

ACTES DU 11^{ème} COLLOQUE
DE GEOPHYSIQUE DES SOLS
ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

GEOFCAN



20-21 novembre 2018

IRSTEA – Antony, France



11^e colloque GEOFCAN

du 20 au 21 novembre 2018



Présentations orales

<u>Bitri A.</u> , Samyn K., Filippi C., Un exemple expérimental d'interaction onde de surface – cavité	1
Blary F., Sosnowska P., Charruadas P., Van Nieuwenhove B., Dabas M., Flageul S., <u>Tabbagh A.</u> , Prospection de la 'Grand Place' de Bruxelles : utilisation de la méthode électrostatique	5
<u>Coulouma G.</u> , Raclot D., Hamdi R., Reconstitution historique de la géométrie d'une ravine au Cap Bon (Tunisie) : Tentative d'utilisation de la tomographie de résistivité en milieu argileux	9
<u>Dezert T.</u> , Fargier Y., Palma-Lopes S., Cote P., Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance	13
<u>Flores Avilés G.P.</u> , Descloitres M., Duwig C., Legchenko A., Soruco Á., Pérez M., Medinaceli W., Contribution of Time-Domain Electromagnetics (TDEM) to the knowledge of Lake Titicaca aquifer systems, Bolivia	17
<u>Gavazzi B.</u> , Le Maire P., Mercier De Lepinay J., Calou P., Munsch M., Magnétomètres vectoriels fluxgate : possibilités de mesure et d'interprétation au sol, en drone et aéroportées pour l'étude du sous-sol	21
<u>Henine H.</u> , Tournebize J., Dorel M., Chaumont C., Vincent B., Clément R., Localisation d'un réseau de drainage agricole par tomographie de résistivité électrique couplée à une injection d'air chaud	25
<u>Houzé C.</u> , Saintenoy A., Pannecouke L., Le Coz M., De Fouquet C., Evaluation des variations spatiales des paramètres hydrodynamiques des sols à l'aide du radar de sol	29
<u>Jodry C.</u> , Isch A., Aldana C., Azaouail M., Klintzing M., Caractérisation géoélectrique de la zone non saturée d'un site d'observation de la nappe de Beauce à Villamblain	33
<u>Lajaunie M.</u> , Sailhac P., Malet J.-P., Matthey P.-D., Utilisation de la méthode CSAMT en hydrogéophysique	37
<u>Le Maire P.</u> , Munsch M., Bertrand L., Brahimi S., Calou P., Gavazzi B., Mercier De Lepinay J., Etude comparative d'une cartographie magnétique au sol et en drone : apport pour la caractérisation locale de la carte géologique	41
Maalouf Y., Khoury N., <u>Bièvre G.</u> , Voisin C., Suivi géophysique temporel en laboratoire de l'érosion interne dans des digues en terre	45
<u>Martin A.</u> , Champollion C., Doerflinger E., Cotteux E., Kaufmann O., Apport du traçage artificiel et des méthodes géophysiques à la compréhension des flux au sein de la zone non saturée du karst (site de St Ferron, France)	49
<u>Martinez G.D.</u> , Oxarango L., Molle P., Forquet N., Suivi de la période de repos de la couche filtrante des filtres plantés de roseaux par tomographie RX	53
<u>Rabouli S.</u> , Dubois V., Hénine H., Clément R., Spatialisation de variables physiques dans les sols par méthodes géophysique, géotechnique et géostatistique : approche numérique	57
<u>Rembert F.</u> , Guérin R., Jougnot D., Zuddas P., Développement de méthodes géo-électriques pour la caractérisation des phénomènes de précipitation-dissolution en milieu carbonaté	61

<u>Séger M.</u> , Giot G., Euzen C., Neyens D., Cousin I., Monitoring de profil de la résistivité électrique dans la zone non saturée	65
<u>Simon F.-X.</u> , Guillemoteau J., Dousteysier B., Dacko M., Hulin G., Caractérisation d'un établissement antique en basalte en Grande Limagne - Evaluation de l'apport de la méthode d'induction électromagnétique (EMI)	69
<u>Soueid A.A.</u> , Revil A., Steck B., Vergniault C., Méthode du Potentiel Spontanée pour la détection de fuites dans les digues	73
Suard E., Clément R., <u>Fayolle Y.</u> , Alliet M., Albasi C., Gillot S., Caractérisation de la dispersion des bulles d'air au sein de modules membranaires de traitement des eaux à l'aide de la tomographie de résistivité électrique	77
<u>Verdet C.</u> , Sirieix C., Riss J., Détermination du fonctionnement hydrogéologique d'un site karstique par un suivi temporel en tomographie de résistivité électrique - épikarst de la grotte de Lascaux	81
<u>Wang A.</u> , Le Feuvre M., Abraham O., Leparoux D., Effet de petites variations d'un milieu bicouche sur un nouveau observable d'inversion	85
<u>Yalo N.</u> , Boucher M., Alassane A., Kounika E., Chodaton H., N'tcha T., Caractérisation du biseau salé au Bénin par mesures électromagnétiques	89

Posters

<u>Allaoui A.</u> , Boualoul M., Muzarafiti A., Sur l'existence d'une structure en graben dans le Causse d'Agourai, Maroc : réponse des méthodes de résistivité électrique	93
<u>Boubkari L.</u> , Ait Sliman B., Elghorfi M., Saidi A., Maacha L., Apport des données géologiques et géophysiques à l'établissement du modèle lithologique 3D : application au gisement de Koulekoun (Guinée)	99
<u>Clément R.</u> , Aubert J., Dubois V., Forquet N., Développement d'un résistivimètre 4 électrodes "low-cost" sur base d'une plateforme Arduino	103
<u>Clément R.</u> , Papias S., Dubois V., Moreau M., Choubert J.-M., Boutin C., Forquet N., Caractérisation de l'évolution des infiltrations d'eaux usées traitées dans les zones de rejet végétalisée	107
<u>Hassen I.</u> , Fauchard C., Antoine R., Maquaire O., Costa S., Roulland T., Dugue O., Modélisation géologique 3D des falaises des Vaches Noires, Basse Normandie	111
<u>Jouen T.</u> , Clément R., Mazeas L., Loisel S., Moreau S., Suivi géoelectrique d'un déchet ménager au cours de sa biodégradation à l'échelle du laboratoire	115
<u>Lutz P.</u> , Zouhri L., Goujon M., Meurant P.E., Apport de la campagne géophysique 2017-2018 sur le site expérimental hydrogéologique de UniLaSalle (Beauvais, 60)	119
<u>Mendieta A.</u> , Bradford J., Anisotropie induite par des fractures dans un bassin versant montagneux	123
Sognon L.M., <u>Yalo N.</u> , Boucher M., Lawson F.M.A., Allé C., Contribution géophysique à l'évaluation du risque d'intrusion saline dans les aquifères côtiers urbains tropicaux : cas de Cotonou (Bénin)	127
<u>Zillmer M.</u> , Doukoure F., Marthelot J.-M., Expériences acoustiques dans le bassin versant de Strengbach en Alsace	132

Prix jeune scientifique IRIS Instruments



Catherine Truffert, Présidente d'IRIS Instruments, entourée de Flore Rembert et Théo Dezert

Le prix du Jury IRIS Instruments a été décerné à Flore Rembert, doctorante à l'UMR METIS de Sorbonne Université pour sa présentation intitulée : « Développement de méthodes géo-électriques pour la caractérisation des phénomènes de précipitation-dissolution en milieu carbonaté ».

Le prix du public IRIS Instruments a été décerné à Théo Dezert, doctorant au laboratoire GeoEND à l'IFSTTAR et au laboratoire LRB au CEREMA, pour sa présentation intitulée : « Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance ».



Sociétés-exposants



Programme du 11ème colloque GEOFCAN

Mardi 20 novembre 2018 - 1^{ère} session

10h30-10h50 › SOUEID Ahmed Abdellahi - Méthode du Potentiel Spontanée pour la détection de fuites dans les digues.	73
10h50-11h10 › GAVAZZI Bruno - Magnétomètres vectoriels fluxgate : possibilités de mesure et d'interprétation au sol, en drone et aéroportées pour l'étude du sous-sol.	21
11h10-11h30 › FLORES AVILES Gabriela Patricia - Contribution of Time-Domain Elctromagnetics (TDEM) to the knowledge of Lake Titicaca aquifer systems, Bolivia.	17
11h30-11h50 › REMBERT Flore - Développement de méthodes géoélectriques pour la caractérisation des phénomènes de précipitationdissolution en milieu carbonaté.	61
11h50-12h10 › SEGER Maud - Monitoring de profil de la résistivité électrique dans la zone non saturée.	65

Mardi 20 novembre 2018 - 2^{ème} session

13h50-14h10 › LE MAIRE Pauline - Etude comparative d'une cartographie magnétique au sol et en drone : apport pour la caractérisation locale de la carte géologique.	41
14h10-14h30 › MARTINEZ CARVAJAL German Dario - Suivi de la période de repos de la couche filtrante des filtres plantés de roseaux par tomographie RX.	53
14h30-14h50 › WANG Ao - Effet de petites variations d'un milieu bicouche sur un nouveau observable d'inversion.	85
14h50-15h10 › DEZERT Théo - Fusion de données géophysiques et géotechniques par l'utilisation des fonctions de croyance.	13
15h10-15h30 › RABOULI Sara - Spatialisation de variables physiques dans les sols par méthodes géophysique, géotechnique et géostatistique : approche numérique.	57

Mardi 20 novembre 2018 - 3^{ème} session

17h00-17h20 › FAYOLLE Yannick - Caractérisation de la dispersion des bulles d'air au sein de modules membranaire de traitement des eaux à l'aide de la tomographie de résistivité électrique.	77
17h20-17h50 › LAJAUNIE Myriam - Utilisation de la méthode CSAMT en hydrogéophysique.	37
17h40-18h00 › YALO Nicaise - Caractérisation du biseau salé au Bénin par mesures électromagnétiques.	89

Mercredi 21 novembre 2018 - 4^{ème} session

8h50-9h10 › HOUZE Clémence - Évaluation des variations spatiales des paramètres hydrodynamiques des sols à l'aide du radar de sol.	29
--	----

9h10-9h30 › VERDET Cécile - Détermination du fonctionnement hydrogéologique d'un site karstique par un suivi temporel en tomographie de résistivité électrique - épikarst de la grotte de Lascaux.	81
9h30-9h50 › MARTIN Aurélie - Apport du traçage artificiel et des méthodes géophysiques à la compréhension des flux au sein de la zone non saturée du karst (site de Saint-Ferron, France).	49
9h50-10h10 › JODRY Clara - Caractérisation géoélectrique de la zone non saturée d'un site d'observation de la nappe de Beauce à Villamblain.	33
10h10-10h30 › BIEVRE Grégory - Suivi géophysique temporel en laboratoire de l'érosion interne dans des digues en terre.	45

Mercredi 21 novembre 2018 - 5^{ème} session

14h30-14h50 › HENINE Hocine - Localisation d'un réseau de drainage agricole par tomographie de résistivité électrique coulée à une injection d'air chaud.	25
14h50-15h10 › BITRI Adnand - Un exemple expérimental d'interaction onde de surface cavité.	1
15h10-15h30 › COULOUMA Guillaume - Reconstitution historique de la géométrie d'une ravine au Cap Bon (Tunisie).	9
15h30-15h50 › SIMON François-Xavier - Caractérisation d'un établissement antique en basalte en Grande Limagne - Evaluation de l'apport de la méthode d'induction électromagnétique (EMI).	69
15h50-16h10 › TABBAGH Alain - Prospection de la 'Grand Place' de Bruxelles : utilisation de la méthode électrostatique.	5

Poster

P1 › ALLAOUI Abdelhamid, L'existence d'une structure en graben dans le Causse d'Agourai, Maroc : réponse des méthodes de résistivité électrique	93
P2 › BOUBKARI Laila, Apport des données géologiques et géophysiques à l'établissement du modèle lithologique 3D : application au gisement de Koulekou (Guinée)	99
P3 › CLEMENT Rémi, Caractérisation de l'évolution des infiltrations d'eaux usées traitées dans les zones de rejet végétalisées	103
P4 › CLEMENT Rémi, Développement d'un résistivimètre 4 électrodes « low-cost » sur base d'une plateforme Arduino	107
P5 › HASSEN Imen, Modélisation géologique 3D des falaises des Vaches Noires, Basse Normandie	111
P6 › JOUEN Thomas, Suivi géoelectrique d'un déchet ménager au cours de sa biodégradation à l'échelle du laboratoire	115
P7 › LUTZ Pascale, Apport de la campagne géophysique 2017-2018 sur le site expérimental hydrogéologique de UniLaSalle (Beauvais, 60)	119
P8 › MENDIETA Aida, Anisotropie induite par des fractures dans un bassin versant montagneux	123

P9 › SOGNON Louis-Marc, Contribution géophysique à l'évaluation du risque d'intrusion saline dans les côtiers urbains tropicaux : cas de Cotonou (Bénin)	aquifères 127
P10 › ZILLMER Matthias, Expériences acoustiques dans le bassin versant de Strengbach en Alsace	132

UN EXEMPLE EXPERIMENTAL D'INTERACTION ONDE DE SURFACE - CAVITE

BITRI A¹, SAMYN K¹. FILIPPI C.²

¹ BRGM a.bitri@brgm.fr, k.samyn@brgm.fr

² IFSTTAR, celine.filippi@ifsttar.fr

RÉSUMÉ

La détection des cavités souterraines constitue un fort enjeu sociétal. Les risques d'effondrement liés à la présence de ces cavités en milieu urbain sont prépondérants. Il est donc essentiel de pouvoir localiser, détecter et surveiller ces vides présents dans le sous-sol pour prévenir les dommages. L'objectif de cette étude est de comprendre l'interaction entre une cavité et une onde de Rayleigh en mesurant le champ d'ondes en surface sur le toit et sur le sol d'une cavité connue. La zone d'étude est située à Souzay-Champigny, en France, et consiste en un réseau de carrières souterraines abandonnées en calcaire crétacé. Les cavités sont accessibles et ont été en partie cartographiées

Mots clés : *Cavités, Onde de Rayleigh, Souzay-Champigny*

ABSTRACT

The detection of underground cavities is a major societal challenge. The risk of collapse due to the presence of these cavities in urban areas is preponderant. It is therefore essential to be able to locate, detect and monitor these voids in the basement to prevent damage. The objective of this study is to understand the interaction between a cavity and a Rayleigh wave by measuring the wave field in surface on the roof and on the floor of a known cavity. The study area is located in Souzay-Champigny, France, and consists of an abandoned underground quarry network in cretaceous chalky limestone. The cavities are accessible and partly mapped.

Key words: *Cavities, Rayleigh wave, Souzay-Champigny*

.1 INTRODUCTION

Les cavités peu profondes, telles que le karst, les galeries de mines et de tunnels, constituent un danger pour les personnes et les constructions existantes en raison du risque d'effondrement entraînant des dommages aux bâtiments et une augmentation des coûts de développement urbain. Détection de phénomènes karstiques, des vides, la dissolution de surface, la fissuration, l'altération des matériaux non consolidés, est donc un défi majeur pour les méthodes géophysiques. La densité et la résistivité sont connues pour être de bons

indicateurs de l'altération, de la fissuration ou de l'épikarst saturé, et en plus le comportement électrique peut être amplifiés par la présence de nappes phréatiques peu profondes et la circulation de l'eau. Le géoradar (GPR) peut être également bien adapté à la détection des cavités si la couverture argileuse, qui absorbe les ondes électromagnétiques, est absente ou très discontinue. Des recherches récentes ont montrées de bons résultats pour l'imagerie des cavités à l'aide de méthodes sismiques en onde de surface (Samyn et al, 2013, Leparoux et al, 2000). Les ondes de surface ont plusieurs propriétés qui les rendent utiles pour la caractérisation de la proche surface. Elles véhiculent 2/3 de l'énergie engendrée par la source sismique et leur caractère dispersif permet la quantification de la vitesse des ondes de cisaillement avec la profondeur. L'objectif de cette étude est de comprendre l'interaction entre une cavité et une onde de Rayleigh en mesurant le champ d'ondes en surface sur le toit et sur le sol d'une cavité connue. La zone d'étude est située à Souzay-Champigny, en France, et consiste en un réseau de carrières souterraines abandonnées en calcaire crétacé (Bitri et al. 2014). Les cavités sont accessibles et ont été en partie cartographiées.

.2 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

2.1. Acquisition

Les dimensions de la cavité sont: 55 m de long, 7 m de large et 3,2 m de haut et sont situées à environ 4 m sous la surface du sol. La première géométrie d'acquisition sismique se composait de 3 lignes différentes le long de l'axe de la galerie: en surface, sur le toit et sur le sol (Fig. 1). Chaque ligne se compose d'un de 24 géophones de fréquence de résonance de 10 Hz espacés de 2 m. Trois Geodes de 24 traces de Geometrics ont été utilisés pour enregistrer et sommer verticalement quatre impacts d'une source marteau de 10 kg en surface. La distance entre les sources était de 2 m. Les données ont été enregistrées avec un pas d'échantillonnage de 0,5 ms pendant 1 seconde. Une puit d'aération à proximité du site a été utilisée pour la communication entre la cavité et la surface (le câble de déclenchement (t0), flûtes etc.). Une plaque en acier spéciale en forme [est fabriquée pour fixer les géophones sur le toit de la galerie.



Fig. 1. Photographies de l'intérieur de la galerie montrant les géométries d'acquisition.

La deuxième géométrie d'acquisition consistait en une ligne en surface perpendiculaire à la galerie avec 24 géophones verticaux à des intervalles de 2 m, suivie d'une autre avec des géophones placés le long du périmètre de la galerie à des intervalles de 1 m. Comme le montre la figure 2, les traces brutes montrent des ondes de surface clairement développées. Une énergie rétrograde arrière est enregistrée par les géophones au sol. Cela est probablement dû à l'onde qui se déplace à la fin de la galerie et enregistrée par les géophones au sol. Les données de surface ne sont pas perturbées par la présence de la cavité.

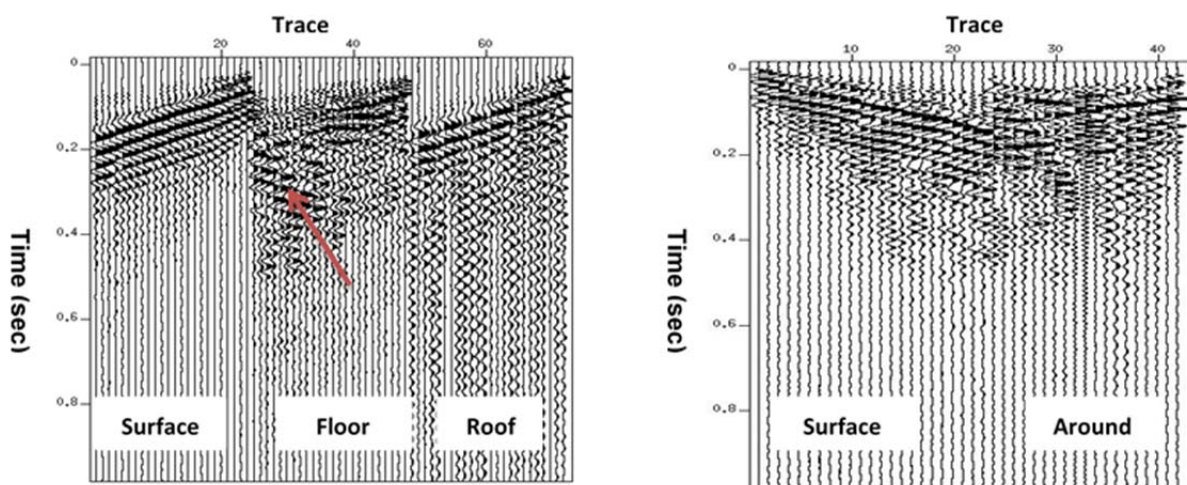
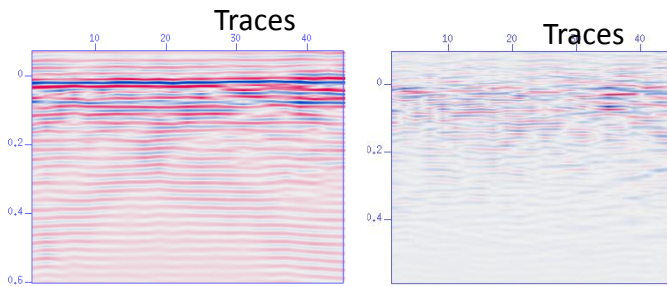


Fig. 2 Exemples de points de tirs enregistrés en surface et dans la galerie.

2.2. Traitement

La première étape du traitement des ondes de surface consiste à déterminer la courbe de dispersion, c'est-à-dire la variation de vitesse de phase en fonction de la fréquence. Chaque courbe de dispersion a été inversée individuellement pour obtenir un profil de vitesse des ondes de cisaillements en fonction de la profondeur. Un tracé de contour 2D du champ de vitesse de l'onde de cisaillement a été produit en rassemblant tous les profils de vitesse 1D dans un ordre séquentiel (Fig. 3). Dans la littérature spécialisée, il est admis que le substratum rocheux est généralement associé à un gradient de vitesse S élevé tandis que la zone de fracture et les vides sont caractérisés par une faible vitesse S . Les résultats obtenus par inversion des ondes de surface montrent une faible couche de vitesse S (250-300 m / s) avec une épaisseur de ~ 2 m surmontée de calcaire crayeux crétaé de vitesses variables entre 600 et 700 m / s. Les images de vitesse S pour le profil sismique en surface et pour le profil au toit de la cavité



ie zone de faible vitesse due à la

(a)

(b)

Fig. 3. (a)- Coupe somme du champ total (b) Coupe somme du champ diffracté obtenue après application de la transformation de Karhunen-Love à la coupe somme du champ total.

L'acquisition perpendiculaire à la galerie présage la génération des ondes P diffractées et la rétrodiffusion des ondes de surface. Afin d'améliorer l'énergie rétrodiffusée, les données sont traitées comme suit: calcul de la dispersion pour chaque tir du profil, - application d'une correction dynamique linéaire (DLMO) permettant d'aplanir l'onde de surface – extraction des ondes guidées à l'aide d'une transformation de Karhunen-Loeve, puis en les soustrayant des données d'origine. Enfin, dans une dernière étape, on somme les traces correspondant à des récepteurs communs ou des points milieu communs, selon le profil souhaité. Les signaux temporels s'alignent. Cependant, l'influence de la cavité n'est pas toujours clairement identifiable. Ces phénomènes ne sont pas présents sur les enregistrements sismiques de surface. Il semble que l'onde se déplace au-dessus de la cavité sans perdre de l'énergie par diffraction et rétrodiffusion.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BITRI A., K. SAMYN K., and JACOB TH.** 2014. Cavity investigation by surface wave tomography and microgravity. NSG 2014 Athens, Gr.
- LEPAROUX D., BITRI, and G. GRANDJEAN G.,** 2000. Underground cavity detection: a new method based on seismic Rayleigh waves,” European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, vol. 5, pp. 33 — 53.
- SAMYN, K., BITRI, A., GRANDJEN, G.** 2013. Imaging a near-surface feature using cross-correlation analysis of multi-channel surface wave data, Near Surface Geophysics, 11, 1-10.

PROSPECTION DE LA « GRAND PLACE » DE BRUXELLES : UTILISATION DE LA METHODE ELECTROSTATIQUE

**BLARY F.¹, SOSNOWSKA P.¹, CHARRUADAS P.¹, VAN NIEUWENHOVE B.¹,
DABAS M.², FLAGEUL S.³, TABBAGH A.³**

¹ Université libre de Bruxelles, Faculté de Philosophie et Sciences sociales, Campus du Solbosch Avenue Franklin D. Roosevelt 50, CPI 133/01, B-1050 Bruxelles,
francois.blary@ulb.ac.be, paulo.charruadas@ulb.ac.be,

philippe.sosnowska@ulb.ac.be, benjamin.van.nieuwenhove@ulb.ac.be

² UMR8546, AOROC, ENS, michel.dabas@ens.fr

³ UMR7619, Métis, Sorbonne Université, sebastien.flageul@upmc.fr,
alain.tabbagh@upmc.fr

RÉSUMÉ

La prospection géophysique en milieu urbain doit faire face à des difficultés particulières du fait de la relative exigüité des surfaces disponibles, de la présence de nombreuses sources de bruit électromagnétique et 'géophysique' ou de l'état de surface du sol. Un nouvel appareillage électrostatique permettant de cartographier la résistivité électrique sur 3 voies correspondant à des profondeurs d'investigation de 1, 1,5, et 2 m a été mis en œuvre dans le but de reconnaître la structure du sous-sol de la Grand Place de Bruxelles et des rues avoisinantes. La prospection a mis en évidence la présence d'un substrat très conducteur à faible profondeur et permis de localiser les vestiges des substructions.

Mots clés : *Prospection électrostatique, milieu urbain, Grand Place de Bruxelles*

ABSTRACT

PROSPECTION OF THE « GRAND PLACE » IN BRUSSELS BY USING THE ELECTROSTATIC METHOD

Geophysical prospection in urban environments faces specific concerns resulting from the limited size of the available surfaces, the presence of electromagnetic and geophysical sources of noise and from the nature of the ground surface. A new electrostatic device (Capacitively Coupled Resistivity) with three measurement channels corresponding to 1, 1.5 and 2 m depths of investigation was used in order to recognize the structure of the underground at Grand Place of Brussels and close by streets. A conductive substratum was observed at low depth and remains were located above it.

Key words: *Electrostatic prospection, urban environment, Grand Place of Brussels*

.1 INTRODUCTION

Les prospections en milieu urbain se heurtent à de nombreuses difficultés spécifiques qui peuvent être classées en quatre catégories : (1) l'exigüité des surfaces accessibles et plus généralement les contraintes physiques ou réglementaires limitant le déploiement des systèmes de mesures et l'extension des cartographies, (2) l'état de surface du sol (qu'il faut éviter d'altérer), (3) l'existence de nombreuses, et potentiellement intenses, sources de bruit électromagnétique ou mécanique (mais ces bruits peuvent éventuellement être utilisés comme sources) et (4) la présence en surface ou immédiatement sous la surface de nombreux objets ou structures perturbant

les mesures (ce que l'on peut appeler un bruit 'géophysique'). A ceci s'ajoute le fait qu'il est souhaitable en ville, comme ailleurs mais plus spécifiquement ici, d'exécuter le plus rapidement possible les mesures pour faciliter l'acceptation sociale de travaux.

Depuis un peu plus de trente ans le radar-sol (GPR) s'est imposé comme une méthode parfaitement adaptée à la détection des réseaux (eau, gaz, électricité, ...) mais, on a aussi cherché à adapter au milieu urbain les différentes méthodes utilisées en subsurface. Pour la mesure de la résistivité électrique ceci a conduit au développement de la méthode électrostatique (Tabbagh *et al.* 1993) qui a pu être employée avec succès tant pour la caractérisation du tissu urbain (Hesse *et al.* 1998) que pour les études d'archéologie du bâti (Dabas *et al.* 2000).

