniault@edf.fr

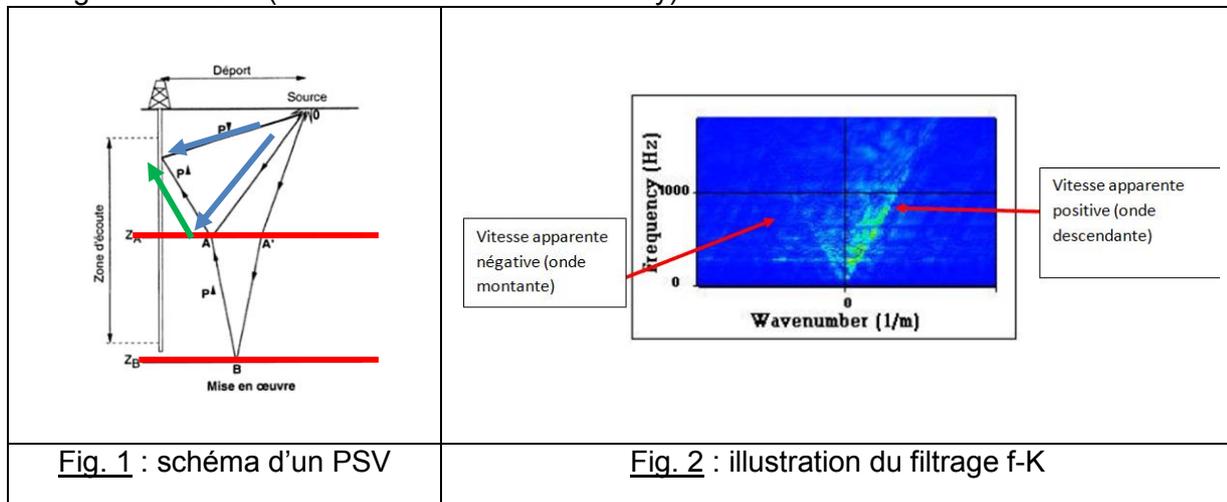
Jean-Luc Mari, IFP School, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, jean-luc.mari@ifpen.fr

Remerciements : G. Coubard (EDF CIH) ; B. Steck (EDF Lab) ; F. Rivière (FONDASOL) ; O. Magnin et A. Tourette (EGIS) ; P. Portolano (EOSYS) ; A. Koseki (SupMECA).

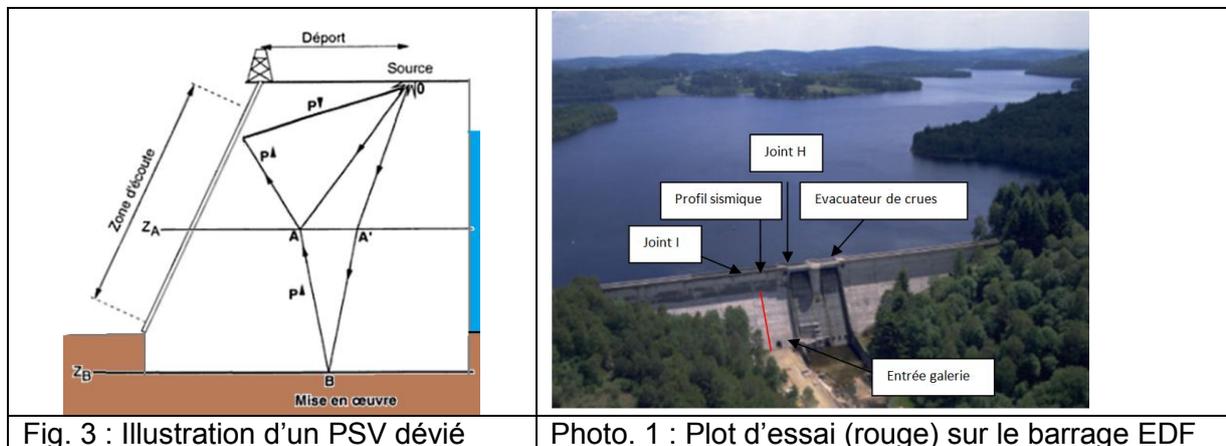
1 CONTEXTE

La justification de la stabilité de nombreux ouvrages hydrauliques de type poids est revue pour s'adapter à des nouvelles données hydrologiques ou réglementaires. Vis-à-vis de la stabilité de ces ouvrages, des marges supplémentaires peuvent être identifiées par la caractérisation de la macro-rugosité de l'interface béton-rocher. Or, si le fond de fouilles d'un barrage poids ancien n'est pas ou plus connu, une méthode généralement appliquée consiste à faire des forages carottés afin d'en déduire la géométrie du contact barrage-fondation. Dès 2014, dans le cadre du projet EDF « GT Contact », s'est posé la question de savoir si les méthodes géophysiques peuvent permettre d'affiner la connaissance de cette géométrie et ainsi limiter le nombre des forages.