L'étude présentée ci-après s'inscrit dans le cadre d'un programme archéologique portant sur la ville de Bruxelles, elle a associé des mesures GPR et des mesures électrostatiques sur le site de la « Grand Place ». Un nouvel appareillage comportant un résistivimètre multi-voies (Flageul *et al.* 2013) et trois profondeurs d'investigation différentes y a été mis en œuvre.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Alors que la prospection électrique traditionnelle utilise des contacts galvaniques par des électrodes plantées dans le sol, la méthode électrostatique (Capacitively Coupled Resistivity) utilise pour l'injection comme pour la mesure des différences de potentiels résultant de cette injection, des condensateurs ouverts. Ceci permet de réaliser des mesures sur tout type de surface, ce qui est particulièrement bien adapté aux conditions rencontrées en milieu urbain. Son utilisation est néanmoins limitée par deux contraintes: (1) la nécessité d'éviter des impédances trop élevées oblige à utiliser des fréquences de la gamme VLF, 15 kHz dans notre cas, et (2) la fréquence n'étant pas nulle, il faut pouvoir négliger l'influence des phénomènes d'induction électromagnétique ce qui limite la taille des quadripôles utilisables et donc la profondeur d'investigation aux dix premiers mètres environ. La prospection archéologique n'est en général que très peu affectée par ces deux limitations

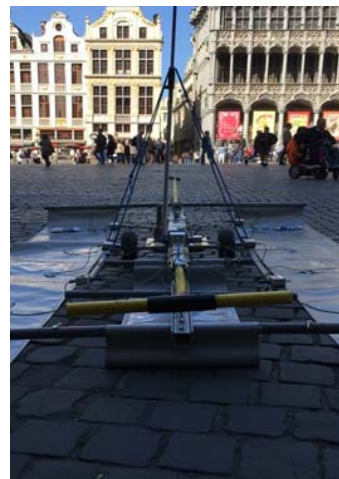
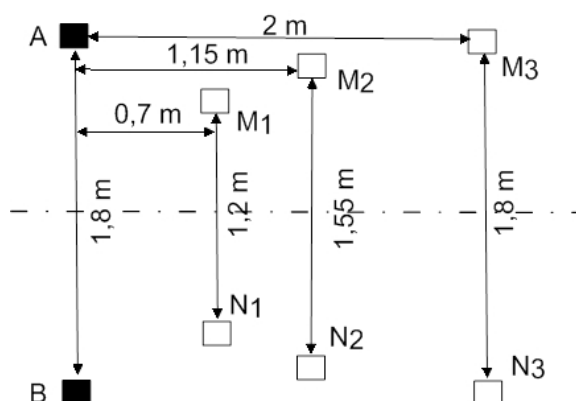


Fig. 1 Schéma montrant la disposition des pôles du MP3 et photographie de l'appareillage in situ

Le multi-pôle utilisé à Bruxelles est un nouveau modèle adapté à la prospection archéologique en ville. Dénommé MP3, il comprend (figure 1) un dipôle d'injection (AB) et trois dipôles de mesure (M1N1, M2N2, et M3N3) disposés en « vol de canard ». Il permet une investigation simultanée sur trois voies correspondant à trois épaisseurs du terrain : respectivement 0 à 1 m, 1,5 m et 2 m environ. Les pôles

constitués par des tissus en fil de cuivre sont disposés sur deux bandes de PVC parallèles (figure 1). Le positionnement des trois mesures a été réalisé à partir d'une station totale, soit en suivant en continu l'appareil de mesure (1Hz), soit en pointant les deux extrémités des profils rectilignes et en utilisant les données du codeur de distance pour replacer chaque point. Le pas de mesure sur chaque profil a été de 0,0488 m. Les profils étaient écartés d'environ 1m.

La totalité de la « Grand Place » a été prospectée ainsi que la cour de l'Hôtel de Ville et 8 rues avoisinantes. Dans plusieurs des rues il a été possible d'effectuer plusieurs profils parallèles donc de cartographier la résistivité apparente. Là où cela n'a pas été possible, les résultats ont été traités et interprétés par profil.

.3 RESULTATS

La mise en œuvre du nouvel appareillage s'est avérée facile et rapide malgré la forte présence touristique, et l'utilisation de la station totale très efficace : les mesures réalisées en suivi continu et en pointant seulement les extrémités des profils sont parfaitement cohérentes.

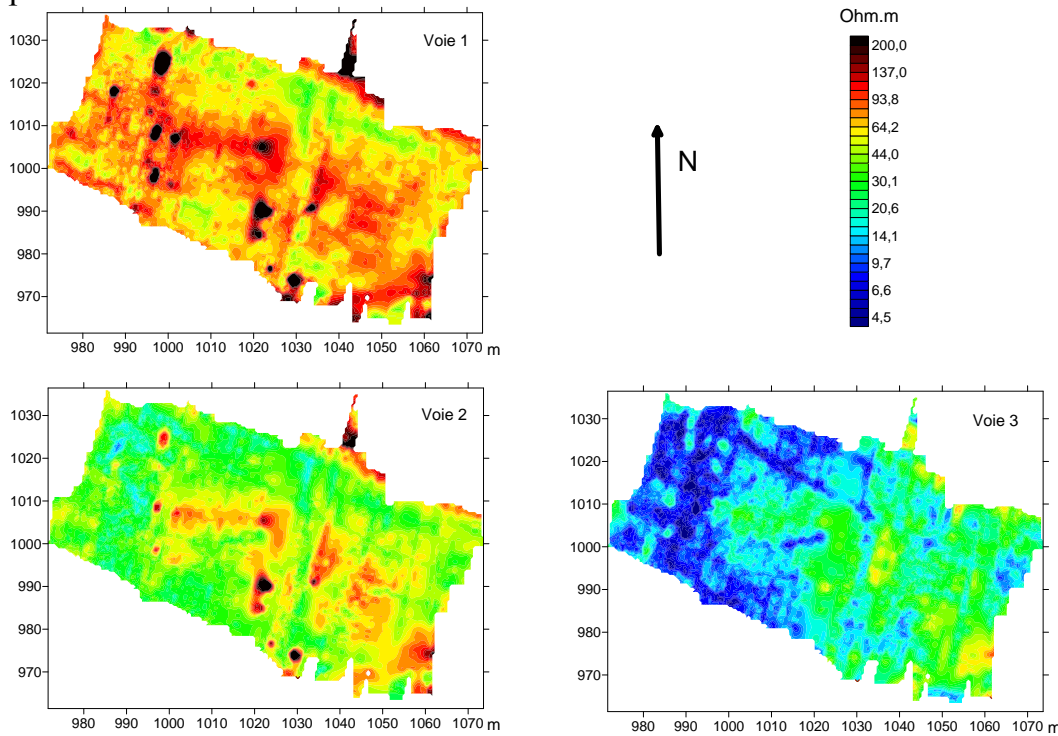


Fig. 2 Cartes de la résistivité apparente obtenues pour chacune des voies sur la « Grand Place » (le repère local utilisé, y vers le Nord et x vers l'Est, est celui des études archéologiques (les valeurs sont en mètres)).

Les mesures ont montré l'existence, à une profondeur relativement faible (< 2 m) pour le centre d'une ville d'occupation ancienne, d'un substrat très conducteur. Elle a été vérifiée par la réalisation dans la cour de l'Hôtel de Ville d'un sondage électrique en utilisant comme électrodes des vis placées entre les pavés. Entre ce substrat et la couche superficielle résistante correspondant aux couches de support et de roulement de la voirie, une couche de résistivité intermédiaire montre des variations latérales d'amplitudes importantes que l'on peut interpréter comme les vestiges d'anciennes constructions. La figure 2 montre les trois cartes de résistivité apparente obtenues pour chacune des voies sur la « Grand Place ».

Une première interprétation géophysique peut être proposée par inversion 1D rapide pour mieux cerner les résistivités des matériaux présents et les contours des structures. En adoptant un modèle à trois couches avec pour la couche superficielle $\rho_1=225 \Omega.m$ et $e_1=0,2$ m, pour la couche intermédiaire ρ_2 variable et $e_2=0,7$ m et pour le substrat $\rho_3=12 \Omega.m$, on obtient la carte représentée sur la figure 3.

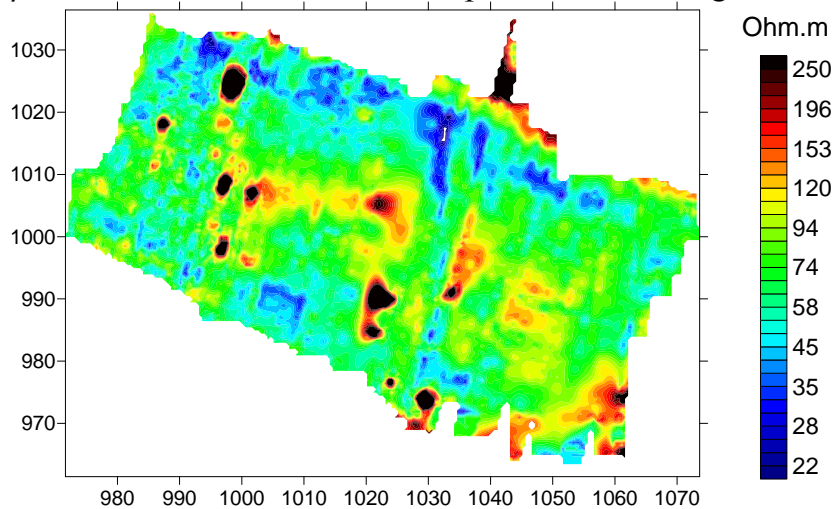


Fig. 3 Cartes de la résistivité interprétée pour la couche intermédiaire, ρ_2 , d'un modèle 1D à trois couches (avec $\rho_1=225 \Omega.m$, $e_1=0,2$ m, $e_2=0,7$ m et $\rho_3=12 \Omega.m$)

.4 CONCLUSION

L'interprétation finale sera proposée après confrontation avec les sources documentaires anciennes, les observations réalisées lors des fouilles dans les rues proches, les résultats des prospections GPR et les informations qui pourront être collectées sur les forages géotechniques réalisés à proximité. La solution technique où les pôles sont placés sur deux tapis parallèles est opérationnelle et pourra être étendue si nécessaire à un nombre plus important de pôles. L'usage de la méthode électrostatique s'est avéré ici particulièrement pertinent puisque la présence d'un substrat très conducteur est défavorable à la méthode GPR.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DABAS M., CAMERLYNCK C., FREIXAS P., 2000** - Simultaneous use of electrostatic quadrupole and GPR in urban context: investigation of the basement of the Cathedral of Girona (Catalunya-Spain), *Geophysics*, 65-2, 526-532.
- HESSE A., ANDRIEUX P., ATYA M., BENECH C., CAMERLYNCK C., DABAS M., FECHANT C., JOLIVET A., KUNTZ C., MECHLER P., PANISSOD C., PASTOR L., TABBAGH A., TABBAGH J., 2002** - l'Heptastade d'Alexandrie, *Etudes alexandrines*, 6, IFAO, éd. J-Y. Empereur, 191-273.
- FLAGEUL S., DABAS M., THIESSON J., REJIBA F., TABBAGH A., 2013** - First *in situ* tests of a new electrostatic resistivity meter, *Near Surface Geophysics*, 11-3, 265-273.
- TABBAGH A., HESSE A., GRARD R., 1993** - Determination of electrical properties of the ground shallow depth with an electrostatic quadrupole: field trials on archaeological sites". *Geophysical Prospecting*, 41-5, 579-597.

RECONSTITUTION HISTORIQUE DE LA GEOMETRIE D'UNE PALEO-RAVINE AU CAP BON (TUNISIE): UTILISATION DE LA TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE EN MILIEU ARGILEUX.

COULOUMA G.¹, RACLOT D.¹, HAMDI R.², CIAMPALINI R.¹

¹ LISAH, Univ Montpellier, INRA, IRD, SupAgro, F-34060 Montpellier, France

² LISAH, Univ Montpellier, INRA, IRD, SupAgro, T-2091 Tunis, Tunisie

RÉSUMÉ

L'érosion ravinatoire est une source importante de dégradation des sols cultivés. L'histoire des ravines et de leur remplissage est importante pour reconstituer les épisodes érosifs sur du long terme. L'objectif de ce travail est d'utiliser la tomographie de résistivité électrique (ERT) pour accéder aux géométries anciennes de ravines en caractérisant les zones de dépôts postérieurs à l'extension maximale des ravines. Plusieurs campagnes de terrain ont permis d'acquérir des caractérisations fines des dépôts d'une ravine du bassin versant de Kamech (Tunisie) par observations morphologiques et analyses physico-chimiques. Ces mesures sont confrontées aux acquisitions géophysiques. Les résultats préliminaires montrent que l'ERT peut contribuer à préciser la géométrie des dépôts, malgré un faible contraste entre les argilites encaissantes (8-12 ohm.m) et les dépôts argileux massifs (2-5 ohm.m). Par ailleurs, l'ERT est efficace pour cartographier l'horizon à fente de retrait (>15 ohm.m). En perspective, le couplage avec d'autres méthodes géophysiques est envisagé, ainsi que la datation des différents dépôts, anciens et plus récents.

Mots clés : tomographie de résistivité électrique, dépôts ravinaires, vertisol, profondeur d'altérite.

ABSTRACT

Gully erosion appears to be the main degradation process in cultivated context. Reconstruction of the geometric evolution of gullies is a way to understand the history of landscape evolution over the long-term. The aim of this work is mainly to test ERT for mapping the current and past morphologies of gullies (shape of deposits). Two field campaigns were conducted in Kamech catchment (Cap Bon, Tunisia) with soil pits, classical soil descriptions and analysis along the hillslope and through a gully. In addition, at the same places, ERT were acquired in the same conditions. Although the contrast of resistivity between deposits and bedrock were weak, the shape of the old gully can be determined. Future works may consist in improving results using additional geophysical tools, like the Spectral Analysis of Surface Waves (SASW), and datation techniques.

Key words: gully deposits, ERT, vertisol.

.1 INTRODUCTION

L'érosion ravinatoire est une source importante de dégradation des sols cultivés, notamment en milieu semi-aride méditerranéen (De Vente et al., 2006). Elle contribue à modifier fortement les modelés des paysages et elle est souvent considérée comme le processus principal d'envasement des retenues artificielles de stockage d'eau (Poesen et al., 1996). La connaissance des processus d'incision est aujourd'hui assez bien connue. En revanche, peu de travaux reconstituent l'histoire des incisions et des

remplissages successifs, utile pour quantifier l'intensité et la chronologie du ravinement sur de longues périodes (Dotterweich et al., 2013).

Les techniques géophysiques constituent aujourd'hui une boîte à outil indispensable pour la détermination de la variabilité spatiale des discontinuités au sein du sol (profondeur de l'altérite, géométrie d'horizons de sol). La tomographie de résistivité électrique (ERT) est une méthode précise en présence de contrastes de résistivité. En milieu très conducteur peu contrasté, la tomographie peut être cependant utilisée dans des conditions d'humidité favorable. Ackerson et al. (2014) proposent cette technique pour cartographier les horizons à fente de retrait, typique des Vertisols. Bernateck-Jakiel et Kondracka (2016) déterminent les zones d'érosion en tunnel (souvent responsables de l'initiation des ravines) avec la tomographie de résistivité couplée à du radar.

L'utilisation de techniques géophysiques pour cartographier la nature et la profondeur des dépôts ravinaires (de nature souvent peu contrastée par rapport aux sols et roches encaissantes) est peu courante. L'objectif de ce travail préliminaire est de vérifier que l'ERT est utile pour préciser la géométrie des interfaces au sein des paléo-ravines, dans un contexte de sol très argileux peu contrasté avec les argilites encaissantes. Cette géométrie est fondamentale pour pouvoir retracer l'histoire du remplissage de la paléo-ravine, en complément d'autres techniques de datation.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Site d'étude

Le bassin versant cultivé de Kamech (263 ha, Cap Bon, Tunisie) est un des sites de l'observatoire de recherche en environnement OMERE. Le site est développé dans des formations sédimentaires marines du Miocène moyen (10-15 Ma) à pendage régulier vers le sud-est. Des strates de grès fins constituent l'ossature du bassin et alternent avec des argilites fortement érodées (voir coupe figure 1). Les sols argileux dominent avec de nombreuses fentes de retrait en période sèche. L'érosion progressive des grès et argilites entraîne des zones de dépôts importantes aux débouchés des axes principaux d'érosions, qui comblent le plus souvent des paléo-ravines.

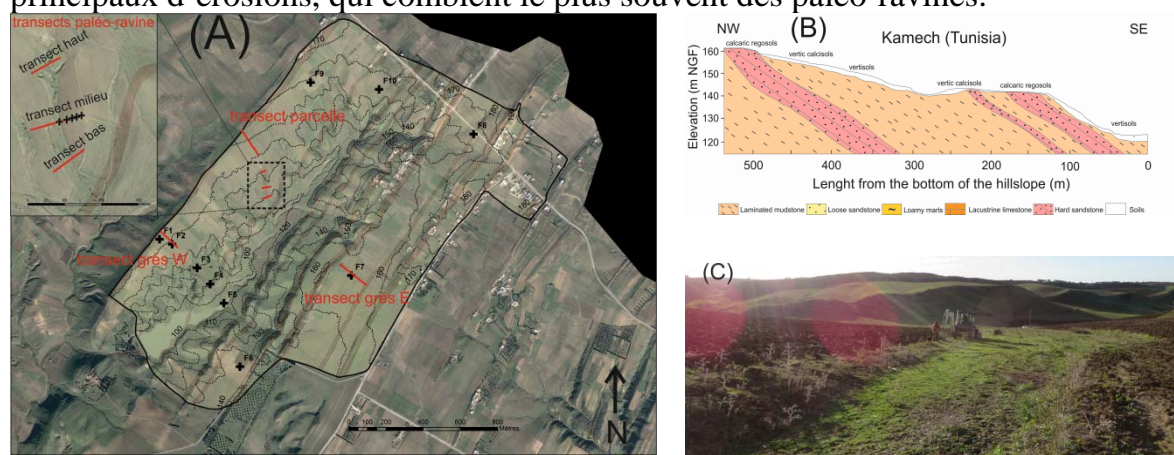


Fig. 1 – (A) Localisation des fosses pédologiques (croix noires) et transects géophysiques, (B) Coupe géopédologique du versant ouest, (C) Photo de la paléo-ravine étudiée

2.2. Tomographie de résistivité électrique (ERT)

Deux campagnes de tomographie de résistivité électrique (syscal junior 48 électrodes) ont été réalisées en condition de réhumectation après la période sèche, en novembre

2016 et 2017 sur l'ensemble des transects visibles sur la carte de la figure 1. Une ravine principale du site, située au centre du versant ouest, a été investiguée (photo figure 1). Par ailleurs, des transects ont été positionnés pour recouper les différentes sources de production de sédiments. Les conditions d'humidité et de température ont été caractérisées pour chaque campagne et se révèlent sensiblement comparables. Le dispositif utilisé correspond à un Wenner-Schlumberger avec un espacement inter électrode de 1 m qui permet la mesure de la résistivité apparente avec une incrémentation moyenne de 0.5 m jusqu'à environ 4 m de profondeur. Des roll-along ont été nécessaires pour couvrir des longueurs de transects importantes (de 72 à 180 m). Les données sont inversées par le logiciel RES2DINV (Locke, 2002).

2.3. Caractérisation des sols et des dépôts ravinaires

Une campagne spécifique a été menée pour caractériser finement les sols du site en complément des prospections pédologiques anciennes lors de la mise en place du site. Une série de profils pédologiques ont été creusés et décrits suivant le protocole DONESOL au droit des transects géophysiques et dans d'autres secteurs en amont du bassin. Six profils complémentaires ont été creusés dans la paléo-ravine. Des analyses physico-chimiques classiques et minéralogiques par diffractométrie aux rayons X ont été réalisées par horizons.

3 RESULTATS PRELIMINAIRES

3.1. Influence des fentes de retrait sur les tomographies

Sur l'ensemble des tomographies réalisées sur le site, les horizons présentant des fentes de retrait sont bien caractérisés, en accord avec Ackerson et al. (2014). La résistivité moyenne est supérieure de 10 ohm.m à la résistivité des horizons sans fente de retrait, avec le même taux d'argile granulométrique. Ces caractéristiques se retrouvent également pour les ravines, avec les horizons à fentes de retrait systématiquement présents à la rupture de pente de part et d'autre de la zone d'atterrissement de la ravine (voir figure 2). Pour les sols peu profonds, directement développés à partir des argilites, les contrastes de résistivités sont insuffisants pour individualiser les horizons à fentes de retrait à partir de l'ERT (par exemple début de la section figure 2).

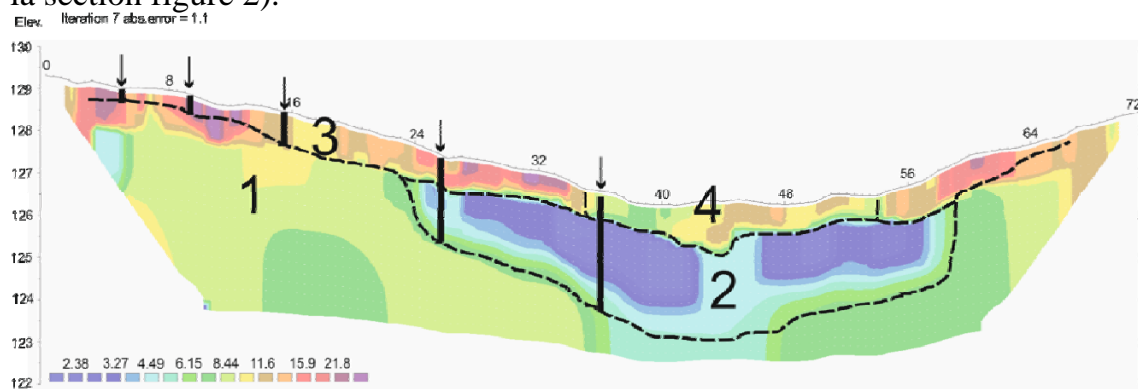


Fig. 2 – Tomographie après inversion recoupant la ravine principale (orientation N/S). Les barres verticales surmontées de flèches représentent les fosses pédologiques décrites. Les numéros correspondent aux différents ensembles d'horizons : (1) argilite en place, (2) horizons de dépôts ravinaires anciens, (3) horizons de sol développés directement sur l'argilite, (4) horizon de dépôt ravinare récent.

3.2. Détection de l'incision initiale de la ravine

La tomographie présentée en figure 2 montre la paléo incision de la ravine d'origine, découpant les argilites en place (1). En effet, le remplissage postérieur à l'incision est constitué de dépôts très argileux (2) dépourvus de structure habituellement rencontrée dans les vertisols. C'est probablement cet aspect qui entraîne une résistivité très faible, augmentant le contact électrique de l'horizon (2-5 ohm.m). En surface, l'Horizon 3 est typique avec une structure prismatique et en plans obliques, complétée par des fentes de retrait saisonnières. L'horizon de dépôt actuel de la ravine (4) présente une texture plus grossière, détectée par l'ERT.

4 PERSPECTIVES

Ce travail préliminaire a permis de montrer qu'il est possible d'utiliser l'ERT, en complément d'observations terrain, pour déterminer l'ancienne incision d'une paléo-ravine et ses comblements successifs. Pour préciser les résultats, deux voies complémentaires seront mises en œuvre. L'ERT sera utilisée en comparant des situations d'humectation différentes. Elle sera également complétée par des techniques de sismique réfraction, qui permettront probablement de préciser les limites de l'ancienne incision, notamment au centre de la paléo-ravine. Enfin, des techniques de datations seront employées pour encadrer les différentes périodes de remplissage. Ces informations permettront de mieux reconstituer l'histoire des grandes phases d'érosion et dépôt sur le bassin étudié.

5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKERSON J.P., MORGAN C.L.S., EVERETT M.E., MCINNES K.J., 2014** – The role of water content in electrical resistivity tomography of a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78 :1552-1562.
- BERNATECK-JAKIEL A., KONDRIACKA M., 2016** – Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. *Geomorph.*, 274 :193-209.
- DE VENTE J., POESEN J., BAZZOPI P., VAN ROMPAEY A., VERSTAETEN G., 2006** - Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. *Earth Surf. Process. Landf.* 31, 1017–1034.
- DOTTERWEICH M., STANKOVIANSKY M., MINÁR J., KOCO S., PAPČO P., 2013** - Human induced soil erosion and gully system development in the Late Holocene and future perspectives on landscape evolution: The Myjava Hill Land, Slovakia. *Geomorph.*, 201 :227-241
- LOKE M.H., 2002** - Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. *Technical note 2nd ed. Malaysia.*
- POESEN J., VANDAELE K., VAN WESEMAEL B., 1996** - Contribution of gully erosion to sediment production in cultivated lands and rangelands. *IAHS Pub.* 236, 251–266.

FUSION DE DONNEES GEOPHYSIQUES ET GEOTECHNIQUES PAR L'UTILISATION DES FONCTIONS DE CROYANCE

DEZERT T.^{1,2}, FARGIER Y.^{2,3}, PALMA-LOPES S.¹, COTE P.¹

¹ IFSTTAR, GERS, GeoEND, 44344 Bouguenais, France, *theo.dezert@ifsttar.fr*

² Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, 41000 Blois, France

³ Univ Lyon, IFSTTAR, GERS, RRO, 69675 Bron, France

RÉSUMÉ

Nous proposons d'utiliser la fusion de données, en particulier la règle de Smets et de PCR6, pour combiner des informations géophysiques et géotechniques et ainsi améliorer la reconnaissance de la subsurface. Ici, nous testons ces approches sur des données synthétiques et mettons en évidence leur capacité à caractériser la présence d'une interface horizontale et d'une lentille sableuse.

Mots clés : Géophysique, géotechnique, fonctions de croyance, fusion de données

ABSTRACT

USE OF BELIEF FUNCTIONS FOR GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL DATA FUSION

We propose the use of Smets and PCR6 combination rules to merge geophysical and geotechnical data and thus improve the characterization of the subsurface. Here, we test these approaches on synthetic data and highlight their ability to characterize the presence of a horizontal interface and a sandy lens..

Key words: Geophysics, geotechnical testing, belief functions, data fusion

.1 INTRODUCTION

Les méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques sont souvent conjointement utilisées pour l'investigation du sous-sol. Les méthodes géophysiques sont non intrusives et fournissent des informations physiques sur de grands volumes de sous-sol avec d'importantes incertitudes associées. Ces incertitudes sont notamment dues aux aspects indirects et intégrant des méthodes ainsi qu'à la résolution des problèmes inverses. Les méthodes de reconnaissance géotechniques sont quant à elles intrusives et fournissent une information plus fiable mais ponctuelle. Une question importante concerne notre capacité à combiner ces deux types de données en tenant compte de leurs incertitudes, imprécisions et distributions spatiales respectives. Dans ce travail, nous suggérons l'utilisation des fonctions de croyance (ou Belief Functions, BF) afin de fusionner des données géophysiques (résistivités électriques, RE) et géotechniques (résistance de pointe, RP) pour montrer leur capacité à dissocier trois ensembles de sols. Concernant le formalisme des BFs, nous renvoyons le lecteur vers Shafer (1976) qui les a introduites. L'utilisation des BFs nécessite: (1) de sélectionner un cadre de discernement (ou Frame of Discernment, FoD) du problème considéré, (2) de déterminer les masses de croyances (Basic Belief

Assignments, BBAs) à partir des données disponibles et (3) de choisir une règle de combinaison.

.2 CONSTRUCTION DU FOD ET DES BBAS

Ici, nous considérons trois classes de sols distincts θ_1 , θ_2 et θ_3 à identifier. Comme le FoD, Θ , doit consister d'un ensemble d'hypothèses exhaustives et exclusives, nous utilisons une quatrième classe θ_4 recouvrant les caractéristiques physiques non incluses dans les trois premiers ensembles. Le FoD est commun aux deux sources d'informations. Nous utilisons $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$. La construction des BBAs pour chaque source d'information consiste à affecter une masse de croyance $m(\cdot)$ à chaque hypothèse de Θ . L'espace des fonctions de masse m est fixé par toutes les disjonctions possibles des hypothèses de Θ , on le note 2^Θ .

2.1. Construction des BBAs associées aux données géophysiques

Nous proposons d'utiliser les RE comme données géophysiques. Nous considérons deux couches de sol: une couche conductrice supérieure ($10 \Omega.m$) représentant des argiles (Palacky et West, 1987) et une couche sous-jacente plus résistive ($10^2 \Omega.m$) représentant des limons. Une anomalie très résistive ($10^3 \Omega.m$) représentant une lentille sableuse de 10,5 m de haut et 21,25 m de large est positionnée entre ces deux premiers milieux. Nous associons ensuite les classes de RE à des sols spécifiques appartenant à Θ : $\theta_1 = [5, 20]$, $\theta_2 = [50, 2.10^2]$, $\theta_3 = [5.10^2, 2.10^3]$ et $\theta_4 = [1, 5[\cup]20, 50[\cup]2.10^2, 5.10^2[\cup]2.10^3, 10^4]$. Nous utilisons le logiciel gratuit Res2Dmod (Loke, 2002) pour simuler l'acquisition de données bruitées à partir d'un modèle fixé (Fig. 1a) puis nous utilisons le logiciel Res2Dinv (Loke et Barker, 1996) pour obtenir la section de RE inversée comme on l'obtiendrait à partir de données de terrain (Fig. 1b).

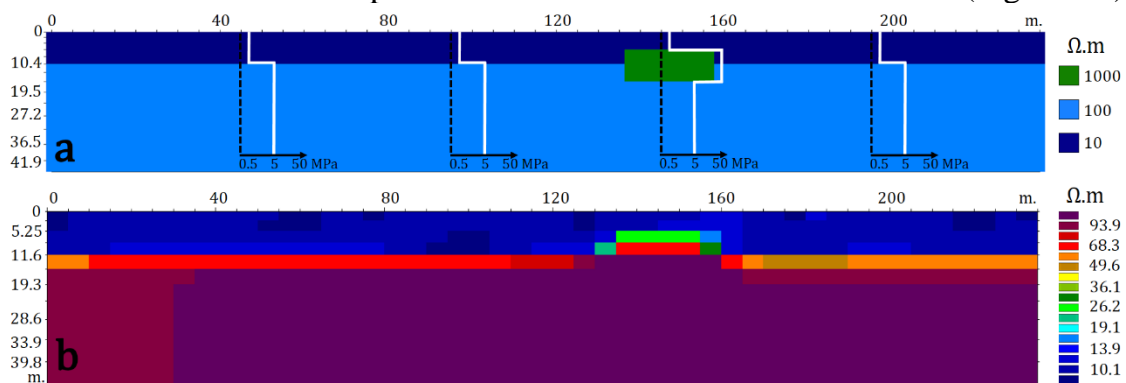


Fig. 1 – Section 2D du sous-sol présentant (a) les RE vraies avec les positions de forage (pointillés) et les RP (blanc) (b) les RE inversées.

La distinction entre les argiles et les limons peut facilement être faite alors que la détection de la lentille n'est pas évidente. Nous utilisons finalement la grille de discrétisation de Res2Dinv pour la BBA $m_i(\cdot)$ correspondant à chaque événement de 2^Θ . Les valeurs des masses sont définies en utilisant les distances de Wasserstein calculées entre une valeur de RE inversée \pm son imprécision issue du

processus d'inversion et l'intervalle correspondant à chaque hypothèse, de sorte qu'une BBA normalisée soit attribuée à chaque cellule de la grille.

2.2. Construction des BBAs associées aux données géotechniques

Les données géotechniques utilisées sont des valeurs de RP (MPa). Nous simulons une acquisition à partir de 4 forages de 40 m, espacés de 50 m, avec acquisition tous les mètres verticalement (Fig. 1a). L'un des forages est positionné de sorte à traverser la lentille sableuse. Nous considérons l'attribution suivante d'intervalles de RP: $\theta_1 = [0.3, 0.7]$, $\theta_2 = [3, 7]$, $\theta_3 = [30, 70]$ et $\theta_4 = [10^{-2}, 0.3[\cup]0.7, 3[\cup]7, 30[\cup]70, 10^2]$ pouvant être associés à des sols spécifiques (Robertson, 1990). Les RP étant de plus en plus élevées des sols à grains fins vers les sols grossiers. Nous supposons une masse de croyance égale à 1 dans le forage et imposons aux masses de croyance une diminution exponentielle latérale. Ainsi, pour chaque cellule, une seconde BBA $m_2(.)$ est fixée, entrant dans le processus de fusion.

3 FUSION DES BBAS ET RESULTATS PRELIMINAIRES

Le processus de fusion est effectué sur deux grilles de mêmes dimensions. La fusion de données consiste à combiner $m_1(.)$ et $m_2(.)$ affectées à chaque cellule de la grille. Nous présentons ici deux règles de combinaison: la règle de Smets (1990) et la règle de Redistribution Proportionnelle des Conflits no. 6 (PCR6) (Dambreville et al. 2009) permettant la redistribution de tous les conflits partiels, proportionnellement aux masses impliquées.

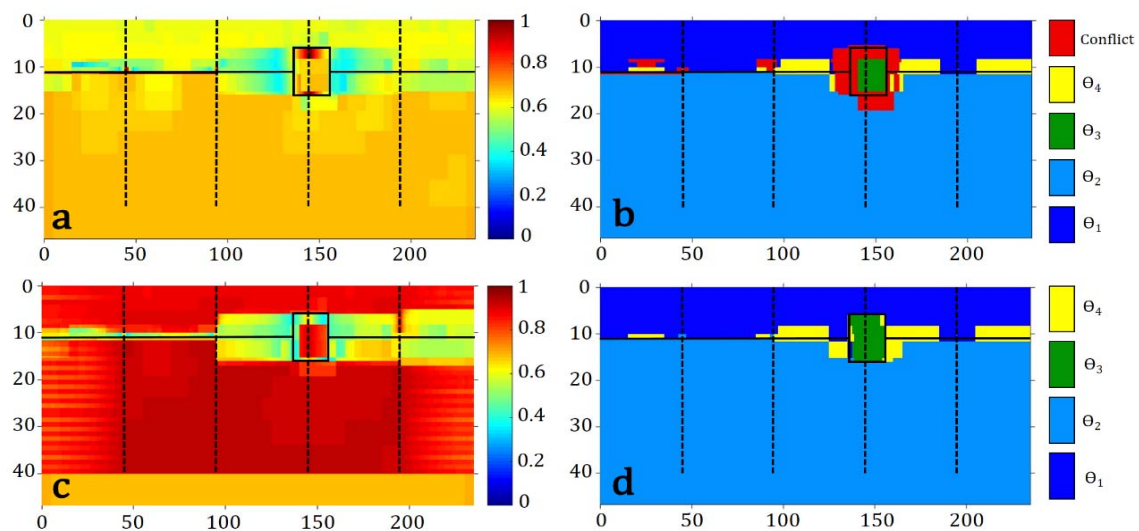


Fig. 2 - Fusion avec la règle de Smets (a, b) et de PCR6 (c, d). (a) et (c) représentent les BBAs associées aux hypothèses avec la plus grande masse, présentées respectivement en (b) et (d).

La règle de Smets permet de quantifier le niveau de conflit, \emptyset , entre les sources d'information, permettant de considérer qu'une hypothèse hors du FOD est envisageable si les deux sources d'information fournissent des données non représentatives d'une même réalité. Grâce à cela, nous pouvons souligner la

présence de zones de conflit autour des interfaces horizontales et de la lentille sableuse (Fig. 2b). La fusion avec la règle de PCR6 (Fig. 2d) est très proche du modèle réel que nous avons imposé (Fig. 1a), permettant de visualiser plus clairement les interfaces ainsi que l'extension horizontale et verticale de la lentille par rapport à l'image de RE inversées (Fig. 1b). Afin de faciliter l'aide à la décision, nous choisissons de représenter les événements présentant les masses de croyance les plus élevées (Fig. 2b et d) et leurs degrés de croyance associés (Fig. 2a et c).

.4 CONCLUSION

L'utilisation des BF's est prometteuse. Elle permet d'exploiter au mieux et de manière automatique des données géophysiques et géotechniques en combinant les avantages de chaque type de méthode (ponctuelle et spatiale). L'information issues des coupes géophysiques permet ainsi de spatialiser des informations contraintes par les sondages géotechniques. Dans le cas présent nous avons pu mettre en évidence la présence d'une interface entre deux milieux bien plus précisément que la méthode géophysique utilisée seule. De plus, la fusion permet d'estimer avec fiabilité l'extension complète d'une variation locale de la géologie avec des valeurs élevées de RE et de RP. La règle de combinaison de Smets met facilement en évidence les zones en conflit. Ces informations seraient précieuses lors d'une campagne de reconnaissance, indiquant les zones où la surveillance doit être renforcée. Dans les futurs travaux, il s'agira d'utiliser cette démarche de fusion sur un ouvrage hydraulique réel de type digue, afin de valider notre méthodologie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DAMBREVILLE F., CELESTE F., DEZERT J., SMARANDACHE F., 2009** – Probabilistic PCR6 fusion rule. *Adv. Appl. DSMT Inf. Fusion*, 3, 137-160.
- LOKE M.H., BARKER R.D., 1996** – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prospect.* 44(1), 131-152.
- LOKE M.H., 2002** – RES2DMOD ver. 3.01: Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods. *Software manual*.
- PALACKY G., WEST G.F., 1987** – Resistivity Characteristics of Geologic Targets. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, pp. 52-129
- ROBERTSON P.K., 1990** – Soil classification using the cone penetration test. *Can. Geotech. J.* 27(1), 151-158.
- SHAFER G., 1976** – A Mathematical Theory of Evidence. *Princeton University Press, Princeton*
- SMETS P., 1990** – The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 12(5), 447-458.

CONTRIBUTION OF TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETICS (TDEM) TO THE KNOWLEDGE OF LAKE TITICACA AQUIFER SYSTEMS, BOLIVIA

GABRIELA P. FLORES AVILÉS ^{1,a}, MARC DESCLOITRES ¹, CELINE DUWIG ¹,
ANATOLY LEGCHENKO ¹, ÁLVARO SORUCO ², MAYRA PÉREZ ², WALDO
MEDINACELI ³

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble-INP, IGE, 38000 Grenoble, France,
gpfloresaviles@gmail.com

²University Mayor of San Andres (UMSA), La Paz, Bolivia

³Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Ministry of Water and Environment of Bolivia), La Paz,
Bolivia

ABSTRACT

The increasing demand for water in Bolivia implies a better knowledge of the resources. The aim of this study is to provide the first insight of hydrogeological functioning of a major aquifer between La Paz-El Alto cities and Lake Titicaca. A total of 171 TDEM geophysical soundings, hydrogeological and hydro-geochemical measurements were acquired, and correlated with geological, borehole lithology and topographic information. The results allowed identifying two multilayered aquifer systems (Piedmont and Lacustrine) and the geometry of the different geological layers. The TDEM method proved to be an appropriate method since the results showed a consistent picture of the hydrogeological functioning of the Katari and Lago Menor Aquifer systems.

RÉSUMÉ

La demande accrue en eau de surface et souterraine en Bolivie implique une meilleure connaissance des ressources. Le but de cette étude est de donner les premières indications sur le fonctionnement des aquifères entre les villes de La-El Alto et le lac Titicaca. 171 sondages géophysiques TDEM et des mesures hydrogéologiques et hydrochimiques ont été mis en œuvre et corrélés avec des informations géologiques (logs de forage) et topographiques. Les résultats permettent d'identifier deux systèmes aquifères majeurs (de piedmont et lacustre) et les géométries des différents compartiments hydrogéologiques. La méthode TDEM s'est révélée appropriée à contruire une image cohérente du fonctionnement des systèmes aquifères Katari et Lago Menor.

Key words: Time-Domain Electromagnetism, groundwater resources, Lake Titicaca, Bolivia

1. INTRODUCTION

The increasing demand for water in Bolivia implies a better knowledge of the resources. Lake Titicaca region faces with rapid growth of the population (El Alto city) and agriculture demand. The Lake itself has experienced severe eutrophication problems in the past ten years mainly from surface water contaminated by urban and industrial discharges (Archundia et al., 2017). However, there is no information about groundwater resources, the functioning of the aquifer systems and the role of groundwater in the nutrient balance of the Lake. This study aims at giving a first insight of the aquifer systems functioning by means of the combination of geophysical, geological, hydrogeological and hydrogeochemical data.

2. MATERIALS AND METHODS

A total of 171 Time Domain Electromagnetic (TDEM) 100x100m coincident loop soundings were performed along 7 profiles with TEMFAST 48 equipment (AEMR technology), in correlation with water levels and hydrogeochemical measurements from 95 wells, as shown in Fig. 1. Results were correlated with geological, hydrogeological, hydrogeochemical and topographic information.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 illustrates NE-SW profile 1 derived from TDEM soundings, showing quaternary deposits lying above mainly tertiary rocks (Fig.1). The quaternary deposits were related as Piedmont and Lacustrine aquifer systems (Lavenu 1991; Argollo et al., 2008). The Piedmont aquifer system, evidenced by TDEM at the NE of the profile, is as follows: In the upper Piedmont, deposits correspond to, from top to deeper formations: 1) Glacial (Qg) sediments, mostly tills-morains with resistivity values $\sim 100\text{-}250\Omega\cdot\text{m}$ and thickness of 60-150m, 2) glacial and fluvio-glacial sediments with resistivity values 40-120 $\Omega\cdot\text{m}$ and a thickness of 60-150m. In the lower Piedmont, layer 1 shows an alluvial fan deposit with resistivity values $\sim 200\Omega\cdot\text{m}$ and a thickness of 40-75m, made of gravels, sands and clay. Below, layer 2 shows gravel intercalations in a clayey matrix with resistivity values of $\sim 30\Omega\cdot\text{m}$ and a thickness $\sim 130\text{m}$. The geophysical interpretation of this aquifer system is confirmed by hydrogeochemical data: Groundwater with Ca(Mg)-HCO₃ facies (EC $\sim 100\mu\text{S}/\text{cm}$) occur in the Alluvial fan deposits while facies of Na(K)-HCO₃ (EC $\sim 200\text{-}400\mu\text{S}/\text{cm}$) are found in fluvio-glacial outwash sediments. The Lacustrine aquifer system is as follows: at the SW in the flat part of the profile, from top to deeper formations, TDEM evidences 1) terrace deposits (Qt) with resistivity values (40-60 $\Omega\cdot\text{m}$) and a thickness up to 100m. At the extreme SW clayey and silty layers with resistivity values $\sim 15\Omega\cdot\text{m}$ and a thickness of 2-20m are attributed to the Ulloma formation (Qull), 2) Below, layers may correspond to the ancient Lake deposits of “Cabana and Mataro” units (Qcb-mt) composed of sands and clays with resistivity values $\sim 30\Omega\cdot\text{m}$ and a thickness of 40-100m. In the Lacustrine aquifer System regional groundwater flow direction is towards the NW and groundwater exhibits Na(K)-Cl facies (EC $\sim 600\text{-}1700\mu\text{S}/\text{cm}$) (Fig.2). Both Plio-quaternary Piedmont and Lacustrine aquifers lie above tertiary or Paleozoic rocks considered as the basement of shallow aquifers.

4. CONCLUSIONS

TDEM method proved to be a suitable investigation method in the field area: 1) the existence of two different hydrogeological systems and their limits are evidenced (Lacustrine and Piedmont), 2) the geometry of the different quaternary deposits are delineated and 3) the depth to the top of tertiary substratum representing the bottom of the aquifers is also delineated. Hydrogeological and hydrogeochemical information confirmed the existence of two aquifer systems. Based on this new information, a hydrogeological model will be built to help resources management.

Acknowledgements This study was undertaken with the financial support of the Government of the Plurinational State of Bolivia through Program “100 Scholarships for Postgraduate Education within the Framework of Technological and Scientific Sovereignty” (Ministry of Education - MINEDU) and partly funded by the French program LABEX OSUG@2020, ANR grant n° 10-LABX-56). AEMR team (P.Barsukov) is warmly acknowledged for efficient distant technical support during the field operations.

REFERENCES

ARCHUNDIA D., DUWIG C., SPADINI L., UZU G., GUEDRON S., MOREL MC., CORTEZ R., RAMOS RAMOS O., CHINCHEROS J., MARTINS J.M.F., 2017 – How Uncontrolled Urban Expansion Increases the Contamination of the Titicaca Lake Basin (El Alto-La Paz, Bolivia). *Water Air And Soil Pollution*, 228 ;44.

ARGOLLO J, IRIONDO M., 2008 – El Cuaternario de Bolivia y Regiones vecinas. ed.: Moglia (ISBN 9872463700), 280 pages.

G.E.O.S.I.R.H., 2017 – Infraestructura de Datos Espaciales. Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca available at <http://geosirh.riegobolivia.org/layers/geosirh>. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.

LAVENU A., 1991 – Formación geológica y evolución. El Lago Titicaca Síntesis y Conocimiento Limnológico Actual, Claude Dejous y Abdré Iltis editores O.R.S.T.O.M, *La Paz, Bolivia*, 589 pages.

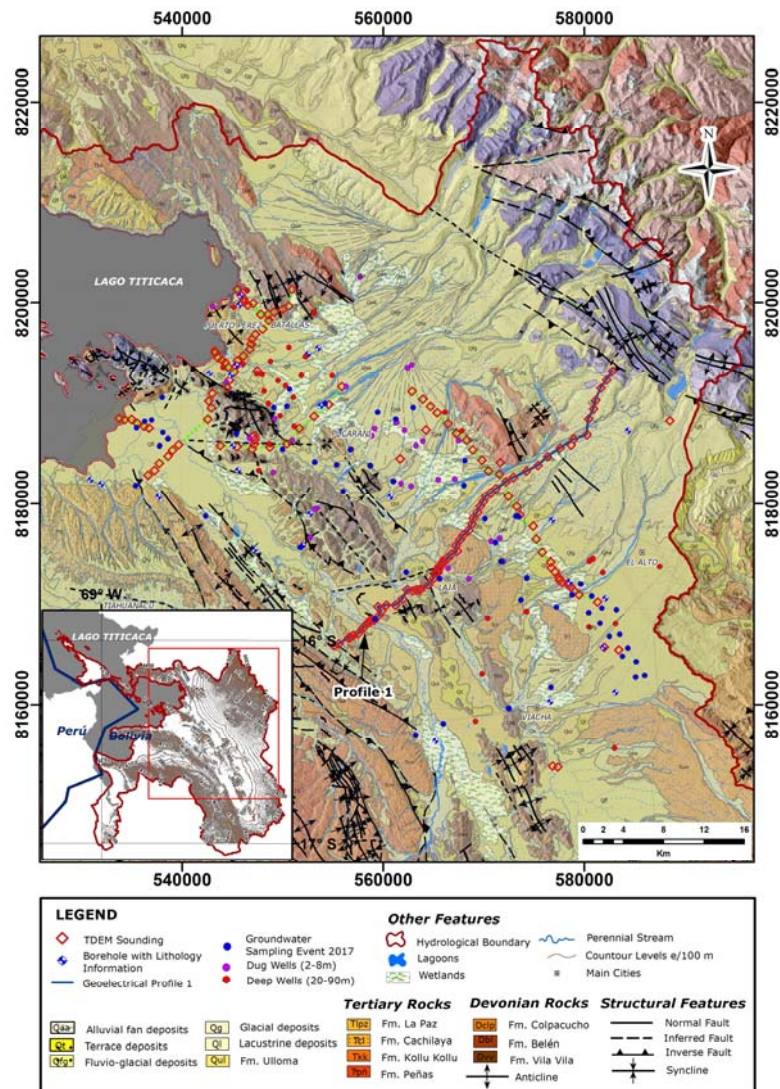


Figure 1. (Bottom) Location of the study area showing the Katari and Lago Menor basin (SE of Lake Titicaca). (Top) Geological and Structural map of the basin, showing TDEM soundings, observation wells for hydrogeological and hydrogeochemical measurements and available information of borehole lithology.

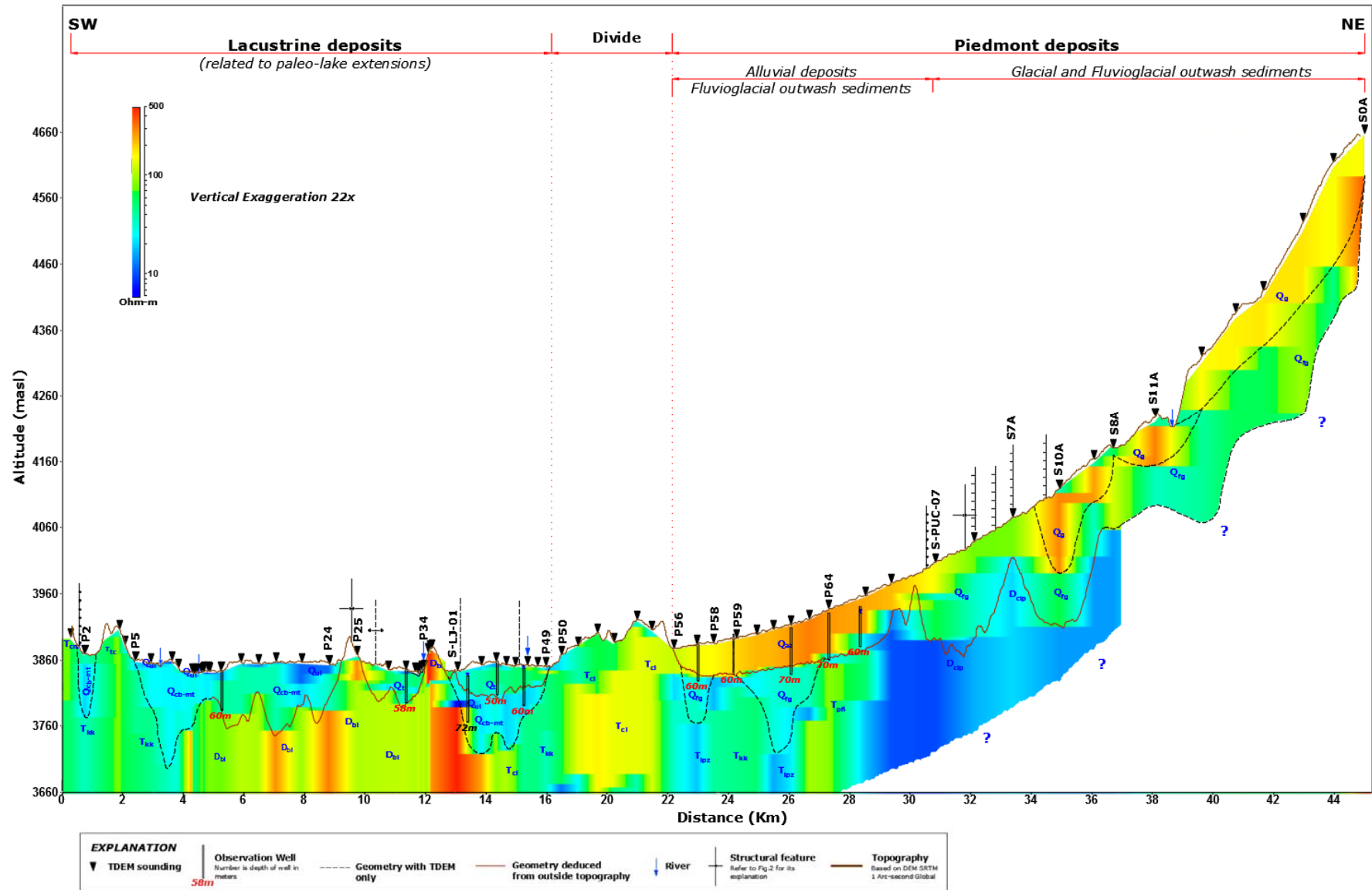


Figure 2. Geoelectrical Profile 1 derived from TDEM soundings and overlaid by the geological formations found in the area (Fig.1). The available boreholes and topography were used for the evaluation and confirmation of the resulted resistivity profiles.

MAGNETOMETRES VECTORIELS FLUXGATE : POSSIBILITES DE MESURE ET D'INTERPRETATION AU SOL, EN DRONE ET AEROPORTEES POUR L'ETUDE DU SOUS-SOL

GAVAZZI B.¹, LE MAIRE P.^{1,2}, MERCIER DE LEPINAY J.¹, CALOU P.^{1,3}, MUNSCHY M.¹

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg et CNRS (IPGS UMR 7516), Strasbourg, France. bgavazzi@unistra.fr

² CARDEM/EUROVIA, Bischheim, France.

³ ECA-EN, Groupe ECA, Coueron, France.

RÉSUMÉ

En géophysique appliquée les méthodes magnétiques sont aujourd'hui utilisées principalement pour deux types de mesure : au sol à l'aide de gradiomètres pour de l'imagerie de proche surface (archéologie, BTP, dépollution) ou aéroportées à l'aide de magnétomètres scalaires et d'unités de compensation pour l'étude à plus large échelle (exploration de ressources). Les dernières avancées en mesure et interprétation à l'aide de magnétomètres vectoriels fluxgate permettent de mettre au point des systèmes de mesure au sol, en drone et aéroportés plus précis et/ou moins coûteux que les standards actuels et d'offrir une échelle continue de niveaux de mesure du sol à l'aérien et ainsi d'élargir les potentiels applicatifs pour l'étude du sous-sol. Différentes applications et comparaisons avec les standards actuels sont illustrés par des études de cas en archéologie, en BTP et en exploration pour la géothermie.