Une première idée fût d'établir un parallèle entre le parement du barrage et la surface du sol pour mettre en œuvre la méthode de sismique réflexion. Dès lors, le contact barrage-fondation devient analogue à un réflecteur penté. Des simulations de propagation d'ondes par tracés de rais, faites par EOSYS en 2015, et comparées avec les enregistrements effectués lors d'une campagne sur un ouvrage EDF de faible hauteur, menée par EGIS en 2014, confirment que des arrivées réfléchies sur le contact barrage-fondation sont enregistrables, mais qu'elles sont fortement mélangées à d'autres trains d'ondes et que les isoler est très délicat. Une nouvelle idée a alors consisté à établir une analogie entre le parement d'un barrage et l'axe d'un forage dévié pour mettre en œuvre la méthode de sismique pétrolière dite profil sismique vertical (PSV, cf. figure 1). L'intérêt de cette approche réside dans le fait que la séparation des différents trains d'ondes est relativement simple dans le domaine fréquence et nombre d'ondes (f-K), car les ondes s'identifient avec des vitesses apparentes de signe opposé, ce qui est également vrai en nombre d'ondes (cf. figure 2). En effet, un enregistrement PSV est composé d'ondes montantes (cf. flèches vertes sur la figure 1) et descendantes (cf. flèches bleues sur la figure 1) ayant des vitesses apparentes contraires, P et S, ainsi que des modes guidés d'interface liés à la présence du forage et du fluide (ondes de tube ou de Stoneley).

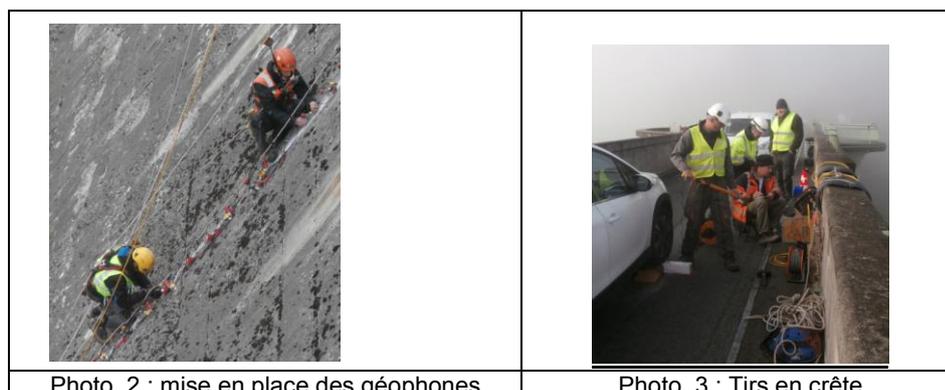


Pour réaliser un pseudo-PSV dans le contexte d'un barrage, l'émission sismique doit être en crête du barrage et l'écoute sur ses parements (cf. figure 3). Après le premier essai sur un ouvrage de faible hauteur en 2014 et uniquement en ondes P, il a été décidé de conduire une expérience en ondes S sur un ouvrage documenté et plus représentatif du parc hydraulique (cf. photo 1).



2 L'ACQUISITION

L'acquisition des données a été menée par l'entreprise FONDASOL fin octobre 2016, appuyé par SUPMECA afin de tester différentes sources. Des mesures ont été effectuées depuis les parements amont et aval avec des capteurs placés tous les 25 cm en altitude et 3 sources de type différent, positionnées en crête d'ouvrage (impulsionnelle P&S, vibratoire en ondes S et vibratoire en ondes P). Toutefois, après le contrôle qualité des résultats, en raison de fréquences de résonances des bâtis des sources vibratoires polluant les signaux, seules les mesures impulsionnelles ont pu être exploitées pour les analyses pseudo-PSV. En complément, EDF R&D a mené des essais par méthode acoustique et sismique en galerie, afin d'imager plus directement le contact. L'ensemble des mesures pour le pseudo-PSV a été réalisé sur le plot de plus grande hauteur entre des drains d'élévation et à environ 3 m en RD de la galerie d'accès (cf. photo 1). La réception sur le parement aval était décomposée en 4 bases de 24 géophones (avec 1 composante verticale et horizontale chacun), espacées d'une différence d'altitude de 25 cm. Une base correspond à la série de capteurs sismiques enregistrés en même temps. Il y avait un recouvrement de 1 trace entre chaque base. La réception sur le parement aval était également décomposée en 4 bases, mais de 24 hydrophones, espacées de 1 m et remontées successivement de 25 cm. La semaine précédant l'acquisition, des tiges filetées ont été fixées sur le parement aval du barrage par 2 cordistes, tous les 31.25 cm (soit 25 cm en altitude) et sur 89 niveaux (cf. photo 3).