Mots clés : Magnétisme, fluxgate, archéologie, BTP, géothermie.

ABSTRACT

FLUXGATE VECTOR MAGNETOMETERS: POSSIBILITIES OF MEASUREMENT AND INTERPRETATION FOR GROUND, UAV AND AIRBORNE SURVEYS FOR THE STUDY OF THE UNDERGROUND

In applied geophysics magnetic methods are currently used mainly for two type of measurements: on the ground with gradiometers for imaging the subsurface (archaeology, building and public works) or airborne with scalar magnetometers and compensation units for studies at a larger scale (resource exploration). Latest advances in measurement and interpretation with fluxgate vector magnetometers allow the conception of measuring devices usable on ground, on UAV or airborne with better precision and/or cost reduction compared to current standards. This also offers a continuous scale of measurement levels from ground to airborne and therefore increases the potential of application of the method. Different applications and comparisons with current standards are presented through case studies in archaeology, public works and geothermal exploration.

Key words: Magnetism, fluxgate, archaeology, buildings and public work, geothermal exploration.

.1 INTRODUCTION

Les méthodes géomagnétiques sont aujourd'hui utilisées pour un très large panel d'applications à la fois dans les milieux académiques et industriels : archéologie, études environnementales, BTP, exploration de ressources... Au sol, les études consistent généralement à produire des cartes à l'aide de gradiomètres verticaux et d'en interpréter

directement les hétérogénéités du sous-sol. Il s'agit d'ailleurs de la méthode géophysique la plus répandue pour les études archéologiques ou la dépollution pyrotechnique. Pour les mesures aéroportées des magnétomètres scalaires sont utilisés en combinaison avec des systèmes de compensation des aimantations du porteur en temps réel. Ce type de mesure est réservé à des études de grande envergure pour des questions de coût et de logistique. Afin de dépasser les limites de chacun de ces milieux l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) conduit des recherches à la fois sur la mesure, le traitement et l'interprétation des données magnétiques. Les résultats ont ainsi permis de mettre au point un système de mesure multi-échelle à l'aide de magnétomètres fluxgate à trois composante. L'objet de cette présentation est de présenter comment les magnétomètres fluxgate et les outils interprétatifs issus des méthodes potentielles permettent d'obtenir des résultats plus précis et/ou moins coûteux que les systèmes actuels ainsi que d'offrir de nouvelles échelles de mesure à travers différents cas d'étude.

.2 MATÉRIEL : FLUXGATE ET SYSTEME DE MESURE IPGS

Les magnétomètres fluxgates mesurent l'intensité du champ magnétique dans trois directions orthogonales, c'est-à-dire trois composantes. Ces magnétomètres sont robustes, peu coûteux et consomment peu mais ce sont des instruments relatifs qui nécessitent d'être étalonnés. En effet, on note trois types d'erreur sur chacun des trois senseurs d'un magnétomètre : l'offset, la sensibilité et la non-orthogonalité. MUNSCHY et al. (2007) démontre que les paramètres de correction de ces erreurs peuvent être inversés à partir d'un processus simple : on fait varier l'attitude du capteur dans une zone où le champ peut être considéré constant. Les variations enregistrées sont alors liées seulement aux erreurs du magnétomètre ainsi qu'aux effets des aimantations de l'équipement. L'application des correctifs obtenus permet ainsi d'étalonner les capteurs et de compenser les aimantations de l'équipement sans requérir à une unité de compensation en temps réel. L'IPGS a mis au point un système de mesure mono et multi-capteurs pouvant être montés sur tout type de porteur (GAVAZZI et al., 2016). La procédure d'étalonnage et de compensation permet d'obtenir des données exploitables en géophysique appliquée et d'une précision similaire quel que soit le porteur (**Fig. 1**).

.3 CAS D'ETUDE

3.1. Au sol : haute résolution en archéologie

Le cas d'étude présente une partie des résultats de l'étude du site de Qasr 'Allam dans l'oasis de Bahariya du désert occidental égyptien obtenus à l'aide du système de l'IPGS monté sur un sac à dos et qui ont permis de découvrir et protéger un ensemble culturel invisible en surface (GAVAZZI et al., 2017). Les résultats sont comparés aux résultats acquis sur la même zone par l'Institut of Archaeology and Ethnology de l'académie des sciences polonaise à l'aide d'un gradiomètre très commun en archéologie et en BTP (Geoscan FM 256). La comparaison montre que les mêmes interprétations de canaux d'irrigation peuvent être faites sur les deux jeux de données. Néanmoins les anomalies de large longueur d'onde ne sont pas visibles sur la gradiométrie et l'utilisation de transformées des méthodes potentielles induit plus d'imprécisions que sur la mesure de l'IPGS. De plus, la mesure multi-capteurs de l'IPGS est dix fois plus rapide que l'acquisition au gradiomètre.

3.2. Mesures au sol et en drone pour la dépollution pyrotechnique

La mesure magnétique est aujourd'hui indispensable pour la dépollution pyrotechnique. Les mesures au sol ou en drone sur la BA112 ont permis de mettre au jour de potentielles

munitions ainsi que des tranchées, des réseaux et d'anciennes fondations. L'utilisation de la mesure du champ total permet d'inverser position horizontale, profondeur et aimantation des munitions à partir du signal analytique. La méthode connaît néanmoins certaines limites lorsque la géométrie est complexe.





Système de mesure	Ecart-type avant correction	Ecart-type avant correction
 Magnétomètre	21	0.3
 Sac à dos	97	0.7
 Drone (DJI Matrice 100)	54	1
 Avion (Maule MX7)	102	1.9

Fig. 1 - Ecart-type des mesures avant et après corrections des paramètres inversés lors d'une procédure d'étalonnage et de compensation pour un magnétomètre seul (Bartington MAG03), système sur sac à dos, un drone et un avion.

3.3. Mesures en drone pour l'étude lithologique et structurale à haute résolution

A travers deux exemples dans des contextes d'exploration pour des projets de géothermie profonde en France et à St-Christophe-et-Niéves des mesures à différentes altitudes en drone et en avion avec le système de l'IPGS sont comparées. Ainsi, la mesure à 25 m du sol révèle des informations plus détaillées sur le sous-sol qu'un levé plus traditionnel à 100 m. La comparaison entre un levé en avion avec le système de l'IPGS et un levé industriel en hélicoptère montre une qualité similaire entre les deux dispositifs (**Fig. 2**) pour un coût 20 à 50 fois moins important pour le système à base de fluxgate.

4 CONCLUSION

Les magnétomètres vectoriels peuvent être une bonne alternative aux systèmes existants en géophysique appliquée. En aéromagnétisme ils permettent d'obtenir des résultats similaires aux standards industriel à une fraction de leur coût. Au sol, ils permettent d'obtenir des résultats plus sensibles que ceux des gradiomètres et sont moins soumis aux imprécisions

lors de l'utilisation de transformées des méthodes potentielles, le tout en étant la plupart du temps plus rapide. De plus, ils permettent de faire de l'acquisition en drone, ce qui comble le saut d'échelle entre le sol et l'aérien et ouvre ainsi tout un nouveau champ de potentiels applicatifs.

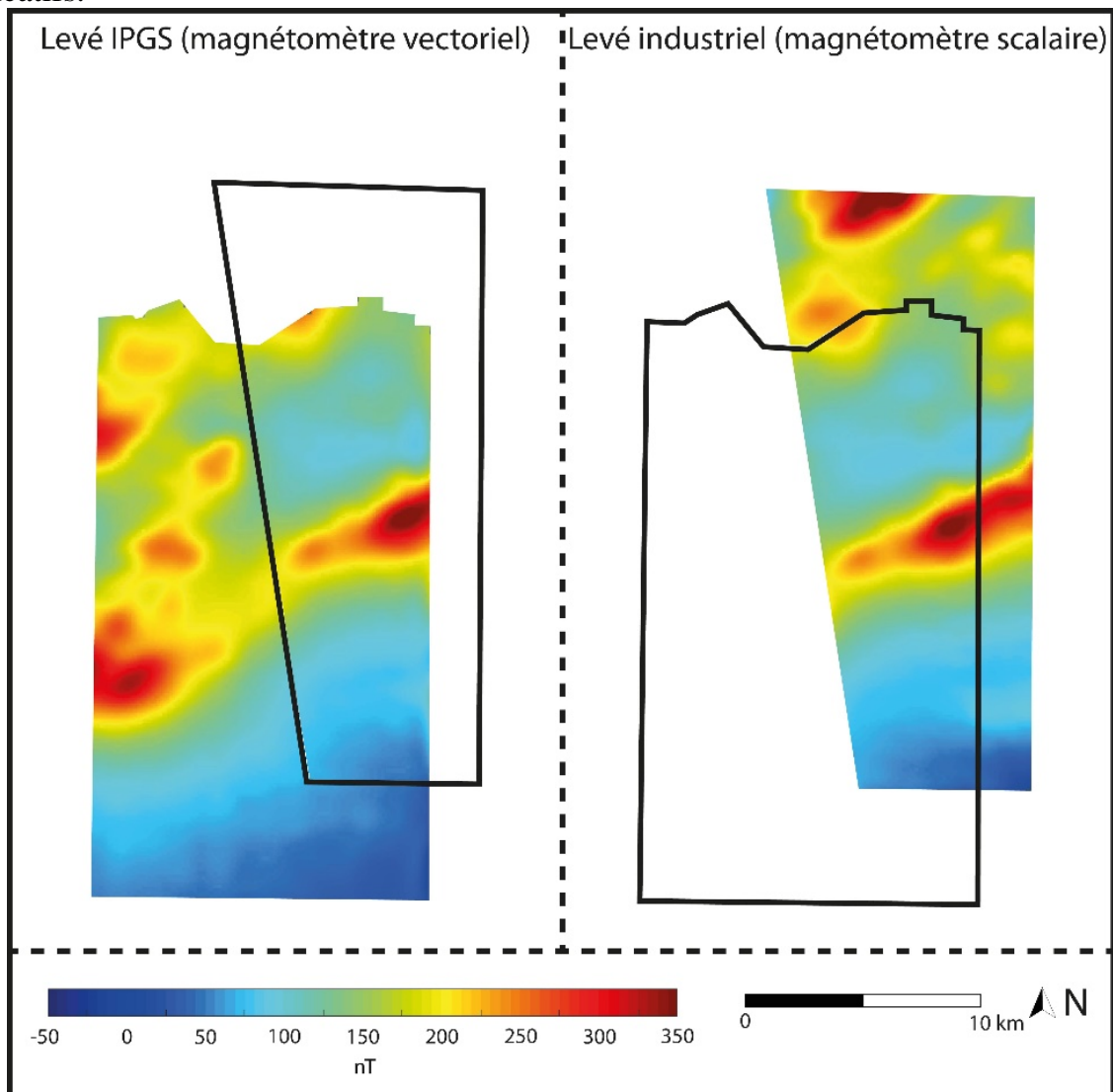


Fig. 2 - Comparaison entre les résultats d'un levé en avion (Maule MX7) réalisé par l'IPGS à l'aide de son propre système à base de fluxgate 3-composantes (Bartington MAG03) et d'un levé industriel en hélicoptère (Ecureuil AS 350) réalisé par Geophysics GPR International Inc. à l'aide d'un système à base de magnétomètre scalaire au césium (Geometrics) et d'un système de compensation (RMS Instruments).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GAVAZZI B., ALKHATIB-ALKONTAR R., MUNSCHY M., COLIN F., DUVETTE C., 2017** – On the Use of Fluxgate 3-Axis Magnetometers in Archaeology: Application with a Multi-sensor Device on the Site of Qasr 'Allam in the Western Desert of Egypt. *Archaeol. Prospect.*, 24(1), 59-73. doi: 10.1002/arp.1553.
- GAVAZZI B., LE MAIRE P., MUNSCHY M., DECHAMP A., 2016** – Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys. *The Lead. Edge*, 35(9), 765-797. doi: 10.1190/tle35090795.1.
- MUNSCHY M., BOULANGER D., ULRICH P., BOUFLANE M., 2007** – Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation. *J. of Appl. Geophys.*, 61, 168-183. doi: 10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.

LOCALISATION D'UN RESEAU DE DRAINAGE AGRICOLE PAR TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE COUPLEE A UNE INJECTION D'AIR CHAUD

H. HOCINE¹, J. TOURNEBIZE¹, M. DOREL¹, C. CHAUMONT¹, B.
VINCENT¹, R. CLEMENT²

¹ Irstea, UR HYCAR, 1 Rue Pierre Gilles de Gennes, 92160 Antony.

² Irstea, UR HBAN, 1 Rue Pierre Gilles de Gennes, 92160 Antony.

³ Irstea, UR-RIVERSAAL, BP 32108, 69616, 5 Rue de la Doua, 69100 Villeurbanne.

RÉSUMÉ

En France, la plupart des réseaux de drainage agricole ont été installés dans les années 1980. Ces réseaux vieillissant nécessitent actuellement l'entretien. Dans la plupart des cas, la localisation de ces réseaux est difficile à cause de l'absence des plans d'installation. L'objectif de cette étude est d'utiliser une méthode non destructive pour la détection des drains qui consiste en une injection d'air dans le réseau de drainage combinée à un suivi géophysique en time-lapse par la méthode de résistivité électrique. Trois modes d'injection ont été utilisés dans cette étude : (1) l'injection d'air chaud (25°C à 35°C) à haute pression ; (2) l'injection d'air chaud à basse pression; et (3) l'injection d'air à la température ambiante et à haute pression (150 mbar à 200 mbar). Les résultats ont montré que l'injection de l'air à haute température n'avait aucun effet sur la résistivité du sol. Alors que l'injection de l'air à haute pression modifie la résistivité électrique du sol mesurée à proximité des drains.

Mots clés : *Détection des drains. Géophysique, Température, Pression.*

ABSTRACT

TITLE: LOCALIZATION OF AN AGRICULTURAL DRAINAGE NETWORK BY ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY COUPLED WITH A HOT AIR INJECTION.

In France, most of agricultural drainage systems were installed in the 1980s. These systems have been aged since then and now they need maintenance. Sometimes, the location of these systems is unknown because of the lack of their installation plans. The main objective of this study is to use a non-destructive method to localize the drains. This method consists on air injection at the outlet of the drainage network combined with time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) monitoring. Three injection modes were used in this study: (1) the injection of hot air (25°C to 35°C) with high pressure; (2) the injection of hot air with low pressure; and (3) the injection of air at ambient temperature and high pressure (150mbar to 200mbar). The results showed that the hot air injection had no effect on soil resistivity. Whereas, the air with high pressure modify the measured soil electrical resistivity near the drains.

Key words: *Drain's detection, Geophysics, Temperature, Pressure.*

.1 INTRODUCTION

L'agriculture est un enjeu économique majeur en France qui ne cesse de se développer. La technique de drainage agricole est largement utilisée en France. Les grandes opérations nationales de développements de cette technique se sont produites dans les années 1980. Le drainage agricole représente environ 10 % de la surface agricole utile et continue d'augmenter. Aujourd'hui, il se pose la question de localisation et d'évaluation de l'état de ces réseaux. L'enjeu étant le renouvellement ou la réhabilitation des réseaux vieillissants. Il est donc important de savoir si une parcelle agricole est équipée d'un système de drain et surtout de savoir si celui-ci est encore actif. La perte ou parfois l'inexistence des plans d'installation du drainage rend la localisation des drains difficile. Le recours à des méthodes de détection des drains enterrés s'avère nécessaire.

Il existe différentes méthodes géophysiques qui ont été testées afin de localiser les drains (Allred et al., 2004). Parmi ces méthodes, seule la prospection géoradar donne satisfaction. Néanmoins, cette méthode permet de détecter seulement des drains avec des diamètres important (>100mm) et la détection des drains dont le diamètre est inférieur n'est pas assurée. Le recours à la méthode de résistivité électrique semble être une solution prometteuse à petite échelle. Toutefois, l'utilisation simple de cet outil ne permet pas de détecter un objet trop petit dans les sols. D'autre part en période de drainage, les variations de la saturation du sol sont de l'ordre de 2 à 3%. Ces variations ne sont pas assez importantes pour produire un contraste de résistivité électrique majeure permettant de localiser la zone drainée (Clément et al., 2014). Pour créer ce contraste de résistivité électrique, Jouen et al. (al. 2016) ont injecter de l'eau à la sortie du réseau de drainage pendant la période estivale et ont suivi en « Time-lapse » l'évolution de la résistivité électrique de la parcelle drainée. Le contraste crée par l'exfiltration de l'eau à travers les drains permet ainsi de les localiser et de démontrer la fonctionnalité du réseau. Toutefois, l'application de cette méthode à grande échelle nécessite l'utilisation d'un volume d'eau important.

Pour pallier à ce problème, nous proposons dans cette étude d'injecter l'air chaud et l'air en surpression à partir de la sortir du réseau de drains et de suivre l'évolution de la résistivité dans le sol dans le temps.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'expérience a été réalisée sur la parcelle de Boissy-le-Châtel, qui fait partie de l'observatoire GIS ORACLE, située à 70 km à l'est de Paris. La parcelle d'une superficie de 600 m² est drainée artificiellement en 1972. Chaque drain est un assemblage de tuiles en poterie de 40 mm de diamètre intérieur, 60 mm de diamètre extérieur et 30 cm de longueur. Les drains sont posés à 60 cm de profondeur et reposent sur une couche d'argile semi-imperméable.

L'expérimentation de cette étude consiste à injecter de l'air chaud par la sortie du réseau du drainage et suivre l'évolution de la résistivité dans le sol de la parcelle. La ligne ERT est positionnée perpendiculairement à la direction connue des

drains. En même temps, la température est suivie à différentes profondeurs sur cette parcelle.

Au début de l'expérimentation, l'air chaud est injecté à haute pression. Les observations de la résistivité montrent une augmentation de la résistivité du sol de 10 à 25% autour des drains (figure 1). Ces résultats montrent que l'injection de l'air chaud et à haute pression influence sensiblement la mesure de la résistivité électrique autour des drains.

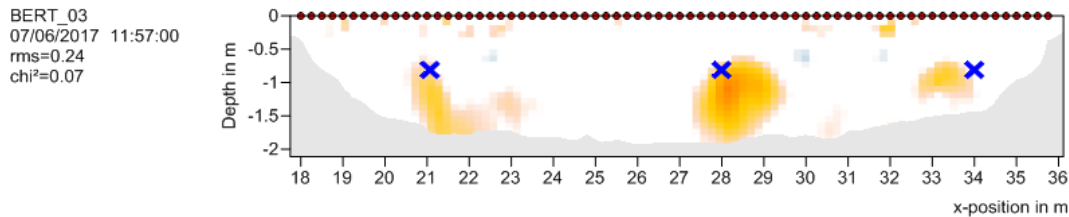


Fig. 1 - Variation de la résistivité pendant l'injection de l'air chaud (35°C) par rapport à l'état initial en utilisant une turbine à fort débit (23 minutes après le début de l'injection)

Pour distinguer séparément l'impact de la pression et de la température sur les variations de la résistivité, nous avons expérimenté séparément l'impact de chaque paramètre. Dans un premier temps, nous avons utilisé une turbine à faible débit d'injection pour voir l'impact de l'injection de l'air chaud sur la résistivité du sol. Ensuite, nous avons utilisé un compresseur d'air pour injecter l'air à haute pression (150 à 200 mbar), à température ambiante.

.3 RESULTATS ET DISCUSSION

Tout au long de l'expérience de l'injection d'air chaud, la température mesurée à l'entrée du réseau du drainage augmente jusqu'à 45°C avec une moyenne autour de 35°C. Toutefois, cette augmentation a peu d'impact sur la température du sol. Les capteurs de température installés à 60cm de profondeur, qui sont proches des drains, présentent de très faibles variations. Les capteurs installés à 30cm de profondeur qui sont proches de la surface présentent des variations liées au cycle diurne de la température. Ces résultats montrent que le dispositif expérimental utilisé dans cette étude ne permet pas de réchauffer le sol autour des drains. La visualisation du profil de la résistivité (Figure 2) démontre qu'il n'y a pas de variations de résistivité autour des drains.

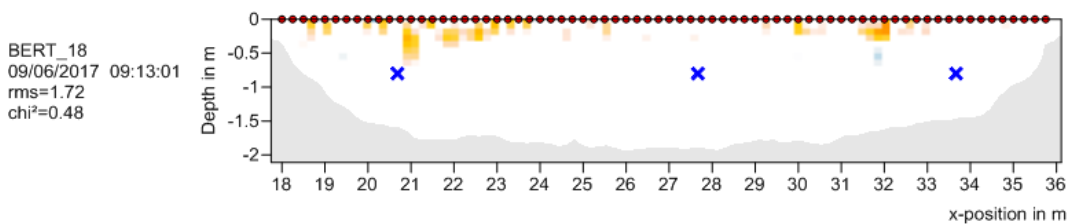


Fig. 2 - Variation de la résistivité pendant l'injection de l'air chaud (35°C) par rapport à l'état initial en utilisant une turbine à faible débit.

Avec la mise en place de l'injection d'air à haute pression, nous remarquons une variation rapide de la résistivité autour des drains par rapport au reste du profil ERT (Figure 3). Ce résultat démontre que la variation de la résistivité observée lors de la première expérience (Figure 1) est due à l'augmentation de la pression autour des drains.

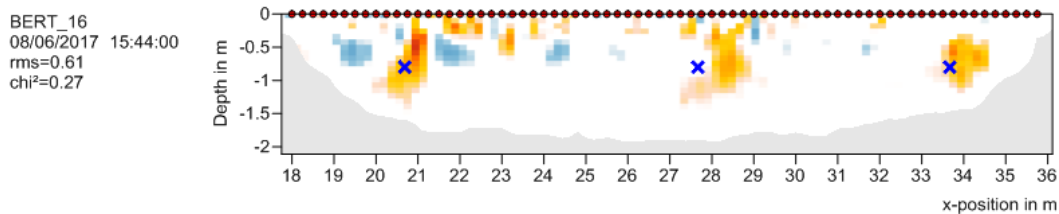


Fig. 3 - Variation de la résistivité pendant l'injection d'air en surpression (150/200 mbar) par rapport à l'état initial.

.4 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le dispositif expérimental utilisé pour réchauffer le sol autour des drains pour influencer la valeur de la résistivité électrique n'est pas efficace. Réchauffer le sol est très compliqué, la forte inertie thermique du milieu (le sol et le vide dans les drains) limite cette possibilité.

Cependant, nous avons observé une augmentation de la résistivité suite à l'injection de l'air à haute pression. Sachant que la teneur en eau est directement influencée par les variations de la pression dans le sol, cette augmentation de la résistivité est donc liée à la variation de ses deux grandeurs autour des drains.

Cette méthode peut être une solution opérationnelle pour détecter les drains agricoles, mais il faut résoudre les problèmes de mise en œuvre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLRED, B.J., FAUSEY, N.R., PETERS, L. JR., CHEN, C., DANIELS, J.J., YOUN, H., 2004 -- Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods. *Applied engineering in agriculture* 2004 May, v. 20, no. 3.

CLÉMENT, R., MOREAU, S., HENINE, H., GUÉRIN, A., CHAUMONT, C., TOURNEBIZE, J., (2014) – On the value of combining surface and cross-borehole ERT measurements to study artificial tile drainage processes. *Near Surface Geophysics*, 1–14.

JOUEN, T., R. CLÉMENT, H. HENINE, C. CHAUMONT, B. VINCENT AND J. TOURNEBIZE (2016) – "Evaluation and localization of an artificial drainage network by 3D time-lapse electrical resistivity tomography." *Environmental Science and Pollution Research*: 1-13.

ÉVALUATION DES VARIATIONS SPATIALES DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES DES SOLS À L'AIDE DU RADAR DE SOL.

HOUZÉ C.¹, SAINTENOY A.¹, PANNECOUKE L.², LE COZ M.³, DE FOUQUET C.²

¹ GEOPS, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Rue du Belvédère, Bât. 504-509, 91405 Orsay, France, clemence.houze@u-psud.fr

² MINES ParisTech, PSL University, Centre de géosciences, 35 rue St Honoré, 77300 Fontainebleau, France.

³ Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN)

RESUME

L'extension d'une zone de contamination à l'aplomb d'un déversement de polluant dépend fortement de l'hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques du sous-sol. Afin de quantifier ces paramètres in situ, une méthode hydro-géophysique consiste à inverser des données radar de sol acquises lors d'une infiltration d'eau de type Porchet. Cette technique est déployée sur une sablière près d'Auffargis (78) afin de caractériser les variations spatiales des paramètres hydrodynamiques sur plusieurs dizaines de mètres. Les mesures, effectuées sur du sable de Fontainebleau à première vue homogène, mettent cependant en évidence des hétérogénéités spatiales des propriétés hydrodynamiques.

Mots clés : Radar de sol, hétérogénéités paramètres hydrodynamiques, infiltration.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE SPATIAL VARIATIONS OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF SOILS WITH GPR

The dimensions of a contamination plume resulting from a pollutant spill depend strongly on the heterogeneity of the hydrodynamic parameters of the soil. In order to quantify these parameters in situ, a hydro-geophysical method consists of inverting radar data acquired during a Porchet water infiltration. This technique is tested on a sandpit near Auffargis (78) in order to characterize the spatial variations of the hydrodynamic parameters over tenths of meters. The measurements carried out over a homogeneous Fontainebleau sand layer, reveal heterogeneities in the hydrodynamical properties.

Key words: Ground Penetrating Radar, hydrodynamical parameter heterogeneity, infiltration.

.1 INTRODUCTION

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet Kri-Terres soutenu par l'ANDRA et porté par ARMINES, l'IRSN et GEOPS. L'objectif de ce projet est de coupler

les méthodes de terrain et les méthodes géostatistiques afin de prévoir l'extension spatiale de panaches de pollution consécutive à des fuites ou des déversements liquides. Ce problème est particulièrement intéressant dans le cadre de démantèlement de centrales nucléaires, souvent implantées sur des alluvions de rivières ou des remblais industriels. Ces milieux présentent de fortes hétérogénéités spatiales de granulométrie.



Fig. 1 – Dispositif expérimental

Une méthode développée récemment utilise des mesures statiques de radar de sol au cours de tests d'infiltrométrie de type Porchet pour estimer les paramètres hydrodynamiques de sols de faible conductivité électrique (SAINTENOY et al., 2008; LÉGER et al., 2016). Le code SWMS-2D (ŠIMUNEK et al., 1994) est utilisé pour calculer les distributions de teneur en eau aux différents pas de temps de l'infiltration d'eau de manière tri-dimensionnelle axi-symétrique, à charge constante dans des forages de faibles profondeurs. Les teneurs en eau sont converties en paramètres électromagnétiques en utilisant des relations pétrophysiques, et leurs distributions sont entrées dans le logiciel GprMax (WARREN et al., 2016) qui simule les radargrammes. L'algorithme SCE-UA (DUAN et al., 1992) est utilisé pour optimiser les paramètres de Mualem–van Genuchten en ajustant les temps d'arrivée des ondes électromagnétiques enregistrées par le radar de sol.

Cette méthode est intéressante pour notre problème car seules 10 minutes de mesures d'infiltration sont nécessaires. La répétition des mesures à différentes localisations d'un site est alors envisageable et permettra d'obtenir de l'information sur les variations spatiales des paramètres hydrodynamiques.

.2 MATERIELS ET METHODES

Nous avons déployé la méthode hydro-géophysique sur une ancienne sablière près d'Auffargis (78). La mesure de type Porchet a été répétée 14 fois, tous les dix mètres le long d'un profil de 70 m et tous les 5 mètres le long d'un profil perpendiculaire de 25 m. Le temps d'acquisition est de 6 minutes. Chaque infiltration a été faite dans un trou de tarière de profondeur 30 ou 40 cm et de

diamètre 4 cm, avec une charge constante de 10 cm. Nous avons utilisé un radar de sol (système Malå) muni d'antennes de fréquence 1.6 GHz, leur centre placé à 20 cm du centre du trou (**Fig. 1**). Deux mesures d'infiltration TRIMS (COQUET et al., 2000) ont été faites pour comparaison. Des échantillons ont été prélevés au fond de chaque trou pour des analyses granulométriques et des mesures de teneur en eau au laboratoire. L'ensemble de ces mesures a nécessité une journée à 4 personnes.

Au cours du temps d'infiltration, un bulbe se développe autour du trou dont la géométrie et l'évolution dépendent fortement des paramètres hydrodynamiques du sol. L'onde électromagnétique se réfléchit sur la surface du bulbe, mais est aussi renvoyée après avoir parcouru toute sa surface, provoquant l'apparition de deux réflexions sur le radargramme (**Fig. 2**). Les temps d'arrivées de ces réflexions sont inversés pour déterminer les propriétés hydrodynamiques en utilisant un code développé sous Python.

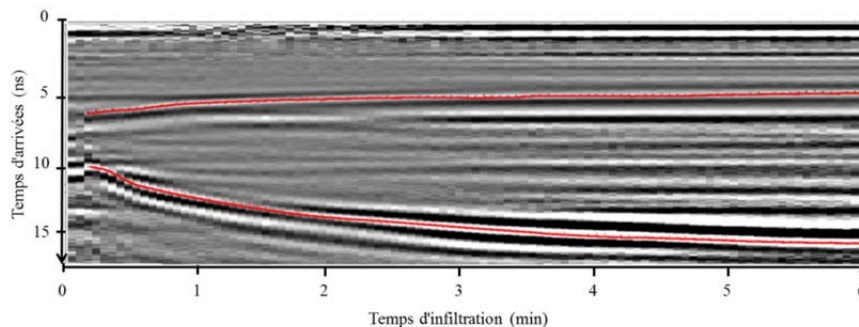


Fig. 2 – Exemple de radargramme obtenu durant une infiltration. L'onde réfléchi est en haut et l'onde renvoyée après avoir parcourue la surface est en bas

.3 RESULTATS

La conductivité hydraulique K calculée à partir du suivi du volume infiltré au cours du temps est présentée **Fig. 3a**. Sur les 7 courbes présentées, deux groupes possédant des valeurs de K différentes sont visibles : 0,5 et 1 cm/min. Ces valeurs sont en accord avec les mesures de TRIMS : 0.4 et 0.8 cm/min. Les variations des temps d'arrivée de l'onde réfléchi faisant le tour du bulbe (**Fig. 2**) sont présentées sur la **Fig. 3b**. Une analyse de sensibilité de l'allure de ces courbes en fonction des paramètres hydrodynamiques a été effectuée et démontre que les différences observées correspondent à des jeux de paramètres distincts. Ainsi, malgré l'apparente homogénéité du terrain étudié (sable de Fontainebleau), les mesures mettent en évidence des variations dans les propriétés hydrodynamiques le long d'un profil de plusieurs dizaines de mètres. Ces données sont en cours d'inversion afin de retrouver les paramètres hydrodynamiques correspondants.

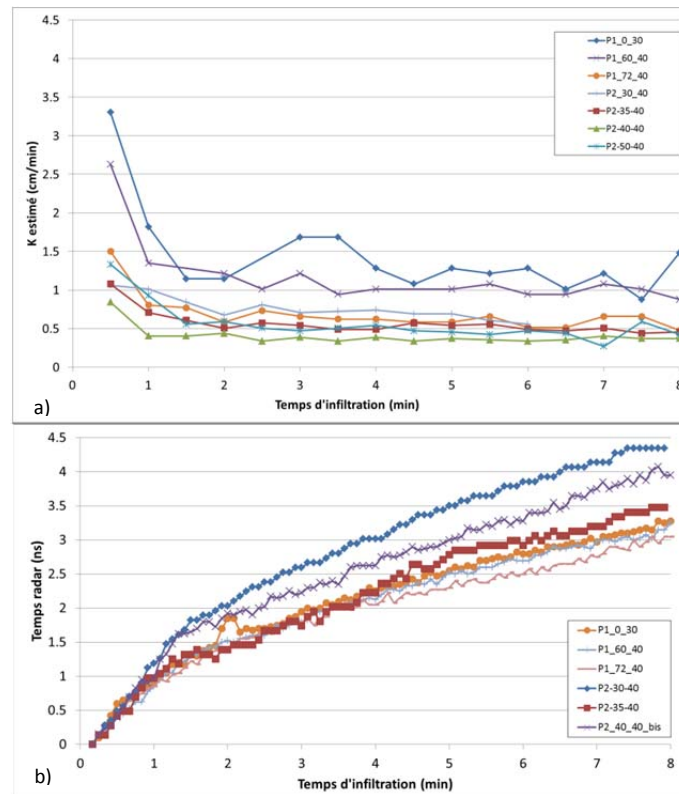


Fig. 3 – a) Conductivité hydraulique K , et b) temps d'arrivée de l'onde réfléchié faisant le tour du bulbe, au cours du temps d'infiltration

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COQUET, Y., BOUCHER, A., LABAT, C., VACHIER, P., ROGER-ESTRADE, J., 2000 – Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. *Etudes et Gestion des Sols*, 2000, vol. 7, p. 7-24.

DUAN Q., SOROOSHIAN S., GUPTA V.K., 1994 – Optimal use of SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *J. of Hydrol.*, 158, 265-284.

LÉGER E., SAINTENOY A., TUCHOLKA P., COQUET, Y., 2016 – Hydrodynamic Parameters of a Sandy Soil Determined by Ground-Penetrating Radar Monitoring of Porchet Infiltrations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no 1, p. 188-200.

SAINTENOY A., SCHNEIDER S., TUCHOLKA P., 2008 – Evaluating ground penetrating radar use for water infiltration monitoring. *Vadose zone journal*, vol. 7, no 1, p. 208-214.

ŠIMUNEK, J., VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M. T., 1994 – The SWMS-2D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-dimensional Variably Saturated Media, Version 1.21. *US Salinity Laboratory, Riverside, CA*, 1994.

WARREN C., GIANNOPOULOS A., GIANNAKIS I., 2016 – gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 2016, vol. 209, p. 163-170.

CARACTERISATION GEOELECTRIQUE DE LA ZONE NON SATUREE D'UN SITE D'OBSERVATION DE LA NAPPE DE BEAUCE A VILLAMBLAIN

JODRY C., ISCH A., ALDANA C., AZAROUAL M., KLINTZING M.

Université d'Orléans · CNRS · BRGM, UMR 7327, 1A rue de la Férellerie, CS 20066 F-45071 Orléans Cedex 2, clara.jodry@cnrs-orleans.fr

RESUME

Le projet O-ZNS a pour but d'étudier les transferts de masse et de chaleur dans la Zone Non Saturée par la mise en place d'un puits d'observation. Une première phase de caractérisation de l'état initial du sous-sol est en cours. On présente ici les résultats d'une campagne électrique avec deux profils TRE. On met en lumière trois ensembles géologiques : une couche peu résistive de sol limono-argileux ; une couche de calcaire marneux de résistivité variable, hétérogène et sensible aux perturbations anthropiques ; et le socle de calcaire fracturé de forte résistivité.

Mots clés : zone critique, zone non saturée en eau, imagerie géophysique, TRE.

ABSTRACT

GEOELECTRICAL IMAGING OF THE VADOSE ZONE OF AN OBSERVATION SITE OF THE BEAUCE AQUIFER AT VILLAMBLAIN

The O-ZNS project aims to study mass and heat transfers in the vadose zone, by setting up an observation well. A first phase of the initial state characterization of the ground is in progress. Here, we present the results of an electrical campaign with two TRE profiles. Three geological layers are highlighted: a low resistive layer of silty clay soil; a marly limestone layer of variable resistivity, heterogeneous and sensitive to anthropogenic disturbances; and the fractured limestone bedrock of high resistivity.

Key words: critical zone, vadose zone, geophysical imaging, TRE.

1. INTRODUCTION

La zone critique, zone d'interface et d'intenses interactions vivant-minéral, définie de la canopée aux strates superficielles du sous-sol, constitue un milieu hautement complexe et dynamique (LIN, 2010). Particulièrement vulnérable à l'activité humaine, la zone de la surface du sol à la nappe d'eau souterraine, dite zone non saturée, est un lieu de transferts de masse et de chaleur dont le fonctionnement complexe est encore mal connu.

La plateforme « Observatoire des transferts dans la Zone Non Saturée » (O-ZNS), financée dans le cadre d'un programme scientifique régional PIVOTS (Plateformes d'Innovation de Valorisation et d'Optimisation Technologique environnementales), a pour objectif de suivre in situ et sur le long terme les processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent au sein de la ZNS du complexe aquifère des calcaires de Beauce.

Ce papier définit l'hétérogénéité initiale du milieu par l'utilisation de méthodes géophysiques comme moyen de caractérisation des matériaux de la ZNS (PARSEKIAN et al., 2015). On présente ici l'outil de Tomographie de Résistivité Électrique (TRE), particulièrement sensible à la présence d'argile et à l'état hydrique du sous-sol.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Description du site

Le complexe aquifère des calcaires de Beauce s'étend sur environ 9000 km² entre les régions Centre – Val de Loire et Ile de France. Intensément fracturé, il constitue un réservoir d'eau libre très vulnérable aux pollutions anthropiques.



Fig. 1 – Situation géographique du site d'étude de Villamblain UTM 31N (© Google Earth). Les profils TRE sont tracés en rouge et les sondages géotechniques en bleu. La zone encadrée en vert délimite le terrain habité.

Pour mieux comprendre les transferts dans la ZNS, il a été entrepris la réalisation d'un puits d'accès exceptionnel, large ($\varnothing \sim 4$ m) et profond (~ 20 m), qui permettra l'instrumentation de l'ensemble de la ZNS, de la surface jusqu'à la nappe, à l'aide de différents capteurs et échantillonneurs. Cette infrastructure sera réalisée en contexte agricole, chez un particulier dans la commune de Villamblain (45310, lieu-dit Les Hôtels) située à environ 30 km au Nord-Ouest d'Orléans (cf. Fig. 1).

Plusieurs sondages géotechniques nous permettent d'établir une coupe lithologique du site. En surface on trouve un sol brun limono-argileux d'environ 1 m d'épaisseur suivi de calcaire marneux pulvérulent altéré jusqu'à environ 2 m de profondeur. De 2 à 8 m de profondeur, on a un calcaire marneux avec une présence irrégulière de lentilles marneuses et de lentilles de grave et/ou sable

calcaire. De 8 à 20 m de profondeur, on retrouve la roche calcaire micritique avec présence de fractures localisées et de niveaux de graves et cailloutis sans cohésion.

2.2. Description de l'acquisition électrique

L'acquisition électrique a été réalisée à l'aide d'un Syscal Pro (IRIS Instruments). Elle comprend quatre profils TRE de 48 électrodes chacun avec un espacement inter-électrodes de 2 m soit une longueur de profil de 94 m (cf. Fig. 1). Les séquences utilisées sont de type Wenner-Schlumberger (WSCH) et dipôle-dipôle (DD) de 997 et 1185 mesures, respectivement (DAHLIN et ZHOU, 2004).

3. CARACTERISATION GEOELECTRIQUE DU MILIEU

Pour obtenir la distribution de la résistivité du sous-sol, on utilise le logiciel RES2Dinv qui nous permet d'appliquer une inversion moindres carrés (LOKE et BARKER, 1996). On ne présente ici que deux profils (A et D, cf. Fig. 1) obtenus avec la séquence DD.

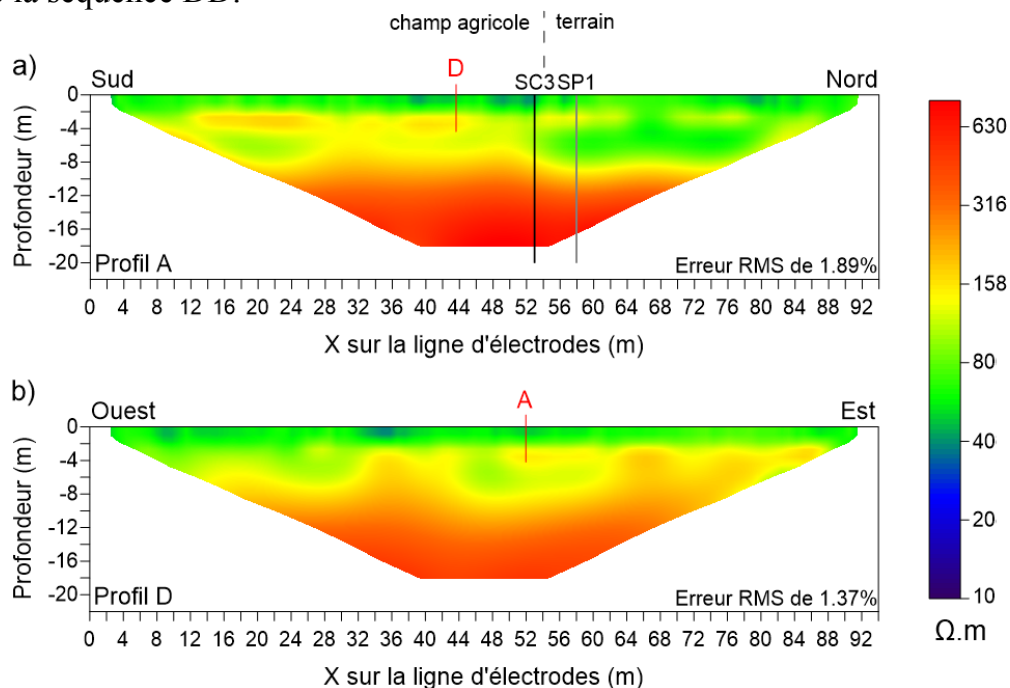


Fig. 2 – Tomographies de Résistivité Électrique, séquence DD pour les profils A et D.

Le profil A (cf. Fig. 2a) passe par le sondage carotté SC3 et le sondage pressiométrique SP1. On distingue une première couche peu résistive, entre 40 et 60 $\Omega.m$, de la surface à 2 m de profondeur. De 2 à 8 m de profondeur, on observe des hétérogénéités spatiales de la distribution de la résistivité. De $X = 0$ m à $X = 53$ m, on obtient des variations de résistivités comprises entre 100 et 160 $\Omega.m$. De $X = 53$ m à $X = 92$ m, on obtient des résistivités entre 60 et 100 $\Omega.m$. En-dessous de 8 m de profondeur, on trouve une augmentation

graduelle et homogène de la résistivité jusqu'à une résistivité de plus de 600 Ω .m à 18 m de profondeur. Le profil D (cf. Fig. 2b), profil témoin qui ne recoupe aucun sondage (cf. Fig. 1), donnent des résultats similaires. La couche de 2 à 8 m de profondeur est cependant moins hétérogène le long du profil avec des résistivités comprises entre 100 et 180 Ω .m.

4. CONCLUSION

Une première étape essentielle de l'étude de la ZNS, avant toute perturbation anthropique du milieu, est la caractérisation des matériaux à l'état initial.

Ici, la caractérisation géoélectrique du milieu définit trois couches majeures. Une première couche homogène, faiblement résistante, correspond au sol limono-argileux. Une seconde couche de résistivité plus hétérogène est attribuée au calcaire marneux, plus ou moins induré selon la position le long des profils. On note une diminution de la résistivité lors du passage du champ agricole au terrain habité (cf. Fig. 2a). La lithologie montre que les couches de surface (jusqu'à ± 1 m) ont été remaniées lors de la mise en place des bâtiments agricoles (terrassment) affectant la couche de calcaire marneux induré de 1 à 2 m de profondeur. Sans cette couche résistante, l'inversion donne une couche conductrice unique et homogène de la surface à 8 m de profondeur. On retrouve cette particularité sur les profils B et C, non montrés ici mais qui traverse également le terrain habité. Enfin, une troisième couche, plus résistante, correspond au socle calcaire micritique.

Cette première étude géoélectrique nous permet de visualiser une hétérogénéité spatiale entre 2 et 8 m de profondeur qui a forcément un impact sur les transferts d'eau et de chaleur dans la ZNS. On met également en lumière la vulnérabilité de cette couche aux perturbations anthropiques et qui devra être prise en compte lors de la construction du puits d'observation.

Une inversion 3D de l'ensemble des profils est prévue afin de confirmer ces observations. De plus, une interprétation plus poussée va être mise en place, en se basant notamment sur des mesures de diagraphies et de TRE entre forages.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DAHLIN T., ZHOU B., 2004** – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52(5), 379–398.
- LIN H. S., 2010** – Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 25–45.
- LOKE M. H., BARKER R. D., 1996** – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152.
- PARSEKIAN, A. D., SINGHA, K., MINSLEY, B. J., HOLBROOK, W. S., SLATER, L. D., 2015** – Multiscale geophysical imaging of the critical zone. *Reviews of Geophysics*, 53, 1–26.

UTILISATION DE LA METHODE CSAMT EN HYDROGEOPHYSIQUE

LAJAUNIE M.¹, SAILHAC P.², MALET J-P.¹, MATTHEY P-D.¹

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS UMR7516), Université de Strasbourg, France (mlajaunie@unistra.fr)

² Géosciences Paris Sud (GEOPS UMR8148), Université de Paris-Saclay, Orsay, France (pascal.sailhac@u-psud.fr)

RÉSUMÉ

La méthode de magnétotellurie aux fréquences audio à source contrôlée (CSAMT) offre l'avantage intéressant, parmi les méthodes géophysiques, d'une profondeur d'investigation potentiellement élevée (quelques centaines de mètres). En hydrogéophysique, cette méthode est envisagée en complément d'autres méthodes électriques et électromagnétiques pour contraindre les modèles de résistivité du sol en profondeur. Des mesures de CSAMT ont été réalisées au bassin versant du Strengbach, les traitements ainsi qu'une analyse des résistivités apparentes est présentée.

Mots clés : *Méthodes électromagnétiques, Audio Magnetotellurique à Source Contrôlée (CSAMT), Traitement, Modélisation, Bassins versants*

ABSTRACT

APPLICATION OF THE CSAMT METHOD IN HYDROGEOPHYSICS

The controlled source audio-frequency magnetotelluric method (CSAMT) allows for deep investigations, compared to most active geophysical methods (hundreds of meters). In hydrogeophysics, this method can be used to complement other electrical and electromagnetic methods, in order to constrain the resistivity models at depth. CSAMT measurements have been realized at the Strengbach catchment (Vosges), data processing and analysis are presented.

Key words: *Electromagnetic methods, Controlled source Audio Magnetotellurics (CSAMT), Processing, Modeling, Catchment aquifers*

INTRODUCTION

Dans les systèmes montagneux, la structure générale de la subsurface est complexe, car elle provient d'une dynamique longue de mise en place des matériaux (tectonique, héritage glaciaire) et de processus biologiques (végétation, altération). Les écoulements au sein de ces structures doivent être caractérisés à plusieurs échelles spatiales et pour des profondeurs parfois importantes (pouvant aller jusqu'à quelques centaines de mètres). Dans de nombreux cas, ces écoulements s'effectuent le long de chemins préférentiels formés par un réseau de discontinuités (failles, fissures).

Plusieurs méthodes géophysiques permettent une sensibilité à la présence d'eau et aux structures contrôlant l'hydrogéologie dans la subsurface. Parmi celles-ci, la méthode CSAMT est une méthode électromagnétique en domaine fréquentiel qui permet une investigation à plus grande profondeur que des méthodes plus courantes telles que l'ERT (plusieurs centaines de mètres).

Ce travail présente une application à l'étude hydrogéologique du bassin versant granitique du Strengbach (Vosges). Une méthodologie de mesure et de traitement des données est proposée, ainsi qu'une analyse des premiers résultats obtenus.

METHODOLOGIE

Principe de la méthode CSAMT

Les méthodes magnétotelluriques (MT) sont basées sur la réponse de la subsurface aux variations du champ électromagnétique, réponse liée aux propriétés électriques du sous-sol. On utilise le tenseur d'impédance MT du milieu, qui est défini par le rapport entre l'amplitude des champs électrique et magnétique mesurés en un même point (**Eq. 1**), qui dépend de la fréquence du signal, qui définit le volume du milieu auquel la mesure est sensible (effet de peau), et de la résistivité apparente (Cagniard (1953), **Eq. 2**).

$$Z = \frac{E_r}{H_\phi} = \frac{E_\phi}{H_r} \quad (1)$$

$$\rho_{app} = \frac{1}{5f} |Z|^2 \quad (2)$$

avec f la fréquence en Hz, E en mV/km et H en nT

De manière classique, en AMT, les signaux électromagnétiques d'origine naturelle (orages lointains, courants ionosphériques) sont utilisés comme signaux source pour réaliser ce type de mesures. La théorie implique cependant que ces signaux soient assimilables à des ondes planes, i.e. que le signal atteignant la station de mesure soit en champ lointain.

Les fréquences permettant d'être sensible aux variations de proche surface de la résistivité électrique (premières centaines de mètres) sont les fréquences audios (100 Hz à 10 kHz). Sur cette bande de fréquences, les sources naturelles ne produisent pas un signal MT suffisamment fréquent et énergétique pour permettre une imagerie électromagnétique du sous-sol. L'utilisation d'une source artificielle est nécessaire pour pouvoir réaliser des mesures de résistivité. De même qu'en MT, il est alors possible de calculer la résistivité apparente à partir des formules de Cagniard, si tant est que l'hypothèse de champ lointain est satisfaite. Pour ce faire, l'émetteur de signal électromagnétique doit être situé assez loin du site d'étude (minimum 3 km). En pratique, satisfaire cette condition est difficile, et les mesures sont très souvent réalisées à des distances empêchant l'approximation du champ lointain ; dans ce cas il est néanmoins possible de considérer une autre approximation, celle du champ proche avec une source locale, une résistivité apparente peut toujours être calculée (**Eq. 3**, Zonge et

Hughes, 1991), mais des traitements spécifiques sont nécessaires pour remédier à la complexité induite par le schéma de radiation des ondes.

$$\rho_{app} = r\pi 10^{-4} \frac{E_r}{H_\phi} = 2r\pi 10^{-4} \frac{E_\phi}{H_r} \quad (3)$$

avec r la distance émetteur - récepteur en m.

Mesures en CSAMT

Le signal est produit par l'injection d'un courant alternatif aux bornes d'un long dipôle (> 200 m) connecté au sol par des électrodes. Les données consistent en la mesure des séries temporelles du champ électrique horizontal et des 3 composantes du champ magnétique, conjointement à l'émission du signal. La synchronisation des acquisitions avec l'émission est réalisée à l'aide du GPS.

Traitements des signaux mesurés

Le traitement appliqué aux données vise à calculer les résistivités apparentes pour chaque fréquence, et à évaluer une incertitude sur les calculs. Ce traitement consiste en cinq étapes, décrites **Fig.1**.

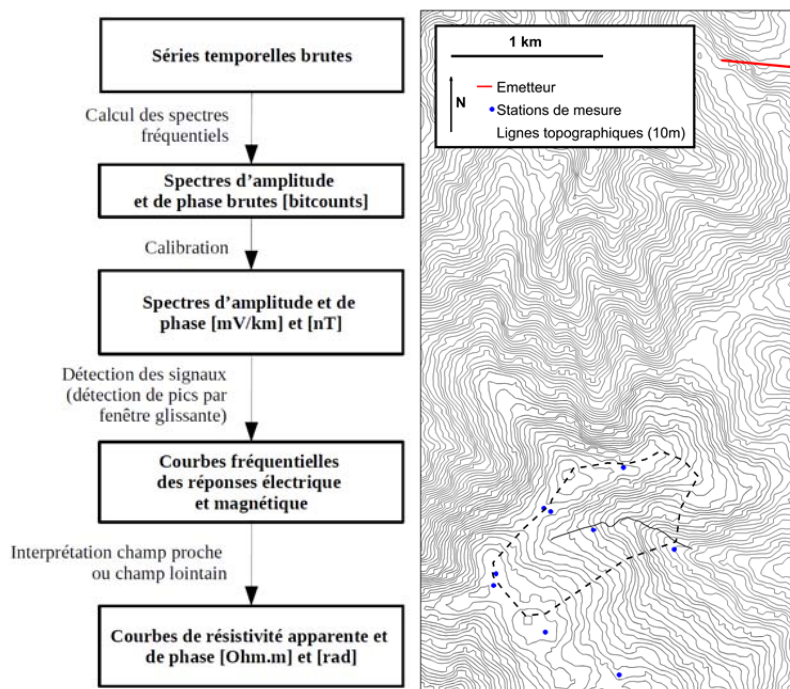


Fig. 1 – Organigramme des traitements appliqués aux données de CSAMT

Fig. 2 – Carte de la campagne de mesures CSAMT au bassin versant du Strengbach

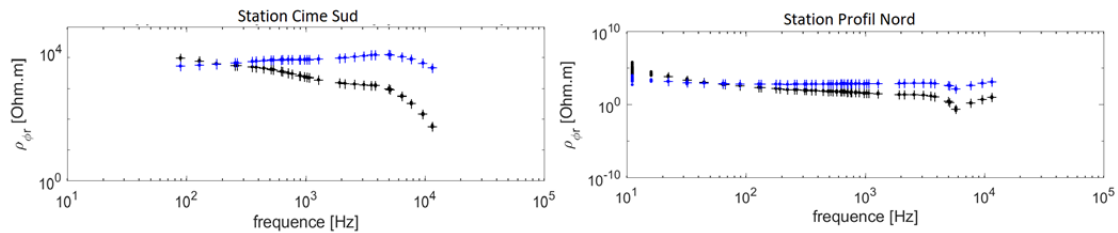


Fig. 3 deux courbes de résistivité apparente au sud et au nord du bassin versant. En bleu, la résistivité calculée en champ proche, en noir, celle en champ lointain.

APPLICATIONS

Le bassin versant du Strengbach est un bassin versant granitique localisé dans les Vosges. Ce site a fait l'objet d'études géophysiques. Des données d'ERT et EM, d'AMT et de CSAMT ont été collectées. La méthode CSAMT a été envisagée sur ce site en complément des autres méthodes électriques et électromagnétiques, qui ont une résolution plus fine mais sont sensibles exclusivement aux premières dizaines de mètres du milieu.