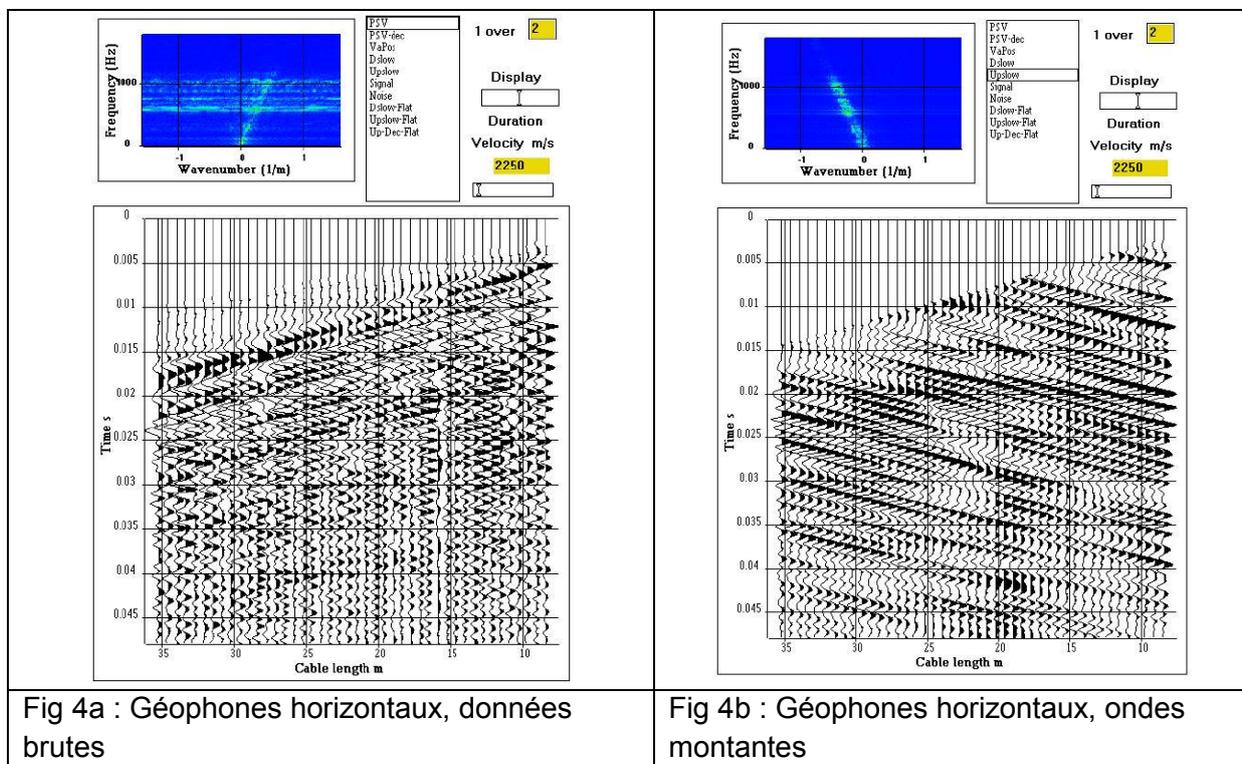
3 LA CHAÎNE DE TRAITEMENT

D'une manière générale, la séquence de traitement d'un PSV mise en œuvre par l'IFP School peut être ainsi résumée :

- compensation des amplitudes,
- déconvolution par égalisation spectrale pour augmenter la résolution verticale et d'aider à la séparation des ondes,
- séparation des ondes par filtrage en nombre d'onde ou en vitesse apparente
- construction de l'image sismique de type VSPCDP stack.

La séparation des ondes concerne : les ondes de volume des modes guidés, les champs montants des champs descendants. Elle a été réalisée par un filtre en nombre d'onde. Pour des fréquences positives le champ descendant a des nombres d'onde positifs. Cette technique de séparation d'ondes ne nécessite pas de pointé de temps d'arrivée. La section résiduelle, différence entre le champs total et le champs descendant, représente le champs montant, caractérisé par des vitesses apparentes négatives. La séparation d'ondes par filtrage en nombre d'onde ou en vitesse apparente est d'autant plus efficace que le nombre de traces est important. Pour des acquisitions de type –pseudo-PSV sur barrage, il est utile de réduire la distance entre traces pour éviter tout phénomène d'aliasing spatial. Le nombre important (90) de traces par pseudo-PSV avec une distance de 0.25 m à 0.30 m entre 2 positions de capteurs le long des flancs amont et aval du barrage est un bon compromis pour avoir des filtres plus efficaces, peu affectés par les effets de bord.

La donnée brute et le champ montant du pseudo-PSV, avec réception sur la parement aval avec des géophones horizontaux (pseudo PSV en ondes S), sont présentées sur les figures 4, avec leur diagramme f-k associé pour évaluer l'efficacité du filtrage.