La **Fig. 2** présente les dispositifs de mesures mis en œuvre en CSAMT. L'émetteur a été localisé à 3 km au Nord du site d'étude, et un jeu de données a été acquis sur 7 stations à des fréquences allant de 100 à 9600 Hz. Les valeurs de résistivité sur les premiers 30 m s'étendent de 100 à 10⁴ Ohm.m.

Des courbes de résistivité apparentes ont été calculées en champ proche et en champ lointain, mais la complexité du milieu ne permet pas de déterminer la limite d'interprétabilité en champ proche, qui semble toutefois se situer entre 100 et 500 Hz (cf. **Fig. 3**).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La complexité du milieu (due au 1^{er} ordre à la topographie) ne permet pas une interprétation directe des courbes de résistivité apparente. Des travaux d'interprétation sont en cours pour déterminer les structures d'aquifères plus profonds, en bénéficiant de l'apport de méthodes complémentaires (gravimétrie, mesures en puits) mises en œuvre dans le cadre de l'ANR HydroCriZStO. L'évaluation de la sensibilité des mesures et l'effet de la topographie et de la proximité de l'émetteur seront étudiés à l'aide de deux outils de modélisation numérique : CustEM (calcul des champs EM générés par un dipôle de courant dans un milieu 3D), et ModEM (calcul de la réponse MT d'un milieu 3D).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CAGNIARD L., 1953** – Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics. Vol. 18(3), pp. 605-635. Society of Exploration Geophysicists.*
- ZONGE KL. AND HUGHES LJ., 1991** – Controlled source audio-frequency magnetotellurics. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B., pp. 713-810. Society of Exploration Geophysicists.*

ETUDE COMPARATIVE D'UNE CARTOGRAPHIE MAGNETIQUE AU SOL ET EN DRONE : APPORT POUR LA CARACTERISATION LOCALE DE LA CARTE GEOLOGIQUE

LE MAIRE P.^{1,2}, MUNSCHY M.², BERTRAND L.³, BRAHIMI S.², CALOU P.^{2,4}, GAVAZZI B.², MERCIER DE LEPINAY J.²

¹ Cardem, 7 rue de l'uranium, 67800 Bischheim, Pauline.Lemaire@unistra.fr

² Université de Strasbourg/EOST, CNRS, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Strasbourg

³ Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources lab., 2 rue du Doyen Marcel Roubault, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54518, France

⁴ ECA-EN, Groupe ECA, Coueron, France.

RÉSUMÉ

Dans les différents projets de cartographie magnétique au sol, on est souvent confronté à l'impossibilité de réaliser des mesures pour des raisons pratiques : présence de végétation, ruisseaux ou étendues d'eau, terrain accidenté, habitations, clôtures, ... C'est pourquoi, depuis une dizaine d'années l'IPGS s'intéresse et pratique des tests en mesure magnétique en drone afin de dépasser les limites techniques actuelles. Dans cette présentation, une description du matériel et de la méthode est faite. Les procédures de traitement des données et les cartes magnétiques sont présentées sur un cas d'étude situé autour d'un hameau de la commune de Grendelbruch où l'utilisation du drone a permis de cartographier l'ensemble de la zone comprenant de la forêt et des habitations. Afin de valider les mesures magnétiques en drone, nous avons comparé ces données avec celles acquises au sol. Cette comparaison met en valeur l'intérêt de cette technologie pour la cartographie géologique.

Mots clés : méthode potentielle magnétique, drone, multi-échelle

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY BETWEEN GROUND AND UAV MAGNETIC SURVEY: CONTRIBUTION TO THE LOCAL CHARACTERIZATION OF THE GEOLOGICAL MAP

In various ground magnetic mapping projects, it is often impossible to perform measurements for practical reasons: presence of vegetation, streams or bodies of water, steep slopes, houses, fences, etc. For this reason, since ten years the IPGS is carrying out magnetic measurement tests using UAVs in order to overtake current technical limits. In this presentation, we describe the material and method applied during those tests. The case study showing the data processing and the resulting magnetic maps is close to a hamlet in the township of Grendelbruch where open fields, forest and houses were overflown. In addition to validate our UAV measurements we perform, a comparison with data acquired on the ground, which showcase the high value of this technology for geological mapping.

Key words: magnetic potential field, UAV, Multi-scale

.1 INTRODUCTION

Parmi les différentes méthodes géophysiques, la méthode magnétique est la seule, avec la méthode gravimétrique qui n'a pas de facteur d'échelle. En effet, que l'objectif soit la compréhension d'objets métriques tels que la détection de munitions ou d'objets kilométriques pour la caractérisation géologique d'un dyke, les développements théoriques, les traitements et les interprétations des données sont les mêmes. Seuls les supports et les

paramètres d'acquisition changent. Pour la cartographie magnétique au sol, le plus souvent les systèmes sont portés ou tracté par une personne. La hauteur des capteurs varie de 2 m à 10 cm, avec une gamme d'espacement entre les capteurs du même ordre de grandeur. Pour cartographier les structures plus grandes, le ou les capteurs sont placés sur un avion, ULM ou hélicoptère. Dans le cas de prospections pour l'exploration minière, les pilotes d'avion peuvent descendre jusqu'à 50 m du sol pour faire des acquisitions. Le problème qui se pose est l'impossibilité de faire des mesures à des hauteurs intermédiaires entre le sol et l'aérien, l'inaccessibilité de certaines zones pour les mesures au sol et la lenteur des mesures au sol. Depuis une dizaine d'année, la technologie des drones s'est fortement développée et démocratisée permettant une meilleure fiabilité de ces engins, une facilité accrue dans le pilotage et une diminution du prix d'achat. Ce nouveau porteur a le potentiel de permettre de répondre à des projets de cartographie géophysique en zones inaccessibles où de levé trop bas pour un avion. L'objet de cette présentation est de présenter une étude comparative entre des mesures magnétiques acquises au sol et en drone sur un site localisé en Alsace en zone semi-montagneuse.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Matériels

Dans le cas de l'étude, les capteurs magnétiques utilisés sont des capteurs magnétiques vectoriels de type fluxgate . Ils sont légers et mesurent de façon relative le vecteur champ magnétique en un point. Pour l'acquisition des données, l'IPGS a développé ses propres électroniques pouvant être très légères et permettant l'enregistrement des mesures magnétiques de 1 à 8 capteurs à des fréquences allant de 1 à 300 Hz. La géolocalisation à l'aide de mesures GNSS ou D-GNSS fait également partie de ce système d'acquisition (Gavazzi et al. 2016). Pour les acquisitions au sol, le système est placé sur un support de type sac-à-dos. Quatre à huit capteurs sont fixés à un intervalle de 50 cm dans une perche à l'avant du sac (Figure 1). Pour l'acquisition en drone, l'électronique mono-capteur est placée sur un drone M210 RTK de marque DJI. Le capteur magnétique fluxgate est placé 42 cm à l'avant du drone par rapport à son centre. Lors des acquisitions, une base GNSS est installée sur le terrain, afin de fournir des corrections temps réel aux deux antennes GNSS du drone.

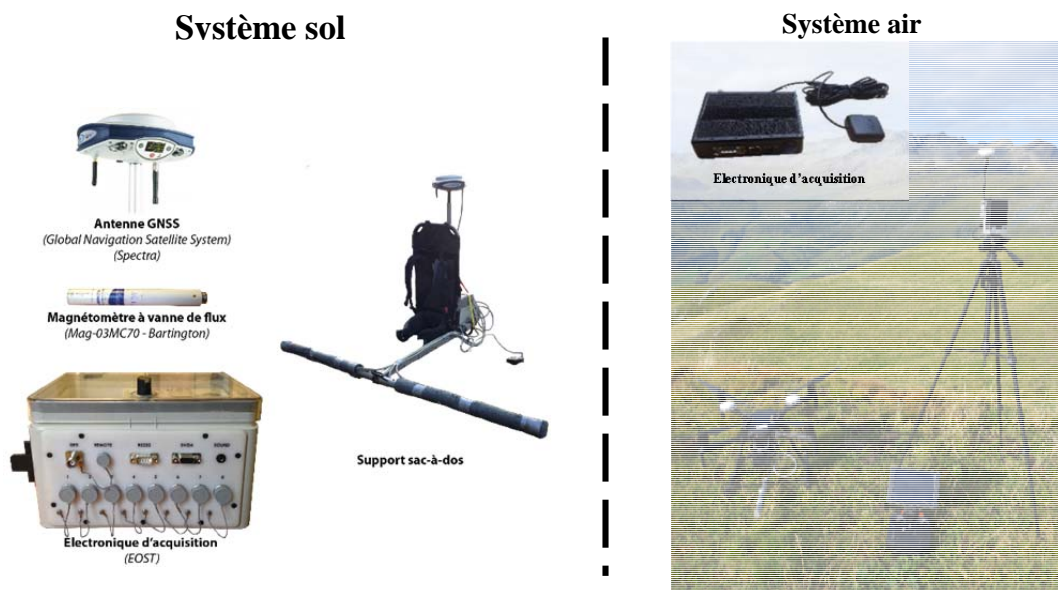


Fig. 1 - Systèmes de mesure et support pour l'acquisition au sol et en l'air.

2.2. Acquisitions

Sol

Les opérateurs couvrent les profils prévus avec un espacement de 2 m, la perche étant équipée de quatre capteurs et la cadence des mesures est de 25 Hz. La surface couverte avec un espacement des profils magnétiques de 50 cm est de 2 ha en sept heures d'acquisition.

Drone

La cadence des mesures est aussi de 25 Hz. Pour le vol à 2 m de hauteur, il s'agit d'un vol manuel drapant la topographie du terrain. Pour le vol à 5 m, il s'agit d'un vol automatique planifié à partir d'un programme informatique (PLUMM) développé sous Matlab. Le vol est à altitude constante par rapport au point de décollage et les profils sont espacés de 5m.

2.3. Traitement des données

Les mesures étant faites avec des capteurs relatifs de type fluxgate, il faut effectuer une correction des mesures, c'est-à-dire étalonner les capteurs. Pour ce faire, en début et fin d'acquisition, l'opérateur fait varier au maximum l'attitude du capteur dans une zone où l'intensité du champ magnétique est constante. Cette procédure permet également de compenser l'effet « magnétique » du support tel que les connectiques, les moteurs, les batteries... Sur la figure 2, on présente les résultats du calcul des neuf paramètres permettant l'étalonnage et la compensation de l'ensemble des données (Munschy et al., 2007).

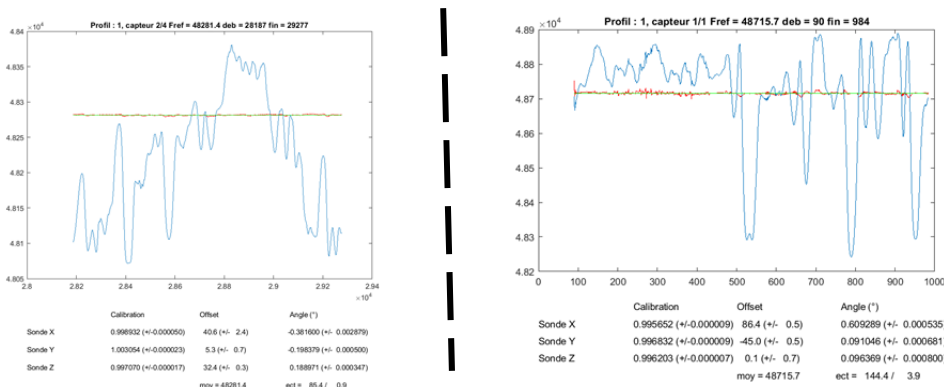


Fig. 2 - Résultat de l'étalonnage au sol (à gauche) et en l'air (à droite). La courbe bleue donne l'intensité du champ magnétique avant étalonnage et celle en rouge après inversion des données. L'écart-type avant étalonnage est de 85,4 nT et après étalonnage de 0,9 nT pour les mesures au sol. Il est de 144,4 nT avant étalonnage et de 3,9 nT après étalonnage pour les mesures en drone.

Les cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique sont calculées en utilisant les données étalonnées et en respectant les procédures de traitement habituellement utilisées en magnétisme.

3 PREMIERS RESULTATS ET CONCLUSIONS

La figure 3 présente les cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique pour les acquisitions au sol et en l'air (1, 2 et 5 m). Les trois cartes inférieures sont en représentation en couleur équi-réparties, cette représentation permettant de mieux observer les anomalies de plus faibles intensités comparées à celles de forte amplitude. Sur la carte au sol, de nombreuses anomalies magnétiques sont visibles. L'amplitude du signal est d'environ 300 nT. Les anomalies magnétiques de petites longueurs d'onde formant une croix dont le centre est placé aux coordonnées (5,10). Elles ont vraisemblablement pour origine un système de drainage. Par contre les anomalies magnétiques de plus grande longueur d'onde sont

certainement liées à la géologie du site. Sur les levés en drone à 2 et 5 m, on n'observe pas de problème particulier comme, par exemple, le levelling assez fréquent en cartographie magnétique, ce qui indique une bonne compensation de l'effet magnétique du drone. Sur la carte à 2 m d'altitude, on voit encore les anomalies de courte longueur d'onde essentiellement due aux systèmes de drainages, alors que pour le levé à 5 m, elles disparaissent et les anomalies sont de plus grandes longueurs d'onde et correspondent à la géologie. Ceci est tout à fait cohérent avec la théorie qui nous indique une décroissance en $1/r^3$ pour des aimantations sphériques. L'étude de la carte géologique indique des directions de structure différentes (nord-sud), à la direction qui se dessine sur les cartes magnétiques (est-ouest) et l'utilisation des données magnétiques pour réviser la carte géologique est en cours avec des collègues de l'Université de Lorraine (laboratoire GeoRessources, UMR 7359). Enfin, les acquisitions au sol et en drone se poursuivent afin d'avoir une vision complète des avantages et inconvénients de la mesure magnétique en drone et de mieux évaluer son potentiel. L'ensemble des données et leur interprétation qui auront été acquises seront présentées au colloque.

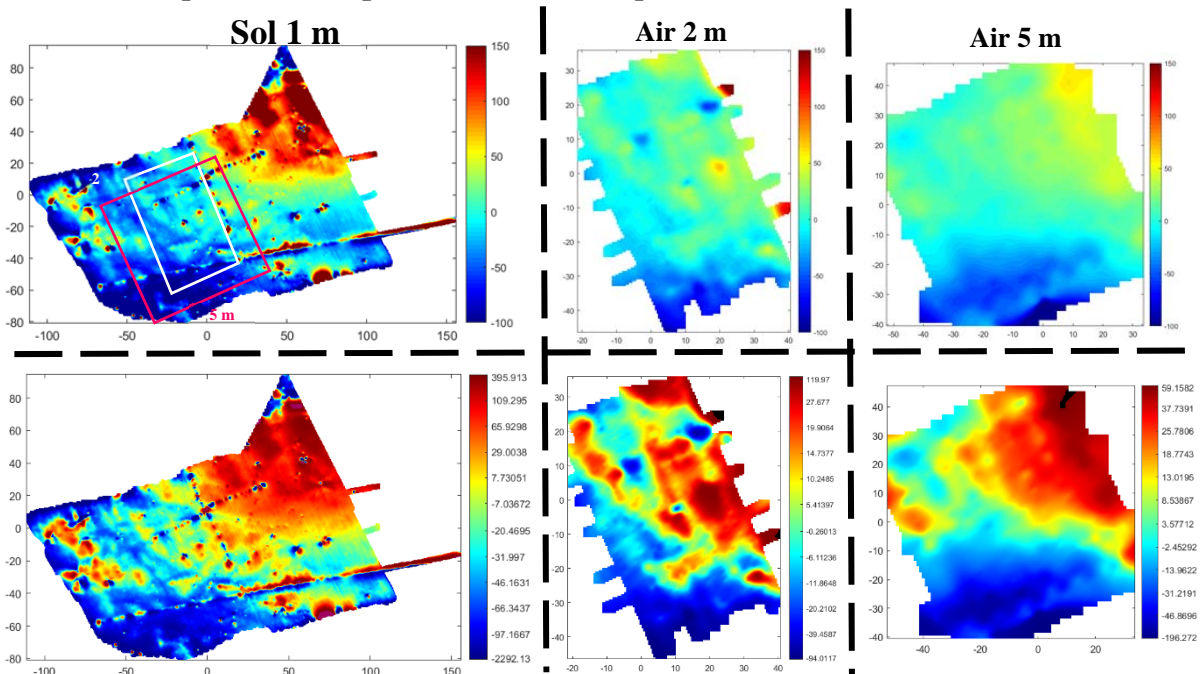


Fig. 3 - Cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique (en nT) pour les acquisitions sol (1 m) et air (2 et 5 m). Les trois cartes supérieures sont en représentation de couleur linéaire et les trois cartes inférieures en couleurs équi-réparties.

.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GAVAZZI B., LE MAIRE P., MUNSCHY M., DECHAMP A., 2016 – Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys. *The Lead. Edge*, 35(9), 765-797. doi: 10.1190/tle35090795.1.

MUNSCHY M., BOULANGER D., ULRICH P., BOUIFLANE M., 2007 – Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation. *J. of Appl. Geophys.*, 61, 168-183. doi: 10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.

SUIVI GEOPHYSIQUE TEMPOREL EN LABORATOIRE DE L'ÉROSION INTERNE DANS DES DIGUES EN TERRE

MAALOUF Y.¹, KHOURY N.¹, BIEVRE G.², VOISIN C.²

¹ Notre-Dame University, Department of Civil and environmental engineering, Zouk Mosbeh, Lebanon, ymaalouf@ndu.edu.lb, nkhoury@ndu.edu.lb

² Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, and ISTerre, 38000 Grenoble, France, gregory.bievre@univ-grenoble-alpes.fr, christophe.voisin@univ-grenoble-alpes.fr

RÉSUMÉ

Des expériences contrôlées de laboratoire ont été conduites sur des modèles réduits de digues en terre et de zones d'érosion. L'objectif est de suivre le développement de l'érosion interne à l'aide de paramètres géophysiques sensibles : la résistivité électrique et le bruit de fond ambiant. Les premiers résultats confirment l'intérêt d'utiliser la résistivité électrique pour caractériser de telles structures. Ils montrent également la très grande sensibilité du bruit de fond ambiant au développement de l'érosion interne.

Mots clés : digues en terre, érosion interne, géophysique.

ABSTRACT

GEOPHYSICAL MONITORING OF INTERNAL EROSION WITHIN EARTH DAMS IN LABORATORY EXPERIMENTS

Controlled laboratory experiments are performed to monitor the development of internal erosion within earth dykes and weak zones. Two main geophysical parameters are used: electrical resistivity and ambient vibrations. First results confirm the applicability of electrical resistivity to characterizing such structures. They also show the very high sensitivity of ambient noise to the development of internal erosion.

Key words: earth dams, internal erosion, geophysics.

.1 INTRODUCTION

L'érosion interne est un des modes de rupture importants des ouvrages tels que les digues en terre. Le suivi depuis le développement de l'érosion jusqu'à la rupture demeure difficile à mettre en œuvre. Les méthodes géophysiques sont largement utilisées depuis plusieurs années pour caractériser ces ouvrages mais le suivi expérimental des zones de faiblesses demeure complexe. Ce travail présente les premiers résultats d'une expérience contrôlée en laboratoire pour expérimenter cette dégradation à l'aide deux paramètres géophysiques sensibles. Le premier paramètre est la résistivité électrique, qui est très largement utilisé pour caractériser ces ouvrages. Le deuxième paramètre est le bruit de fond ambiant, qui est de plus en plus utilisé en géotechnique et qui semble présenter de très nombreux avantages comme, par exemple, l'enregistrement en continu.

L'objectif de ce travail est de présenter les premiers résultats obtenus durant des expériences contrôlées en laboratoire.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Digue expérimentale

Le sol utilisé pour construire le modèle est argileux et provient d'une digue située au Liban. Les essais d'identification géotechnique conduits sur ces argiles ont fourni des limites plastique et liquide de 22 % et 47 %, respectivement, ainsi qu'un optimum Proctor de 21.5 % et un poids volumique sec de 18.6 kN/m³. La structure a été mise en œuvre en compactant progressivement plusieurs couches élémentaires. Finalement, le modèle réduit présente une longueur de 1.48 m, une largeur de 0.3 m à la base et une hauteur de 0.5 m avec une pente de 1:1 (FIG 1). Sur cette digue, une expérience a été conduite pour simuler une érosion lente. Pour cela, une zone de faiblesse de 0.1 m de diamètre a été créée à 0.12 m en dessous la crête de la digue. Cette zone plus perméable que le corps de digue (composée d'un mélange de 65 % de sables et de 35 % d'argiles) est cylindrique et traverse intégralement la digue. Une deuxième expérience a été conduite pour ausculter uniquement la dégradation progressive de la zone de faiblesse. Pour cela, le même mélange de sol a été introduit dans une zone de faiblesse de géométrie identique, mais située au sein d'un encaissant en béton (longueur d'environ 0.2 m) et traversé par un écoulement avec une charge hydraulique contrôlée. Seuls les résultats de cette dernière expérience seront détaillés par la suite



Fig. 1 - Modèle analogique et instrumentation mis en place au laboratoire. La longueur de la digue en argile est d'environ 1.5 m.

Le suivi temporel de résistivité a été conduit à l'aide de 28 électrodes alignées le long de la crête (de la digue et de l'encaissant en béton) et régulièrement espacées de 0.05 m. La mesure du couplage des électrodes avec le sol a montré des résistances de contact inférieures à 1000 Ω . Pour le suivi sismique, 3 lignes de géophones verticaux ont été installées sur la digue. Deux lignes ont été installées de chaque côté de la crête et une ligne le long de la pente. Chaque ligne consiste en 5 géophones de fréquence propre 4.5 Hz et régulièrement espacés de 0.3 m. Les enregistrements continus ont été effectués avec une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz.

2.2. Monitoring géophysique

2.2.1. Résistivité électrique

Un protocole dipôle-dipôle avec 238 mesures a été utilisé. Les facteurs géométriques ont été calculés à l'aide du code F3DM (Clément et Moreau 2016) et selon la méthodologie proposée par Bièvre et al. (2018). Les résistances électriques mesurées et les facteurs géométriques calculés ont permis de calculer les résistivités apparentes expérimentales qui tiennent compte des effets géométriques (FIG 2). Ces données ont été inversées à l'aide du code BERT développé par Günther et al. (2006). Les résultats de cette expérience (FIG 2) permettent notamment d'identifier la zone de faiblesse au centre de l'image et à une profondeur d'environ 0.1 m. Le suivi temporel de la résistivité jusqu'à la rupture a été traité à l'aide d'une approche time-lapse. Les résultats (non présentés ici) mettent en évidence des variations de résistivité qui sont en accord avec les différentes étapes d'évolution de la structure jusqu'à la rupture (diminution de résistivité lors de la saturation, puis diminution de résistivité lors de la phase d'érosion). Toutefois, la vitesse d'acquisition des mesures de résistivité (résistivimètre mono-canal dans le cas présent) ne permet pas de suivre de façon suffisamment détaillée l'évolution de la dégradation dans le cas d'expériences de laboratoire qui durent quelques dizaines de minutes. Ces mesures ont donc été complétées par des mesures de vibrations ambiantes continues.

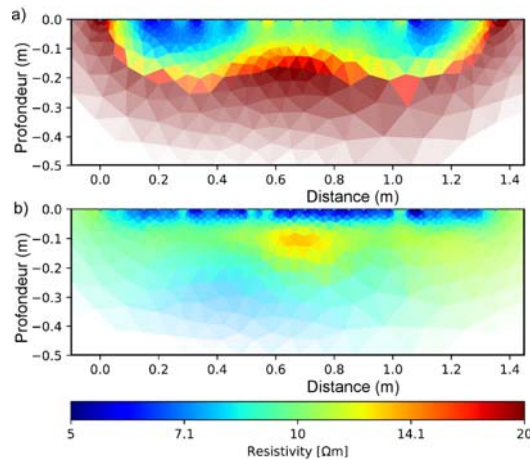


Fig. 2 - Tomographie de résistivité électrique conduite avant la mise en eau du modèle. a) Données expérimentales inversées avec les paramètres par défaut. b) Mêmes données expérimentales mais corrigées des effets géométriques 3D. La zone de faiblesse artificiellement induite se distingue maintenant au centre de l'image par des résistivités légèrement supérieures (argiles + sables) par rapport à l'encaissant (argiles).

2.2.2. Bruit de fond sismique

Les données ont été traitées selon plusieurs techniques (analyse des signaux temporels, analyse spectrale, inter-corrélations, etc.). Seuls les résultats issus de l'analyse temporelle sont présentés dans ce résumé. Les impulsions sismiques générées par l'écoulement et la dégradation progressive de la zone de faiblesse

ont été détectés à l'aide de seuils variables d'énergie sismique enregistrée. Les résultats sont présentés sur la figure 3. Succinctement, les courbes présentent l'évolution temporelle cumulée du nombre d'événements sismiques (impulsionnels) pour différents seuils énergétiques. Pour les faibles seuils, l'activité semble régulière et pourrait être associée au bruit de fond. Pour les seuils plus élevés, cette activité n'est pas périodique. Au contraire, il semble exister une accélération du nombre d'événements sismiques à mesure que la structure est érodée pour finalement atteindre la rupture.

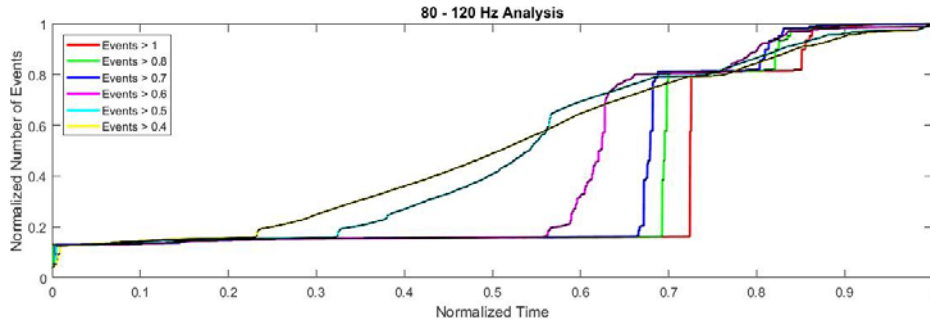


Fig. 3 - Événements sismiques impulsionnels cumulés durant l'expérience d'érosion au travers de l'encaissant en béton et pour différents seuils d'énergie.

.3 CONCLUSIONS

Dans le but de caractériser l'évolution de la dégradation de digues en terre par érosion interne, des expériences contrôlées en laboratoire ont été conduites pour suivre l'évolution de deux paramètres géophysiques sensibles: la résistivité électrique et les vibrations sismiques. Les premiers résultats montrent une bonne adéquation des paramètres géophysiques pour caractériser le développement de l'érosion interne. De plus, les observations effectués dans ces premières expériences montrent la grande sensibilité du bruit de fond sismique pour caractériser l'évolution de la dégradation de la rupture. Des expériences sur sites réels sont en cours de développement pour valider l'emploi de ces techniques, notamment le bruit de fond sismique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIÈVRE G., OXARANGO L., GÜNTHER T., MASSARDI M., 2018 – Improvement of 2D ERT measurements conducted along a small earth-filled dyke using 3D topographic data and 3D computation of geometric factors. *J. Appl. Geophys.*, 153, 100-112.

CLÉMENT 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.

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.

**APPORT DU TRACAGE ARTIFICIEL ET DES METHODES
GEOPHYSIQUES A LA COMPREHENSION DES FLUX AU SEIN DE LA
ZONE NON SATUREE DU KARST (SITE DE ST FERRON, FRANCE)**

**MARTIN A.¹, CHAMPOLLION C.², DOERFLINGER E.², COTTEUX E.³,
KAUFMANN O.¹**

¹ Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, Faculté Polytechnique de Mons, Rue de Houdain 9, B-7000 Mons, Belgique, aurelie.martin@umons.ac.be

² Géosciences Montpellier, CNRS, Univ. Montpellier, UA, Montpellier, France

³ Irstea – Centre de Montpellier, Rue Jean-François Breton 361, BP-5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France

RÉSUMÉ

Les méthodes géophysiques permettent d'imager la structure de l'épikarst, mais l'étude des transferts dans la zone non saturée reste une tâche difficile. Les traçages sont dès lors utilisés pour remédier à ce problème et relier les écoulements aux structures géologiques. Ces études sont d'autant plus importantes que l'épikarst est une zone vulnérable, présentant d'importants stocks d'eau. Afin de valider les hypothèses émises sur la base des méthodes géophysiques, un multi-traçage a été réalisé sur le site de St Ferron (Larzac, France). L'étude montre l'importance d'utiliser des traçages en complément des méthodes géophysiques pour valider les hypothèses sur les écoulements et ainsi mieux connaître l'épikarst et son fonctionnement.

Mots clés : Larzac, épikarst, traçage artificiel, hydrogéologie

ABSTRACT

**CONTRIBUTION OF ARTIFICIAL TRACING AND GEOPHYSICAL
METHODS TO UNDERSTANDING FLOWS IN THE NON-SATURATED
AREA OF KARST (ST FERRON SITE, FRANCE)**

Geophysical methods allow imaging the structure of the epikarst. However, studying groundwater transfer in a non-saturated zone is still a challenging task. Tracing is then used to remedy this problem and to relate water flow with geological structures. These studies are all the more important than the epikarst is a vulnerable area with important water reserve. In order to validate the hypotheses issued on the basis of the geophysical methods, a multi tracer experiment was realized on the St Ferron site (Larzac, France). The study showed the importance of using tracing in addition to geophysical methods to validate the hypotheses on the flows and thus better know the epikarst and its functioning.

Key words: Larzac, epikarst, artificial tracing, hydrogeology

.1 INTRODUCTION

Les méthodes géophysiques permettent d’imager les structures de l’épikarst mais l’étude des écoulements y est une tâche difficile. Des essais de traçages sont dès lors utilisés (Arbel *et al*, 2010 ; Kogovsek et Petrec, 2014). La mise en place de ces traçages nécessite une connaissance préalable du site afin de déterminer la position des points d’injection et d’échantillonnage, limiter les problèmes d’adsorption, de bruit de fond ou de contamination. Ces traçages permettent, entre autres, de vérifier les hypothèses d’écoulement émises après des études géophysiques. Dans cette optique, un multi-traçage a été réalisé sur le site de St Ferron dans le Causse de Campestre (Larzac, France) où un tunnel, creusé dans le calcaire du Tithonien, relie une doline à un abîme sous l’épikarst. Ce traçage a pour but de vérifier la possibilité d’un transfert horizontal dans la zone et d’étudier l’impact des variations spatiales de l’épikarst sur les écoulements.

.2 ÉTUDE GEOPHYSIQUE REALISEE SUR LE SITE

À St Ferron, des mesures électriques (Fores *et al.*, 2018) et gravimétriques (Fores, 2016) ont été réalisées et permettent une interprétation des propriétés du milieu. Ces études montrent des variations spatiales des propriétés (densité, porosité et résistivité électrique) interprétées comme témoins de la présence de zones plus ou moins altérées, fracturées ou argileuses. Une forte variabilité temporelle et spatiale du stockage est aussi attendue.

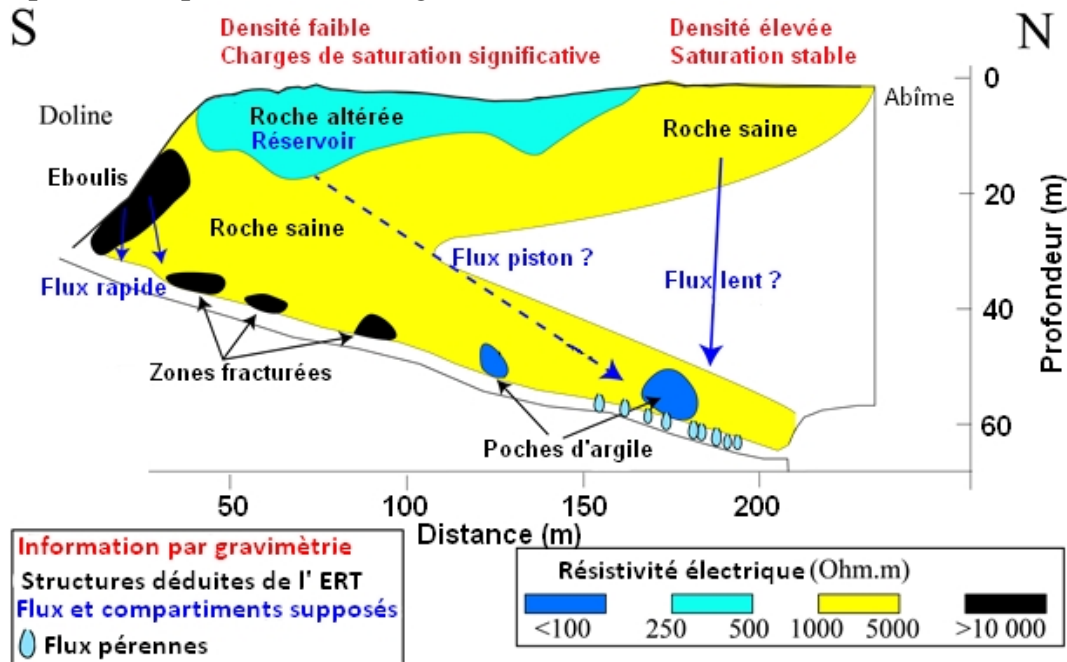


Fig. 1- Interprétation des données gravimétriques et électriques sur le site de St Ferron. D’après Fores et al (2018)

L’interprétation conjointe de ces études géophysiques et de l’observation des écoulements visibles dans le tunnel a permis de poser des hypothèses sur les écoulements présents (cf. Fig. 1). Sur cette base, une expérience de multi-traçage

a été conçue afin de vérifier la relation entre la roche altérée, envisagée comme un réservoir (Zone Doline) et les écoulements pérennes présents dans le tunnel (Zone Abîme) ainsi que les vitesses des écoulements dans la zone.

.3 ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE PAR TRAÇAGE

Le 16 mars 2018, après une période de pluie, deux traceurs ont été injectés simultanément en deux points d'injection séparés (cf. **Fig. 2**) de 100m, choisis sur base des études géophysiques (750g de Fluorescéine dans la roche altérée - Zone Doline et 250g de Sulforhodamine B dans la roche saine - Zone Abîme). Ces deux traceurs sont facilement détectables (même à très faible concentration de l'ordre du µg/l), peu adsorbés, sans interférences, mais sensibles à la lumière (Käss, 1994). Quinze litres d'eau ont ensuite été ajoutés pour chasser les traceurs hors du sol, vers l'épikarst et limiter leur adsorption.

Afin d'avoir une bonne résolution spatiale, les percolations dans le tunnel ont été échantillonnées manuellement tous les 10 à 20 m environ. L'échantillonnage est effectué, en fonction du débit, en un point ou plusieurs points rapprochés. Le jour de l'injection, l'échantillonnage a été réalisé au minimum toutes les heures. Du 19 au 22 mars, un échantillonnage journalier a été effectué, puis de plus en plus espacé (7/04, 13/04 et 22/05). Tous les échantillons prélevés ont été conservés à l'abri de la lumière jusqu'au 23 mai, date à laquelle ils ont été analysés à l'aide d'un spectrofluorimètre de l'IRSTEA (PerkinElmer LS45). Les longueurs d'onde pour la Fluorescéine sont 490nm pour l'excitation et 515nm pour l'émission. Pour la Sulforhodamine B, elles sont respectivement de 565nm et 586nm.

.4 RESULTATS DES TRAÇAGES (CF. FIG.2) ET CONCLUSION

Le traçage à la fluorescéine a mis en évidence un transfert lent (~1m/j), vertical et une concentration maximale de traceur faible (0.2-0.3µg/l). La possibilité d'un transfert rapide et quasi vertical dans la Zone Doline n'est pas confirmée. En effet, la connaissance limitée des variations du bruit de fond et la fréquence d'échantillonnage ne permettent pas de conclure sur ce point.

Le traçage à la Sulforhodamine B ne présente pas d'augmentation significative de l'intensité de fluorescence par rapport au bruit de fond même si un léger pic (0.3-0.4 µg/l) est visible à l'aplomb du point d'injection. En effet, il apparaît en parallèle un pic pour la fluorescéine, ce qui est interprété comme une variation du bruit de fond. Une arrivée simultanée et fugace des deux traceurs est peu probable au vu de la disposition des points d'injections et d'échantillonnage. D'autres fluctuations plus faibles du même type sont d'ailleurs visibles, même à l'échelle horaire.

Finalement, il est possible de conclure à l'absence de transferts horizontaux entre les points d'injections et le tunnel sur la durée du traçage (2 mois ½). Les

transferts observés sont toujours relativement verticaux. Un suivi prolongé du traçage est envisagé afin de vérifier l'absence de transfert horizontal très lent.

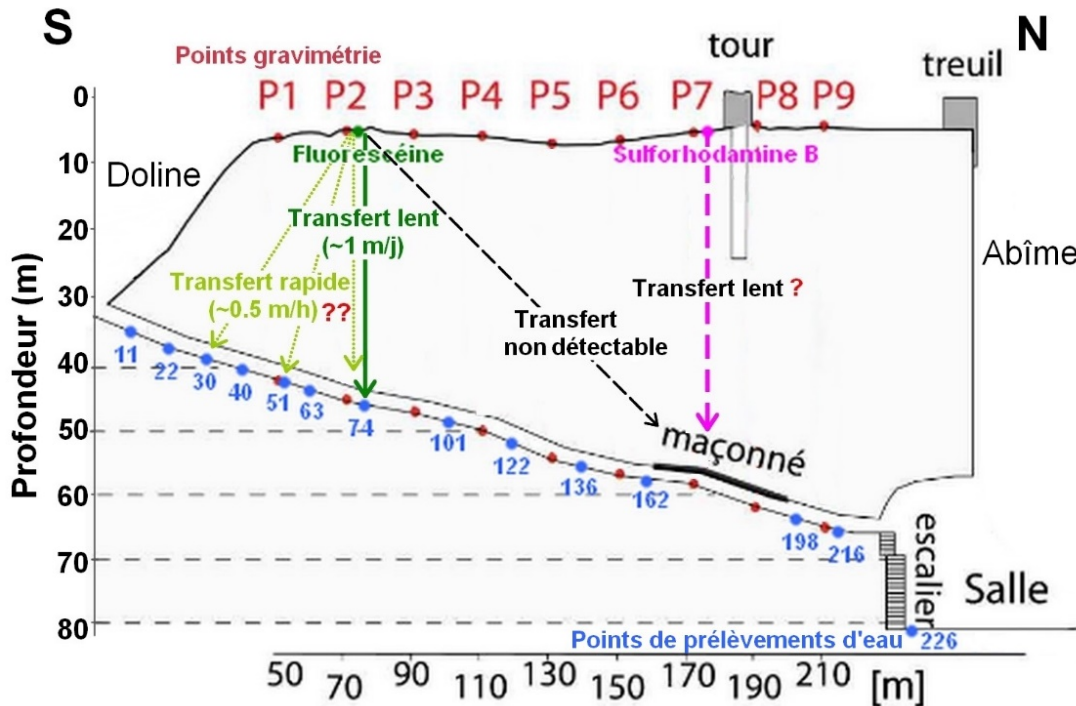


Fig. 2 – Vue en coupe du tunnel avec les informations du traçage

En conclusion, cette étude a mis en évidence l'importance de réaliser des études géophysiques et des traçages sur un tel site. Les études géophysiques permettent d'identifier les zones d'intérêt susceptibles de présenter des mécanismes de transfert différents. Les traçages permettent de valider les hypothèses sur ces transferts. Ensemble, ces méthodes caractérisent l'épikarst et son fonctionnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARBEL Y., GREENBAUM N., LANGE J., INBAR M., 1994 – Infiltration processes and flow rates in developed karst vadose zone using tracers in cave drips. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(14),1682-1693.

FORES B., LESPARRE N., CHAMPOLLION C., NGUYEN F., 2018 (publication en cours) – Variability of the water stock dynamics in karst: insights from geophysics.

FORES B., 2016 – Gravimetry and passive seismic monitoring for hydrological modeling in karstic areas. Application to the Durzon basin (Larzac, France). *Thèse de doctorat de l'université de Montpellier*

KÄSS W.A., 1994 – Hydrological tracing practice on underground contaminations. *Environmental Geology*, 23(1),23-29.

KOGOVSEK J., PETRIC M., 1994 – Solute transport processes in a karst vadose zone characterized by long-term tests (the cave system of Postojnska Jama, Slovenia). *Journal of Hydrology*, 519,1205-1213.

SUIVI DE LA PERIODE DE REPOS DE LA COUCHE FILTRANTE DES FILTRES PLANTÉS DE ROSEAUX PAR TOMOGRAPHIE RX

MARTINEZ GD.¹, OXARANGO L.², MOLLE P.¹, FORQUET N.¹

¹ Irstea UR Reversaal, 5 rue de la Doua 69616, Villeurbanne, BP 32108, FRANCE (german.martinez-carvajal@irstea.fr)

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, F-38000 Grenoble, France (laurent.oxarango@univ-grenoble-alpes.fr)

RÉSUMÉ

Cette étude vise à comprendre les changements à l'échelle du pore de la couche filtrante des Filtres Plantés de Roseaux (FPR) et leur influence dans son oxygénation pendant la période de repos. Pour ce faire, un séchage ex-situ de six échantillons d'un FPR (3 stérilisés par rayons gamma) a été réalisé à conditions contrôlées, et un suivi par tomographie à rayons X a été fait à 0, 1 et 3 jours de séchage. La représentativité de l'échantillonnage a été évaluée par une cartographie électromagnétique du filtre. Après les scans, l'évolution de profils d'oxygénation des échantillons a été suivie. Les résultats obtenus ne montrent pas de changements structurels significatifs, les conditions de séchage doivent être reconsidérées. Les profils d'oxygénation montrent des comportements variables qui doivent être mieux étudiés à l'aide de la tomographie RX.

Mots clés : *Filtres Plantés de Roseaux, Tomographie à Rayons X, Réseau de pores, Transport d'oxygène, Méthodes électromagnétiques*

PORE SCALE MONITORING OF THE REST PERIOD OF FILTERING MEDIA OF TREATMENT WETLANDS BY X-RAY TOMOGRAPHY

ABSTRACT

This study aims to enlighten the geometric changes at the pore scale of filtering media of Vertical Flow Treatment Wetlands (VFTW) and their influence on oxygenation during the rest period. To do so, an ex-situ drying of six samples of a VFTW (3 sterilized by gamma rays) was carried out at controlled conditions and monitored by X-ray tomography at 0, 1 and 3 days of drying. After each scan, the oxygen transport within the sample was studied by measuring vertical oxygen concentration profiles. The results show no significant structure changes. It is necessary to redesign the drying experiment. The results of oxygen profiles show different behaviors that should be studied further by x-ray tomography

Key words: *Treatment Wetlands, X-ray Computed Tomography, Pore Structure, Oxygen Transfer, Electromagnetic Mapping*

.1 INTRODUCTION

X-ray tomography is a technique frequently applied to study pore media at the pore scale. It has been proven to produce good quality images of VFTW filtering media and it is well adapted to record changes in pore structure due to drying operations. (Martinez Carvajal et al., 2017)

First stage filters in French VFTW are fed with raw waste water for 3.5 days and let rest for the 7 consecutive days (Molle et al. 2005). The respect of this cycle is necessary to maintain aerobic conditions in the filters (thanks to deposit dewatering, and evapotranspiration), let mineralization to take place and control biomass growth. Dewatering and evapotranspiration are probably the major responsible of changes in deposit and voids structure allowing faster water infiltration. The objective of this study is to contribute to a better knowledge of processes occurring during the rest period by performing an ex-situ drying of the filtering medium and following it by X-ray tomography.

.2 MATERIALS AND METHODS

Six samples were extracted manually at the end of the feeding period of one filter of the first stage of the treatment plant in Montromant (France) in summer. This plant was built in 1994 to treat 200 people equivalent according to the French standards (Molle et al., 2005).

Three sampling points with similar electric conductivity were chosen based on an EM mapping. The samples consisted of plastic cylinders 5cm diameter and 16cm height containing the first part of the filtration layer. Two samples per point were extracted. Three samples, one per sampling point (“B-labeled”), were sterilized with a dose of 31.8 kGr of gamma rays to suppress bacterial activity. All samples were stored at 5°C in before starting the drying operation.

The drying operation was held in an acrylic glass chamber covered with a polystyrene jacket for 72 hours. The temperature was maintained at 25°C. The relative humidity was maintained near the equilibrium value of 75% using a 2 liter NaCl saturated solution. During the drying operation only the top of the cylinder was left in contact with the chamber’s atmosphere.

Samples were scanned by X-ray tomography at 0, 24 and 72 hours of drying. The resolution was 35µm/voxel. After each scan, six oxygen probes were inserted 0.5 cm into the samples and placed every 2.5 cm from the top. The probes were calibrated into a 0-100% scale. A N₂(g) flow of 1 m/s (D = 5mm) was fed through the bottom of the sample for at least ten minutes. After the N₂(g) flow was stopped the samples were allowed to be oxygenated naturally with the air inside the chamber and the oxygen concentration profile was recorded for at least 40 min.

.3 RESULTS AND DISCUSSION

The scans in Figure 1 show the structure of one of the samples. There are three main gray levels: (i) black for voids, (ii) light gray/white for gravels and (iii) middle gray, which represent plant tissues, remaining water and filtrated solids (mostly organic). For simplicity, the middle gray will be called OM (organic matter). The topmost 9 cm of the sample consist mainly of OM while the rest is a mix of gravel and OM (“cf. Fig1. 1a”). The scans do not show significant changes in the voids structure over the drying period. Based on previous observations of deposit cracks formed during the rest period it seems reasonable to state that drying was not representative.

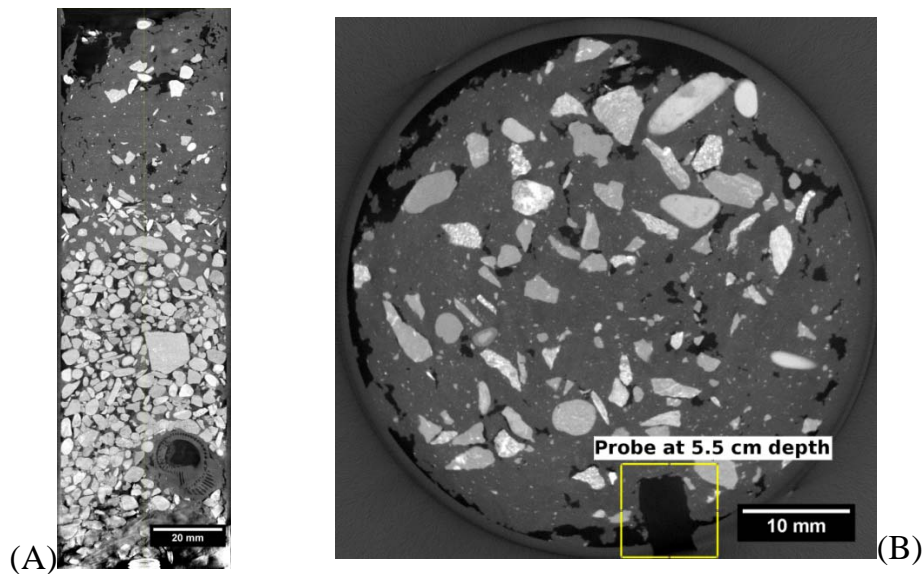


Fig. 1 - Slices of a X-ray scan of a sample of filterig medium. (A): Vertical slice at 0h of drying. (B). Horizontal slice at depth = 5.5 cm

All of the samples had similar losses around of about $2.5\% \pm 0.37\%$ (v/v) and the only force inducing it was evaporation (no evapotranspiration is possible at the sample's size).

The methodology presented in this work should be modified to perform an ex-situ drying as similar as possible as in real outdoor conditions. The key parameter to reproduce is probably the amount of water evaporation.

Diffusion should be the main mechanism of vapor and oxygen transport during the drying as there was no induced air movement inside the chamber. This may be verified by comparing measurements of oxygen concentration and CFD simulations of oxygenation.

The oxygen profiles for samples 1A and 1B, are presented in **Figure 2**. One should expect that (i) profiles are sorted depending on the probe depths and that (ii) oxygen concentrations are higher in the sterilized sample as bacterial activity was suppressed. Neither of these behaviors is depicted in **Figure 2**.

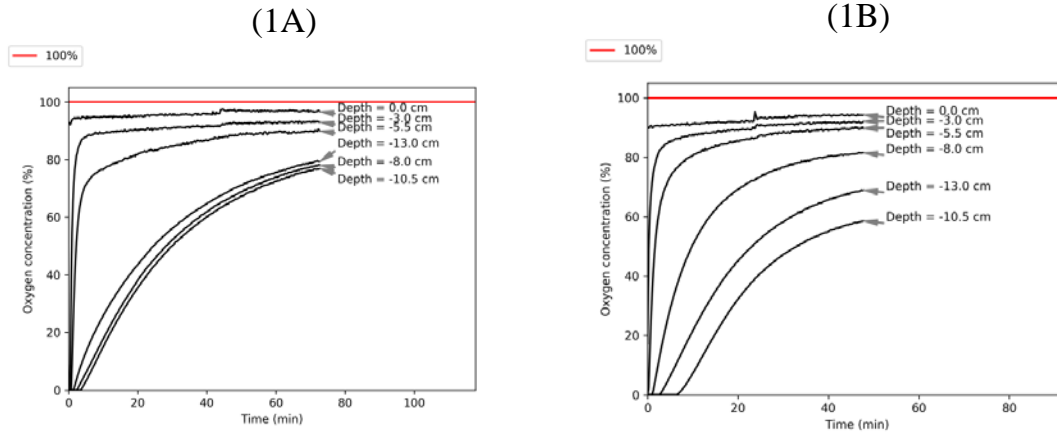


Fig. 2 - Oxygen profiles evolution for two samples after 72h drying

The difficulties to design a proper experimental methodology and the high number of phenomena taking place at the same time make CFD simulations an interesting way to understand soluble solute transport in wetlands filtering media. For instance, the voids structure around the probes (**Figure 1B**) could explain the oxygenation results in **Figure 2**.

REFERENCES

- MARTINEZ CARVAJAL GD., OXARANGO L., MOLLE P., FORQUET N. (2017)** - . Modelling Suspended Solids Transport in Vertical Flow Constructed Wetlands. *In International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control. Big Sky, Motana USA.*
- MOLLE P., LIÉNARD A., BOUTIN C., MERLIN G., IWEMA A. 2005** - . “How to Treat Raw Sewage with Constructed Wetlands: An Overview of the French Systems. *Water Sci. Techno 51 (9): 11–21.*

SPATIALISATION DE VARIABLES PHYSIQUES DANS LES SOLS PAR METHODES GEOPHYSIQUE, GEOTECHNIQUE ET GEOSTATISTIQUE : APPROCHE NUMERIQUE

RABOULI S¹., DUBOIS V¹., HENINE H²., CLEMENT R.¹

¹IRSTEA, UR REVERSAAL, 5 rue de la Doua - BP 32108, 69616, Villeurbanne Cedex, France (remi.clement@irstea.fr)

² IRSTEA, UR HYCAR, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes-CS 10030, 92761 Antony Cedex, France

RÉSUMÉ :

On considère souvent le sol comme un réacteur biologique pour le traitement des eaux usées domestiques, ou comme un exutoire pour le rejet des eaux traitées mais aussi comme un milieu à irriguer. Dans ces cas, la perméabilité du sol est un paramètre clé pour disposer de la capacité d'infiltration nécessaire, et ainsi atteindre le traitement attendu. A ce jour, il n'existe pas de technique satisfaisante permettant d'évaluer la perméabilité d'un sol hétérogène (et sa variabilité) à l'échelle d'une parcelle de sol. Le développement d'une méthodologie permettant de spatialiser les propriétés du sol est essentiel. Ici, nous démontrons l'intérêt de l'utilisation d'une méthode géostatistique, la BME « Bayesian Maximum Entropy », pour la réalisation d'une cartographie en 2D- 3D de la capacité d'infiltration des sols hétérogènes. Cet outil ouvre des perspectives d'optimisation du dimensionnement des ouvrages réalisant l'infiltration d'eaux usées traitées.

Mots clés : Capacité d'infiltration, Couplage, Géostatistiques, Reuse, Spatialisation

ABSTRACT:

SPATIALIZATION OF PHYSICAL VARIABLES IN SOILS BY GEOPHYSICAL, GEOTECHNICAL AND GEOSTATISTIC METHODS: DIGITAL APPROACH

Soil is often considered as a biological reactor for the treatment of domestic wastewater, or as an outlet for the discharge of treated water but also as an environment to irrigate. In both cases, the permeability of the soil is a key parameter to have the necessary infiltration capacity, and to achieve the expected treatment. To date, there is no satisfactory technique for evaluating the permeability of a heterogeneous soil (and its variability) at the scale of a parcel of soil. The development of a methodology for spatialising the properties of the soil is essential. We demonstrate here the interest of the use of a geostatistical method, the BME "Bayesian Maximum Entropy", for the realization of a cartography in 2D- 3D infiltration capacity of heterogeneous soils. This tool opens up prospects for optimizing the sizing of structures that infiltrate treated wastewater.