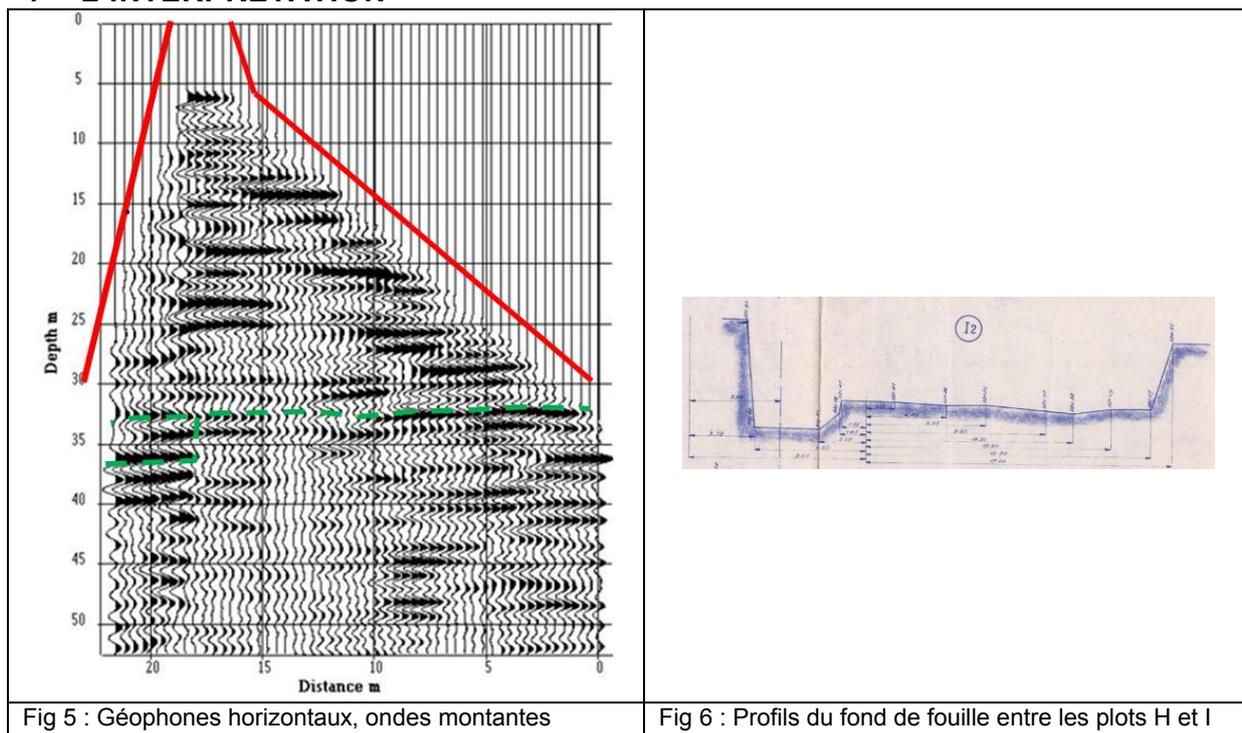


Au final, le résultat est une image en temps comparables à des sections de sismique réflexion en ondes S. Cependant dans le but de faciliter l'interprétation des images

sismiques, les sections sismiques VSP sont converties en profondeur par l'application d'une vitesse constante, cohérente avec celle déterminée par sismique transparence entre la crête et la galerie ($V_p=4100$ m/s et $V_s=2200$ m/s).

Toutefois, comme avec les géophones verticaux, il est important de noter qu'en raison du bruit, les ondes montantes de volume sont très difficilement identifiables sur les sections « résidus » et que la sélection des ondes montantes a été faite sur les sections « résidus » en appliquant des filtres en vitesse. Une vitesse de 2250 m/s permet de mettre à plat le champ descendant et d'effectuer la correction de vitesse du champ montant.

4 L'INTERPRÉTATION



Il est à noter que pour faciliter l'interprétation l'image finale est un composite du pseudo-PSV en ondes P, avec écoute à l'amont du barrage sur des hydrophones et du pseudo-PSV en ondes S, avec écoute sur la paroi aval du barrage avec des géophones horizontaux. L'image interprétée du pseudo-PSV en ondes S est présentée en figures 5. Dans l'intervalle de profondeurs 32 – 35 m, on peut observer un réflecteur net, plutôt plan, ce qui serait cohérent avec un des profils de fond de fouille (cf. fig. 6). Toutefois, le faible rapport signal sur bruit implique de rester prudent dans l'interprétation des résultats.

5 CONCLUSION

L'approche pseudo-PSV avec un tir depuis le couronnement d'un barrage et une écoute sur les 2 parements permet manifestement d'imager le contact barrage fondation, mais l'image du contact reste très discutable en raison d'un rapport signal sur bruit trop faible. Il serait tout de même intéressant de confirmer par simulation numérique qu'une acquisition en ondes S permet bien d'atteindre l'objectif. De plus, une autre façon d'améliorer le résultat pourrait être d'exploiter le nécessaire forage de calage pour réaliser un « Walkaway », soit un ensemble de PSV déportés dont le résultat est équivalent à une section sismique en couverture multiple, ce qui devrait améliorer nettement le rapport signal sur bruit.

Reconnaissance du barrage du lac au Duc - Commune de Ploërmel (Morbihan)

Loïc ARNOULT [1], Christopher BOULAY [1], Arnaud LE GAL [2], Matthieu MOLINIE [1],
[1] CALLIGEE NANTES – 1 rue de la Noë - CS 82118 – 44321 Nantes Cedex 3

[2] Syndicat de l'Eau du Morbihan, 27 rue de Luscanen – CS 72011 – 56001 Vannes Cedex
l.arnoult@calligee.fr, c.boulay@calligee.fr, arnaud.le-gal@eaudumorbihan.fr
m.molinie@calligee.fr

Abstract

The Lac au Duc's dam was built in the 12th century through Yvel's valley. A drinking water supply station was created downstream and the crest of dam supports a road with heavy traffic. During a diagnosis of the dam's state, geophysical investigations, including electrical tomography and seismic refraction profiles, revealed a fault along the Yvel's valley axis. Geological mapping has confirmed those interpretations. The alleged position of the fault will be taken into account to establish the new spillway's location and its foundation dimensions.

Contexte de l'étude

Localisé au Nord-Ouest de la commune de Ploërmel (Morbihan) (**figure 1**), le Lac au Duc est formé par la retenue d'un barrage implanté sur la rivière l'Yvel construit par des moines bénédictins au XIIe siècle. Le barrage permettait à l'époque la mise en marche de plusieurs moulins. A la fin du 19^e siècle, un réaménagement du site et la création d'une usine hydroélectrique permet l'apparition de « la lumière électrique » au cœur de la ville de Ploërmel. L'usine cesse son activité en 1946 et est remplacée par une usine de traitement des eaux qui donnera au lac son statut de réserve d'eau potable.

D'une hauteur d'environ 8 m au-dessus du terrain naturel et d'une longueur en crête de 190 m pour une largeur de 9 m, le barrage du Lac au Duc est équipé d'un canal de décharge en rive gauche permettant la prise d'eau AEP (ancien canal meunier) et d'un évacuateur de crue en rive droite au niveau duquel l'Yvel suit son cours (**figure 3**). Un ruisseau canalisé, le Tournisset, traverse l'ouvrage dans sa partie est, il recoupe notamment le canal de décharge. La crête du barrage supporte en plus une route départementale avec un trafic relativement important.

En accord avec le département du Morbihan (56), du syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable de Ploërmel, des communes de Ploërmel et de Taupont, le gestionnaire du barrage, Eau du Morbihan a récemment entrepris de réaliser un diagnostic complet de l'ouvrage. Les premières reconnaissances visuelles, réalisées par la société ISL, ont mis en évidence un état général du barrage très dégradé et un sous-dimensionnement de l'ouvrage vis-à-vis de l'évacuation des crues.

Objectif de l'étude

En prévision de la réalisation de travaux de confortement de l'ouvrage et de la création d'un nouveau déversoir entre l'usine et le tracé actuel de l'Yvel, Eau du Morbihan a confié la réalisation d'une campagne de mesure géophysique à CALLIGEE. Les objectifs étaient multiples et la mission s'est déroulée en plusieurs étapes et en fonction des résultats :

- étape 1 : cartographie du canal de décharge au radar géologique, radar IDS équipé d'une antenne 400-900 Mhz ; juin 2016 ;
- étape 2 : géodétection des réseaux existants (classe A) ; octobre 2016 ;
- étape 3 : diagnostic de l'ouvrage par deux tomographies électriques avec un espacement réduit (ABEM, SAS 4000) et une cartographie au radar géologique 3D (radar IDS, antenne STREAM-X 200 Mhz) ; octobre 2016 ;
- étape 4 : levés géologiques et structuraux en amont et aval du barrage ; novembre 2016 ;
- étape 5 : prospection géophysique complémentaire : sismique réflexion et interprétation en ondes de surface (MASW) ; janvier 2017.

La première intervention a été réalisée pour déterminer l'origine et l'extension des désordres du canal de décharge qui se traduisent par de nombreuses fuites au travers de la maçonnerie. Elle a consisté à réaliser une cartographie au radar géologique sur les bajoyers est et ouest dans le canal vidé.

Les interventions géophysiques suivantes ont été réalisées essentiellement en sommet de digue. A noter que la campagne de mesure a été réalisée dans des conditions très contraignantes (nombreux réseaux et infrastructures routières, surface recouverte par du bitume, etc.).

Contexte géologique

Le barrage est implanté en travers de l'Yvel, il repose directement sur le socle briovérien constitué de siltites fines à bancs gréseux verdâtres à gris-sombre, présentant une schistosité très développée. Trois directions de failles majeures semblent se recouper au niveau de la retenue (**figure 2**).

La reconnaissance géologique réalisée aux abords du barrage, à la faveur de niveaux d'eau très bas, a permis d'identifier la faille N30° dans le lit actuel de l'Yvel. Les diaclases relevées présentent des orientations identiques à celles des failles notées sur les cartes géologiques [3] (**figure 4**).



Figure 1 : Localisation sur fond IGN

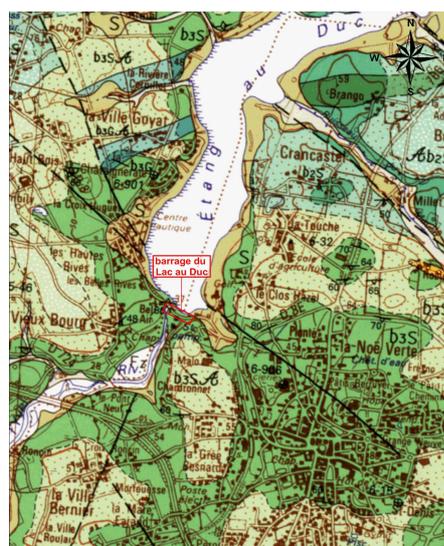


Figure 2 : Extrait de la carte géologique

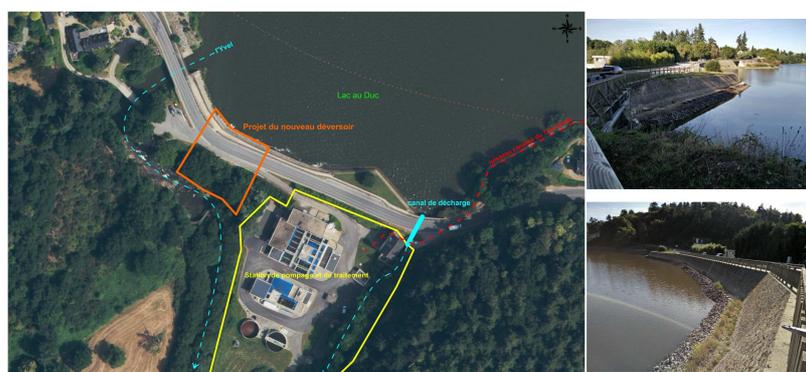


Figure 3 : Le barrage du Lac au Duc



Figure 4 : Cartographie géologique - Affleurement et diaclases

Résultats de la prospection géophysique dans le canal de décharge

Il apparaît clairement que les structures des bajoyers est et ouest du canal sont très hétérogènes [1]. L'analyse des radargrammes a permis de mettre en évidence des zones déstructurées derrière la maçonnerie (figure 5).

Ces zones d'anomalies multiples, sans organisation, s'opposent assez franchement aux secteurs supposés plus sains. En effet, du fait de la présence de matériaux argileux formant le cœur du barrage, la profondeur d'investigation du radar est très limitée. On parle généralement d'absorption du signal dans ces zones argileuses. Les secteurs endommagés, présentant une perte de matériaux argileux par soutirage de fines, de plus en plus accentué du fait de la circulation d'eau, se signaleront par des zones à réflecteurs multiples de fortes énergies.

Ces zones sont identifiées du côté amont du canal, sur environ 8 m sur le bajoyer est, depuis l'amont du canal et sur environ 7 m sur le bajoyer ouest. La zone supposée endommagée côté ouest n'affecte pas toute la hauteur du mur du canal et semble se circonscrire jusqu'à 0.70 m du sol de la galerie. Une troisième zone supposée endommagée est constatée du côté aval du canal, au niveau du bajoyer ouest. Elle est localisée sur les trois premiers mètres de la galerie et est très probablement liée à la mise en place récente de la déviation du ruisseau du Tournisset (buse béton).

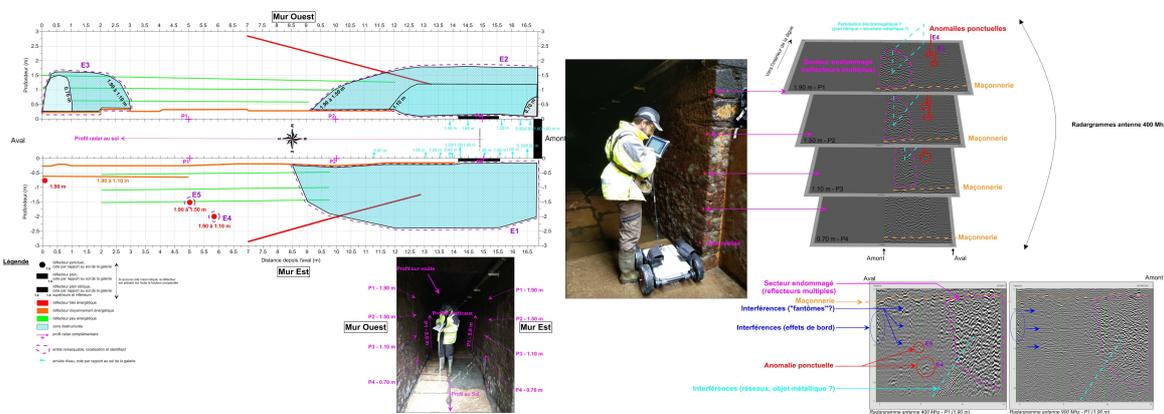


Figure 5 : Cartographie radar du canal de décharge - antenne 400-900 Mhz

Résultats des prospections géophysiques réalisées sur la digue

La détection radar réalisée sur l'ensemble du barrage a permis d'identifier de très nombreux réseaux enterrés (eaux, fibre optique, pluvial, électricité, fourreaux, etc.) sur toute la surface de la digue, et en particulier en bordure et dans l'axe de la chaussée. Cette détection de réseaux a été utile pour préciser l'implantation des tomographies électriques et des profils sismiques en privilégiant les zones sans réseaux, en espérant ainsi limiter les effets de guide d'onde ou de perte de courant dans des réseaux métalliques.

Deux tomographies électriques ont été réalisées sur le barrage (protocoles Wenner et Schlumberger) : une tomographie électrique TE-1 de 190 m (espacement interélectrode de 2 m) implantée dans l'axe de la chaussée aval et une tomographie électrique TE-2 de 63 m (espacement interélectrode de 1 m) implantée dans la partie ouest du barrage depuis le haut de la digue et descendant jusqu'au bord de l'Yvel. La première tomographie électrique a permis d'identifier clairement la position du substratum rocheux en profondeur sur une partie du barrage et de mettre en évidence une zone vraisemblablement faillée au droit du projet du futur déversoir (anomalie conductrice verticale) (figure 6).

La prospection au radar géologique 3D a montré la présence d'une anomalie particulière au droit de la faille supposée. Un effet de tassement au sein des remblais du barrage a clairement été identifié. Il est probablement associé à des dépôts de fines en profondeur, eux-mêmes potentiellement en lien avec la zone de faille [2] (figure 6).

L'acquisition des mesures de sismique réfraction, réalisée suivant 8 dispositifs de 24 traces (trois dispositifs à espacements 1 m, quatre à espacement 3 m et un d'espacement 5 m, centrés sur la faille supposée) a également permis de réaliser une interprétation en onde de surface (MASW) avec le logiciel GEOPSY (Marc Wathlet). Les bases sismiques ont été implantées sur l'axe de la tomographie TE-1 afin de comparer aisément les résultats. Malgré des jeux de données de qualité globalement

moyennes (fort vent, effets de guide d'onde, etc.), les modèles de vitesse obtenus en Vp (recalés avec les coupes des piézomètres) valident les interprétations de la prospection électrique. Ils identifient le substratum rocheux sain à des vitesses supérieures à 2 800 m/s et localisent une baisse de vitesse au droit de la zone faillée [4] (**figure 6**).

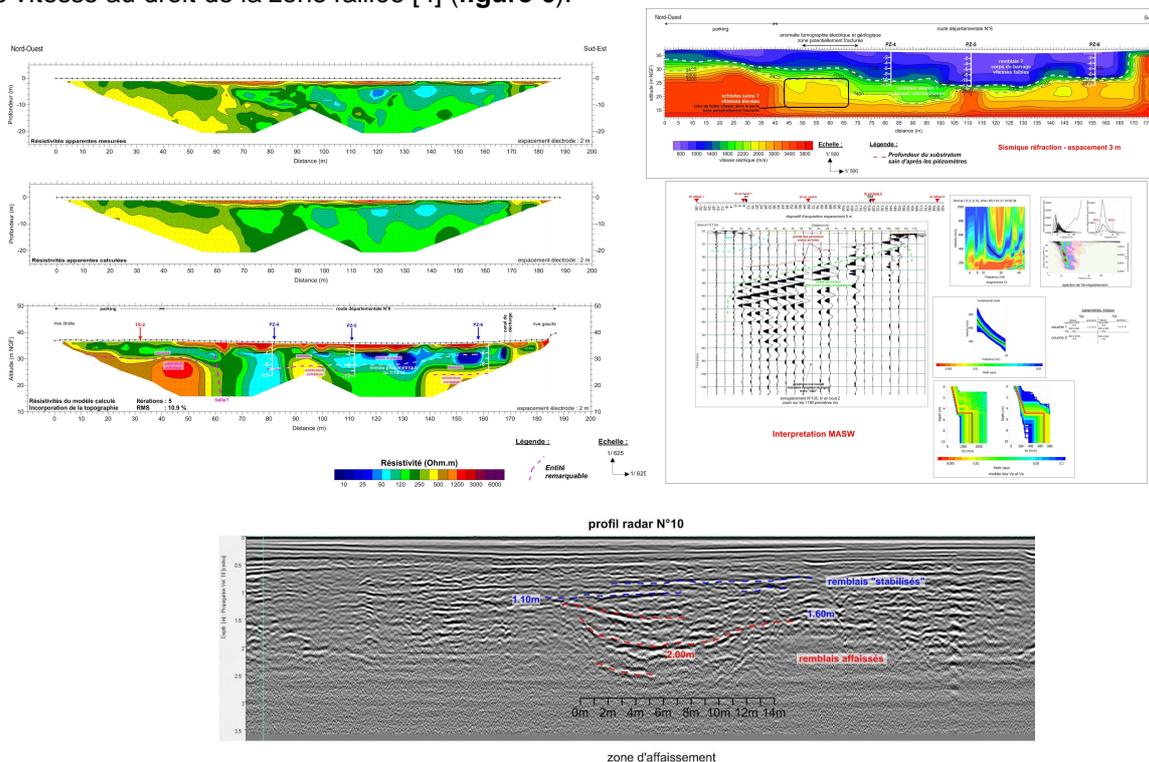


Figure 6 : Tomographie électrique TE-1 (en haut à gauche), modèle de sismique réfraction et interprétation MASW (en haut à droite), extrait d'un radargramme (antenne 200 Mhz)

Conclusion

La prospection géophysique avait pour objectif de préciser la localisation et la géométrie de désordres majeurs affectant la structure du barrage du Lac au Duc. L'analyse conjointe de la géologie, de la géotechnique et de la géophysique a permis de réaliser un diagnostic général de la structure en permettant de localiser le toit du socle sur l'ensemble du barrage et en mettant en évidence une zone faillée sous l'ouvrage. L'analyse des investigations géotechniques réalisées récemment permettra d'affiner les modèles et de préciser ainsi la localisation du nouvel évacuateur de crue, prévu entre le lit actuel de l'Yvel et l'usine (**figure 3**) [5]. Le comité de pilotage du projet a d'ores et déjà validé une variante du projet qui permettra d'éviter au maximum la zone faillée, de manière à assurer une fondation saine à l'évacuateur de crues.

Références

- [1] Boulay C., 2016 - Auscultation radar du canal de décharge du barrage du Lac au Duc, Ploërmel (56). Rapport Calligée, N16-56097, 25 p.
- [2] Molinié M., Boulay C., 2016 - Auscultation du barrage du Lac au Duc - Cartographie des réseaux existants, tomographies électriques et radar géologique, Ploërmel (56). Rapport Calligée, N16-56152-A, 42 p.
- [3] Arnoult L., Molinié M., 2016 - Levers géologiques et structuraux, barrage du Lac au Duc, Ploërmel. Rapport Calligée, N16-56152-B, 19 p.
- [4] Molinié M., Boulay C., 2017 - Auscultation du barrage du Lac au Duc - Méthodes géophysiques complémentaires, Ploërmel (56). Rapport Calligée, N16-56152-C, 61 p.
- [5] Boulay A., 2017 - Dossier de révision spéciale du barrage du Lac au Duc, Confortement de l'ouvrage. Rapport ISL Ingénierie, 16F-050-RA-2, rev A, 165 p

Mots clés

Géophysique, barrage, tomographie électrique, radar géologique, sismique réfraction, MASW, schistes briovériens, faille, Ploërmel, Morbihan.

Diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre maritime par Contrôle Non Destructif et fusion des données

Projet FEDER/CPER DIGUE2020

Scarlett Gendrey¹, Vincent Garnier², Pierre Azemard¹, Cédric Payan²

1 Cerema, DTER Méditerranée, 13100 Aix-en-Provence, France, scarlett.gendrey@cerema.fr,
pierre.azemard@cerema.fr

2 Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France vincent.garnier@univ-amu.fr,
cedric.payan@univ-amu.fr

Abstract

In mainland France, about 9000 kilometers of protective dikes were built over time among which 1210 kilometers cover 17% of French coasts. An important part of these flood protective dikes is old (19th century even more). Consequently, they are often very heterogeneous, by their construction and their past (raises, enhancements, repairs, etc.) and require regular inspection and repair. The DIGUE2020 project aims to improve the understanding of these long term ageing phenomena which arise on the maritime dikes thanks to the construction of a scale one in situ research platform.

Introduction

En France métropolitaine, près de 9000 kilomètres d'ouvrages hydrauliques ont été construits au fil du temps dont 1210 kilomètres couvrent 17 % des côtes françaises. Une part importante de ces ouvrages de protection contre la houle ou contre les submersions sont anciens (XIXe siècle voire plus). Ils sont souvent très hétérogènes, par leur construction et leur histoire (rehausse, réparations, etc.) et nécessitent d'être vérifiés et confortés. Avec une densité de population 2,5 fois plus élevée, une urbanisation 5 fois plus grande et une richesse biologique 7 fois plus importante à la moyenne nationale, le littoral français présente un enjeu considérable.

Le projet DIGUE 2020 regroupe l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture), l'IFFSTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), le SYMADREM (Syndicat mixte interrégional d'aménagement des digues du delta du Rhône et de la mer) et le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques l'environnement la mobilité et l'aménagement). Il a pour objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes qui surviennent sur les digues maritimes sur le long terme grâce à la construction d'une plateforme de recherche in situ à taille réelle. C'est dans ce cadre que s'inscrit mon projet de thèse.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer l'analyse des méthodes de Caractérisation Non Destructive (CND) appliquées au diagnostic des digues de protection contre les submersions. Les types de défauts ciblés, connus pour être représentatifs des pathologies récurrentes des digues, sont de deux types

- Variations de densité (zones de vide, défaut de compactage, hétérogénéités dans le mélange sol-chaux, etc.) ;
- Singularités (système racinaire, etc.).

Leur détection et caractérisation sont les enjeux de ce travail. Il s'agit plus particulièrement de caractériser les signatures de ces pathologies à partir des données mesurées par des méthodes non destructives et par leurs combinaisons (fusion). Ces travaux ont pour but l'établissement et l'exploitation d'un index de signatures représentatives de ces défauts et du vieillissement des ouvrages qui peuvent conduire à la rupture, dans le cas de matériaux traités à la chaux.



Figure 1 : Photographie de la digue à la mer gérée par le SYMADREM. @scarlett gendrey

Site d'étude

La digue à la mer s'étend sur 25 km le long du littoral camarguais. Elle a été conçue dans les années 1860 pour protéger les terres de la Camargue des entrées d'eau marine. Elle est associée à plusieurs ouvrages connexes : épis, brise-lames et tenons, construits à partir des années 30 au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer et complétés par le SYMADREM dans les années 2000.

La plateforme de recherche in situ sera partie intégrante de cet ouvrage et sera construite avec le sol local. Un travail collaboratif pour le choix du site, le dimensionnement et l'intégration défaut est en cours.

Le choix du site est primordial et tous les partenaires travaillent à trouver l'endroit le plus pertinent pour l'implantation de cette plateforme de recherche in situ. Il est évident, car son but primaire est la recherche, que cette plateforme ne doit en aucun cas être à proximité immédiate d'un enjeu humain ou économique. Mais elle doit, cependant, être suffisamment sollicitée, par le vent et par le clapot des étangs afin de pouvoir observer son vieillissement au cours des 3 prochaines années (dans le cadre du projet DIGUE2020) et plus encore dans le cadre d'autres projets.

Le linéaire expérimental devrait s'étendre sur plusieurs centaines mètres (± 400 m). Une partie sera traitée à la chaux, une autre sera en sol naturel non traitée. Les dimensions de l'ouvrage permettront la mise en place de défaut de l'ordre de la dizaine de centimètres au mètre.

Approche expérimentale

Contrairement aux méthodes géotechniques, les méthodes géophysiques permettent de retrouver les propriétés d'un milieu à partir de données indirectes sans y porter atteinte. Il existe un nombre important de méthodes géophysiques qui implique un nombre non négligeable d'observables qui permettent de caractériser les ouvrages hydrauliques en terre.

Notre approche dans le cadre de cette thèse s'appuie sur une étude en laboratoire avec pour objectif de construire un catalogue de signatures. Les observables considérées sont :

- ρ , la résistivité électrique

- V_s , la vitesse de propagation des ondes S
- ϵ , la permittivité

Elles seront évaluées en fonction d'indicateurs, que sont :

- La teneur en eau volumique (et le pourcentage de sel)
- Le pourcentage de masse volumique sèche $\rho_d OPN$
- La présence de chaux (CaO)

L'établissement de lois entre les observables et les indicateurs permettra de quantifier la sensibilité de la mesure non destructive à tout changement dans l'évolution de l'indicateur. Déterminées sur plusieurs échantillons, ces lois permettront d'identifier les modèles de conversion qui seront ensuite recalés sur les mesures non destructives réalisées in situ par TRE (Tomographie de résistivité électrique), MASW (Multichannel analysis of surface waves) et radar géologique.

L'objectif étant de réussir à faire le lien entre l'évolution des observables en laboratoire en milieu contrôlé et sur la plateforme in situ.

La fusion de données, quant à elle, permet de combiner les données issues de chacune des méthodes. Le principe consiste à combiner les relations entre les observables et les différents indicateurs pour obtenir leurs distributions de possibilité. Si les distributions se coupent en un même point alors toutes les observables pointent vers la même anomalie.

Cette démarche sera calibrée sur les échantillons en laboratoire et appliquée sur la plateforme de recherche in situ.

Conclusion

Le but du projet DIGUE2020 est de fournir une nouvelle approche au diagnostic d'ouvrage hydraulique en terre, maritime ou non. La nouvelle méthodologie proposée donne une place centrale au contrôle non destructif. L'objectif de la thèse est de montrer qu'il est possible de repérer les anomalies récurrentes d'un ouvrage sans utiliser des méthodes destructives et de contrôler son évolution au fil du temps tout en assurant sa pérennité.

Références

V. Garnier and al, Non Destructive Testing of Concrete: Transfer from Laboratory to On-site Measurement, 7th EWSHM, Nantes, France, July 2014

http://www.mediterranee.cerema.fr/IMG/pdf/Poster_ANRN_Digues2020_BD.pdf