Key words: Infiltration capacity, Coupling, Geostatistics, Reuse, Spatialisation

.1 INTRODUCTION

En France, quel que soit le type de filière, les effluents traités des stations d'épuration des eaux usées domestiques sont rejetés dans le milieu récepteur, et bien souvent dans le lit d'une rivière. Dans certains cas, le rejet est infiltré dans le sol, faute de rivière à proximité ou pour limiter l'impact du rejet des eaux usées traitées. Il est donc préférable de favoriser l'infiltration de l'effluent dans le sol pour limiter l'impact vers la rivière voire pour « affiner » la qualité de l'eau usée traitée. En effet,

le sol est souvent mis en avant comme un bon épurateur des eaux usées domestiques (*Petitjean et al., 2015*) (*Rolland, 2000*). Or, le traitement des eaux usées traitées par le sol est conditionné par sa capacité à se laisser traverser par l'effluent. Dans ce contexte la connaissance de la conductivité hydraulique à saturation reste l'un des paramètres clé qui décrit la capacité d'infiltration dans le sol. Cette capacité d'infiltration va nous permettre de définir, le potentiel d'un sol à « affiner » les eaux usées traitées. La mesure de la conductivité hydraulique à saturation est décrite dans la littérature. De plus, dans les années 80, de nombreux travaux, ont été réalisés pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols homogènes notamment avec le développement de différents systèmes de mesure. Cependant, en contexte hétérogène, l'utilisation des infiltromètres classiques ne permet pas d'avoir une information représentative de l'ensemble du site d'étude. La problématique centrale, réside alors dans la dispersion de la conductivité hydraulique à saturation dans les sols hétérogènes. Localement, les tests d'infiltration permettent d'obtenir des mesures fiables. Cependant, au regard de leur faible couverture dans l'espace, ces tests ne fournissent qu'une information partielle du site, qui demandent à être complétés (*Brunet et al. 2011*). Or, multiplier les mesures peut s'avérer être une démarche trop invasive, fastidieuse et coûteuse. Certes, l'information spatiale de l'hétérogénéité du sol est bien présente dans les mesures géophysiques. Mais, ces mesures sont sous-explorées à cause de l'incertitude des mesures et de l'influence des différents paramètres du sol. En effet, les méthodes géophysiques fournissent un premier niveau de spatialisation à condition de ne considérer qu'une seule relation en tout point de l'espace. Or, comme la variabilité de la relation pétro-physique en contexte hétérogène est complètement négligée, ces relations ne peuvent donc pas être appliquées à des sols hétérogènes de manière fiable. Ainsi, sur le terrain, l'utilisation de ces lois pour transformer les signaux géophysiques (résistivité électrique, vitesses des ondes) en conductivité hydraulique à saturation par exemple, induirait de grandes erreurs et ne permettrait pas d'obtenir une cartographie 2D ou 3D acceptable de la conductivité hydraulique. Pour la connaissance des variations des propriétés physiques du sol, l'intégration rigoureuse des informations issues des mesures électriques nécessite donc l'utilisation d'autres méthodes de spatialisation. Ces méthodes tiennent compte à la fois des mesures ponctuelles et celles géophysiques. En 2002, certains auteurs (*Bogaert, 2002*), avaient montré que la fusion des données bayésiennes répondait à cet objectif, notamment la méthode BME : « Bayesian Maximum Entropy ». En effet, la BME permet d'intégrer, le plus rigoureusement possible, les informations provenant de sources de données différentes (hydrologique et géophysique), ainsi que des incertitudes et des informations a priori différentes sur chaque jeu de données pour obtenir une meilleure prédiction spatiale de la variable d'intérêt. Dans d'autres types d'applications, cette méthode a donné des résultats concluants (*Christakos et al., 2001*). Son avantage (par rapport aux méthodes de Krigeage ou d'interpolation plus classiques) est que le cadre bayésien peut tirer profit des mesures incertaines mais spatialisées tout en fournissant une estimation de l'incertitude de prédiction qui peut être introduite dans les outils de modélisation ou d'aide à la décision. De manière générale, la BME s'inclut dans les questions scientifiques majeures de la représentativité et du changement d'échelle. Le présent article propose d'investiguer numériquement l'intérêt de la méthode.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

La démarche générale s'organise en deux parties. Dans un premier temps, nous allons construire un jeu de données synthétiques de conductivité hydraulique à saturation à partir d'une spatialisation contrôlée (K_s). Celle-ci est basée uniquement sur une distribution pseudo-aléatoire suivant un concept statistique. Pour cela, nous avons généré numériquement l'équivalent d'une surface rugueuse aléatoire, avec différents facteurs d'auto-corrélation, afin de produire sur une parcelle de 25m X 25m, des hétérogénéités multiples.

Au travers de la bibliographie, nous avons recherché un ensemble de données reliant à la fois les conductivités hydrauliques, la teneur en eau et la résistivité, en compilant les données. Ainsi, nous avons pu construire une relation, de type pétro-physique, résistivité teneur en eau et conductivité hydraulique. Cette relation nous a permis de transformer les conductivités hydrauliques en résistivités électriques vraies du modèle. Ensuite, nous avons simulé des mesures de trainées de résistivités électriques pour obtenir des cartes surfaciques de résistivités électriques apparentes qui ont été bruitées. Puis, nous avons extrait des points représentant les mesures réelles à partir des données de conductivité hydrauliques. Dans un deuxième temps, l'ensemble des mesures a été introduit dans le code de BME adapté aux besoins géophysiques. Pour montrer l'intérêt de la méthode BME dans la spatialisation, nous avons choisi de réaliser une analyse paramétrique. Pour cela, nous avons fait varier la taille des hétérogénéités, puis la teneur en eau, et enfin l'amplitude du bruit.

Les résultats BME ont été comparés au krigeage classique, et à la transformation simple des résistivités électriques au travers d'une relation empirique. La comparaison a été réalisée en utilisant des cartographies des données vraies exprimées sous forme de probabilité de densité de l'erreur.

Pour la partie résultat, on simule l'exposant positif de la conductivité hydraulique. Le code couleur montre que le sol contient trois grand types de sols, à savoir : les valeurs de k_s 10^{-7} , 10^{-4} , 10^{-3} correspondent respectivement aux: argile, limon et sable. Dans la suite, le terme de «conductivité hydraulique» sera employé pour désigner l'exposant positif de la conductivité hydraulique.

.3 RESULTATS

La figure ci-dessous indique les résultats de la spatialisation par les méthodes géophysiques dont la BME, pour une teneur en eau homogène de 0.25 et un bruit gaussien de 16%, sur des données de résistivité apparente. Vingt points d'échantillonnages ponctuels ont été simulés. Les résultats montrent que :

- le krigeage seul (c), est naturellement celui qui décrit le moins bien la répartition des données hétérogènes.

- L'utilisation des données géophysiques (d) avec une loi reliant la résistivité et la conductivité hydraulique à saturation via la teneur en eau, montre que les grands ensembles sont retrouvés mais que les hétérogénéités sont fortement lissées.

En revanche, la méthode BME (e) est celle qui permet de générer des hétérogénéités dans la donnée, et de moins lisser les mesures. Les sous-ensembles d'hétérogénéité sont ainsi retrouvés, d'autres apparaissent à certain endroit en générant des artéfacts.

Cependant, la fonction de probabilité de densité de l'erreur (f) montre que la BME améliore les résultats.

Nous verrons que dans l'analyse paramétrique, l'influence du nombre de point et leur position est primordiale. En contexte bruité, la BME permet d'obtenir des cartes plus robustes que la simple relation de type « pétro-physique ».

Nous remarquons aussi que l'ensemble des résultats est conditionné par la bonne connaissance de l'incertitude de nos mesures. D'autre part, la prise en compte de la teneur en eau sera primordiale pour la suite des estimations.

Plus tard, des règles pour l'application future de la méthode seront proposées.

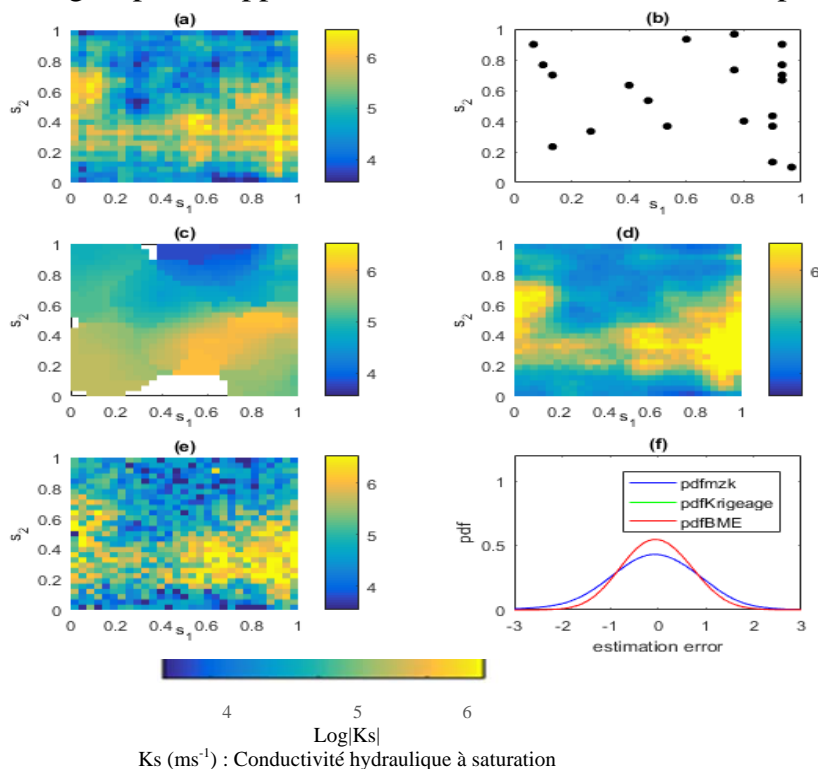


Figure : Résultats de la spatialisation : (a) Données de conductivité hydraulique simulée, (b) Mesure ponctuelle, (c) krigage, (d) Relation pétro-physique simple, (e) BME, (f) Densité de probabilité de l'erreur entre les teneurs en eau obtenu par : transformation pétro-physique (bleu) krigage (vert) et BME (rouge)

4 CONCLUSION

La BME est une méthode géostatistique qui permet d'améliorer la spatialisation de la conductivité hydraulique à saturation. En milieu hétérogène, elle offre des perspectives intéressantes de modélisation par rapport au simple Krigeage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PETITJEAN A., FORQUET, N., CHOUBERT, J.-M., COQUERY, M., BOUYER, M., AND BOUTIN, C., 2015– Land characterisation for soil-based constructed wetlands. Adapting investigation methods to design objectives. *Water Practice and Technology*, v. 10, no. 4, p. 660–668.

ROLLAND, L., 2009 - Analyses comparatives de systèmes d'infiltration-percolation. *Colmatage et outils de diagnostics*. Université de Montpellier 2.

BRUNET, P., CLEMENT, R., AND BOUVIER, C., 2011,-Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT). A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, v. 380, no. 1–2, p. 146–153.

BOGAERT, P., 2002.- Spatial prediction of categorical variables. The Bayesian maximum entropy approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 16(6), p. 425-448.

CHRISTAKOS, G., SERRE, M.L., KOVITZ J., 2001.-BME representation of particulate matter distributions in the state of California. *Jour. Geophysical Research-D*, 106(D9), p. 9717-9732.

DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES GÉO-ÉLECTRIQUES POUR LA CARACTÉRISATION DES PHÉNOMÈNES DE PRÉCIPITATION-DISSOLUTION EN MILIEU CARBONATÉ

REMBERT F.¹, GUERIN R.¹, JOUGNOT D.¹, ZUDDAS P.¹

¹ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75252
PARIS Cedex 05, flore.rembert@sorbonne-universite.fr

RÉSUMÉ

Le suivi temporel des processus de précipitation et dissolution des minéraux carbonatés intéresse l'exploitation de réservoirs (e.g. eau, gaz) ou le stockage géologique (e.g. CO₂, H₂, déchets). Les récentes avancées des connaissances théoriques et de l'instrumentation des méthodes géo-électriques permettent maintenant d'envisager leur utilisation pour le suivi quantitatif in situ de processus hydrogéologiques (e.g. flux hydriques, transport de solutés) et de réactions géochimiques (e.g. dissolution-précipitation des minéraux) ou biogéochimiques (e.g. génération de biofilms bactériens). Pour répondre à cette problématique, nous proposons de caractériser les propriétés électriques complexes de la dissolution de la calcite par des mesures en laboratoire sur un matériau synthétique en utilisant la méthode de la polarisation provoquée spectrale (PPS, i.e. spectroscopie d'impédance électrique basse fréquence, entre 1 mHz et 50 kHz) et un dispositif d'acquisition en développement.

Mots clés : dissolution de la calcite, polarisation électrique, suivi temporel.

ABSTRACT

GEO-ELECTRIC METHODS DEVELOPMENT TO CHARACTERIZE PRECIPITATION-DISSOLUTION PHENOMENA IN CARBONATE CONTEXT

Precipitation and dissolution processes in carbonates monitoring is a major deal of tanks exploitation (e.g. water, gas) or geological storage (e.g. CO₂, H₂, waste). It is now possible to quantitatively monitor in situ hydrogeological phenomenon (e.g. hydric flux, solute transport) or geochemical (e.g. minerals dissolution-precipitation) and biogeochemical reactions (e.g. bacterial biofilms generation) thanks to recent progresses of theoretical knowledge and in instrumentation of geo-electrical methods. To answer to this problematic, we propose to characterize the complex electrical properties of calcite dissolution with laboratory experiments on a synthetic material using spectral induced polarization method (SIP, i.e. low frequency impedance spectroscopy, between 1 mHz and 50 kHz) and a data acquisition device in development.

Key words: calcite dissolution, electrical polarization, monitoring.

.1 INTRODUCTION

La méthode de la polarisation provoquée spectrale (PPS) est de plus en plus utilisée pour caractériser les roches carbonatées (Norbisrath et al., 2017 ; Halisch et al., 2018).

Cette méthode de mesure permet d'observer des phénomènes de polarisation électrique ayant lieu à l'interface entre le minéral et le fluide poral selon la théorie de double couche électrique (e.g., Chelidze et al., 1999).

La compréhension des mécanismes de polarisation à l'origine des signaux électriques mesurés n'est pas encore totale, mais de nombreux modèles ont été développés afin d'en approcher les causes (Marshall et Madden, 1959 ; Leroy et al., 2017). La résistivité électrique mesurée ρ^* est une grandeur complexe :

$$\rho^* = |\rho|e^{i\phi} = \rho' + i\rho'' \quad (1)$$

L'amplitude $|\rho|$ et la phase ϕ de la résistivité électrique complexe sont les composantes mesurées, tandis que les parties réelle et imaginaire, ρ' et ρ'' , représentent respectivement la résistivité ohmique et les mécanismes de polarisation. La phase ϕ est une valeur négative définie par :

$$\phi = \arctan\left(\frac{\rho''}{\rho'}\right) \quad (2)$$

Les roches carbonatées se distinguent par une forte réactivité à l'acide, qui est un critère de reconnaissance très utilisé (Morse et Arvidson, 2002). En revanche, si le suivi temporel de la dissolution de roches carbonatées a déjà été réalisé en laboratoire par la mesure de grandeurs physico-chimiques (e.g., température, pH, conductivité électrique, pCO₂) pour caractériser l'évolution de paramètres pétrophysiques (e.g., porosité, perméabilité) effectifs ou spatialisés grâce à des techniques d'imagerie 3D (Luquot et al., 2014a ; Luquot et al., 2014b), seuls Halisch et al. (2018) ont publié une étude sur la dissolution de roches carbonatées couplée à des mesures de PPS. Dans cette étude, des spectres de phase ϕ sont mesurés suite à plusieurs étapes de dissolution.

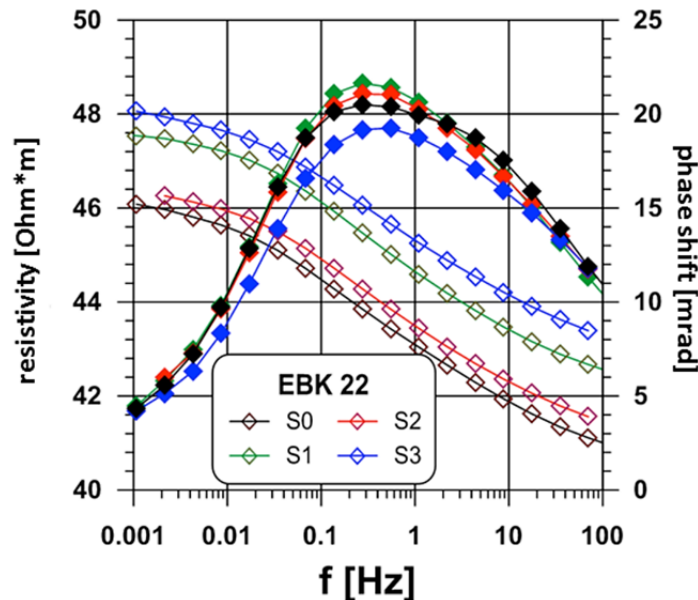


Fig. 1 – Mesures PPS réalisées par Halisch et al. (2018) sur un échantillon carbonaté à 4 étapes d'acidification. Les losanges vides correspondent à l'amplitude et les losanges colorées à la phase.

La forme en cloche du spectre de phase montre que l'échantillon se polarise (Fig. 1). Cependant, on observe peu de variations pour les différentes étapes de dissolution. Le suivi temporel n'est donc pas concluant. Par ailleurs, ces spectres convoluent la complexité de la roche naturelle avec les variations dues à la dissolution. En effet, les

échantillons étudiés contiennent différents minéraux carbonatés avec des grains de tailles différentes, mais également quelques minéraux de quartz et d'argile (illite). Il serait donc préférable de mener une étude sur un matériau synthétique, dont on contrôle la nature et la taille des grains.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Caractéristiques de l'échantillon

Les mesures sur des échantillons de roches naturelles sont compliquées à interpréter, car une roche est un assemblage hétérogène de nombreux minéraux de nature et taille variables et ayant un certain degré d'altération.

De la même manière que Wu et al. (2010), nous contrôlons les caractéristiques de notre échantillon pour n'étudier que la réactivité de la calcite pure. Notre système est donc composé de poudre de calcite obtenue après tamisage et comprenant des grains de 125 à 250 μm de diamètre. Nous n'avons en revanche pas pu contraindre la sphéricité de ces grains.

2.2 Dispositif de mesures PPS

La poudre de calcite est contenue dans une cellule cylindrique en plexiglas de 20 cm de long et 10 cm de diamètre, scellée par deux embases métalliques, qui servent d'électrodes d'injection du courant électrique (0,4 mA). L'appareil de mesures PPS est le PSIP de Ontash & Ermac, utilisé pour un couple d'électrodes d'injection et deux couples de mesures M_1N_1 et M_2N_2 [Fig. 2].

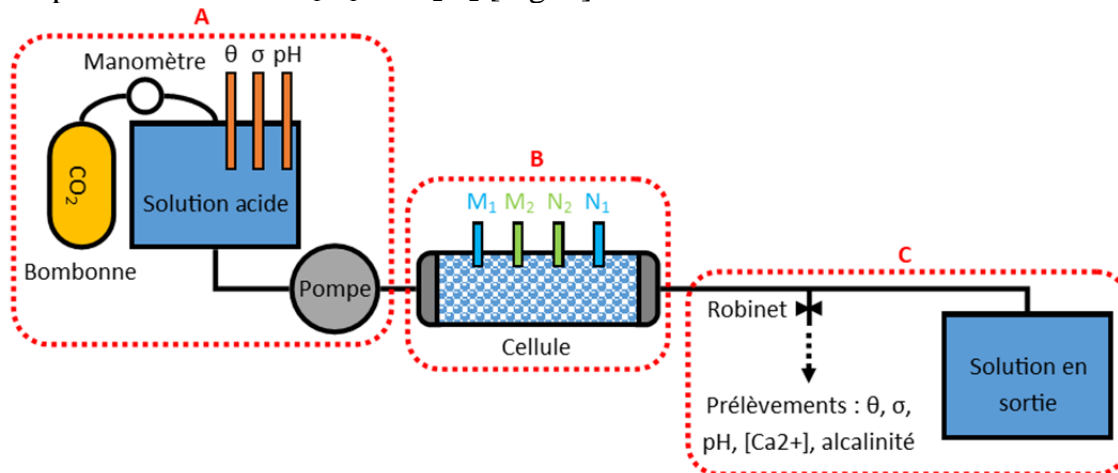


Fig. 2 – Schéma du dispositif de mesures PPS et physico-chimiques d'un échantillon de poudre de calcite. A : solution d'entrée dont on mesure les caractéristiques physico-chimiques à pression partielle en CO_2 et débit fixés respectivement par une bombonne de gaz et une pompe. B : électrodes de mesure et cellule contenant la poudre de calcite scellée par les embases métalliques servant à l'injection du courant électrique. C : circuit de sortie avec un robinet pour prélever la solution et mesurer différents paramètres.

Les électrodes de mesure sont des électrodes dites « impolarisables » de type Ag/AgCl. Elles sont composées d'un fil d'argent (Ag) recouvert d'un dépôt de chlorure d'argent (AgCl) et baigné dans une solution gélifiée de chlorure de sodium

(NaCl) à 0,68 mol.L⁻¹. Le contact électrique avec le milieu est assuré grâce à une bougie poreuse.

2.3 Protocole de mesures

La dissolution a lieu en système fermé. Une solution d'acide chlorhydrique à 0,01 mol/L⁻¹ circule dans la cellule avec un débit de 36 µL.min⁻¹ fixé par une pompe péristaltique. On fixe également la pression partielle en CO₂ du système grâce à une bombonne pressurisée.

En amont de la cellule on contrôle la conductivité, le pH et la température du fluide. De plus, on prélève régulièrement le fluide en sortie de cellule pour mesurer la concentration en calcium dissous [Ca²⁺], l'alcalinité et les mêmes paramètres physico-chimiques que pour la solution d'entrée [Fig. 2]. La mesure de résistivité électrique complexe est réalisée au cours de la dissolution en faisant l'hypothèse que le courant électrique injecté ne perturbe pas l'avancement de la réaction de dissolution.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHELIDZE T. L., GUEGUEN Y., RUFFET C., 1999** – Electrical spectroscopy of porous rocks: a review. I. Theoretical models. *Geophys. J. Int.* (1999) 137, pages 16-34.
- HALISCH M., HUPFER S., WELLER A., DLUGOSCH R., PLUMHOFF H. P., 2018** – An experimental setup for the assessment of effects of carbonate rock dissolution on complex electrical conductivity spectra. *Paper SCA2018-051, Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts, Trondheim, Norway, 27-31 August.*
- LEROY P., SHUAI L., JOUGNOT D., REVIL A., WU Y., 2017** – Modelling the evolution of complex conductivity during calcite precipitation on glass beads. *Geophys. J. Int.* (2017) 209, pages 123-140.
- LUQUOT L., RODRIGUEZ O., GOUZE P., 2014a** – Experimental characterization of porosity structure and transport property changes in limestone undergoing different dissolution regimes. *Transp Porous Med* (2014) 101, pages 507-532.
- LUQUOT L., ROETTING T. S., CARRERA J., 2014b** – Characterization of flow parameters and evidence of pore clogging during limestone dissolution experiments. *Water Resour. Res.*, 50, pages 6305-6321.
- MARSHALL D. J., MADDEN T. R., 1959** – Induced polarization, a study of its causes. *Geophys*, vol. XXIV, NO. 4 (October 1959), pages 790-816.
- MORSE J. W., ARVIDSON R. S., 2002** – The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. *Earth-Science Reviews* 58 (2002), pages 51-84.
- NORBISRATH J. H., WEGER R. J., EBERLI G. P., 2017** – Complex resistivity spectra and pore geometry for predictions of reservoir properties in carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 151 (2017), pages 455-467.
- WU Y., HUBBARD S., WILLIAMS K. H., AJO-FRANKLIN J., 2010** – On the complex conductivity signatures of calcite precipitation. *J. Geophys. Res.* (2010), 115, G00G04.

MONITORING DE PROFIL DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DANS LA ZONE NON SATUREE

SEGER M.¹, GIOT G.¹, EUZEN C.¹, NEYENS D.², COUSIN I.¹

¹ Inra Centre Val de Loire, URSOLS, 2163 avenue de la Pomme de Pin – CS 400101 Ardon 45075 ORLEANS Cedex 2

² imaGeau, Cap alpha, 9 avenue de l'Europe, 34830 Clapiers

RÉSUMÉ

La connaissance des processus hydriques dans la zone non saturée est un enjeu important. Le dispositif géophysique SMD* permet le suivi temporel de la résistivité *in situ* sur 21 niveaux, depuis la surface jusqu'à 3.10 m. Les premiers résultats d'une année de mesure permettent de dresser un bilan positif sur la qualité des données recueillies et nous suggèrent une capacité à détecter des transferts hydriques entre les différentes couches du sous-sol.

Mots clés : suivi temporel, résistivité électrique, zone non saturée, sol

ABSTRACT

TIME MONITORING OF ELECTRICAL RESISTIVITY IN THE VADOSE ZONE

Knowledge of water processes in the vadose zone is an important issue. The geophysical device SMD daily measures the resistivity on 21 levels from the surface up to 3.10 m. After one year of monitoring, the results make it possible to draw up a positive assessment of the quality of the collected data and suggest an ability to detect water transfers between the different layers of the subsoil.*

Key words: monitoring, electrical resistivity, vadose zone, soil

.1 INTRODUCTION

Le dérèglement climatique en cours modifie le régime de précipitation et de températures, modifiant la répartition des apports hydriques au cours des saisons culturales. Pour permettre aux agriculteurs d'optimiser leurs irrigations, il est primordial de caractériser les processus hydriques dans les sols agricoles. Dans ce contexte, nous conduisons des travaux de caractérisation des échanges hydriques dans les sols (c'est-à-dire dans la zone prospectée par les racines), et à l'interface sols/sous-sols ; nous cherchons en particulier à identifier et à caractériser d'éventuels processus ascendants de remontées capillaires. Pour cela, nous nous sommes dotés d'un système de mesure en forage permettant de mesurer plusieurs fois par jour, la résistivité électrique sur 21 niveaux jusqu'à 3.1 m. L'objectif de cette communication est de présenter le dispositif et de discuter des données acquises au terme d'une période d'un an de mesures.

*(brevet imaGeau© 2014) /imaGeau patent © 2014)

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Site d'étude

Le site d'étude se trouve sur la commune de Villamblain (Loiret) dans la région de la Beauce, en bordure d'une parcelle agricole de grandes cultures irriguée.

Le sous-sol est composé d'un CALCOSOL limono-argileux d'une profondeur oscillant entre 80 et 115 cm, reposant sur des couches successives de calcaires de Beauce plus ou moins durs.

L'état initial du terrain a été caractérisé la veille de l'installation du dispositif en forage par un profil de tomographie électrique en 2D (cf. Fig.1) en complément de descriptions pédologiques issues de sondages à la tarière.

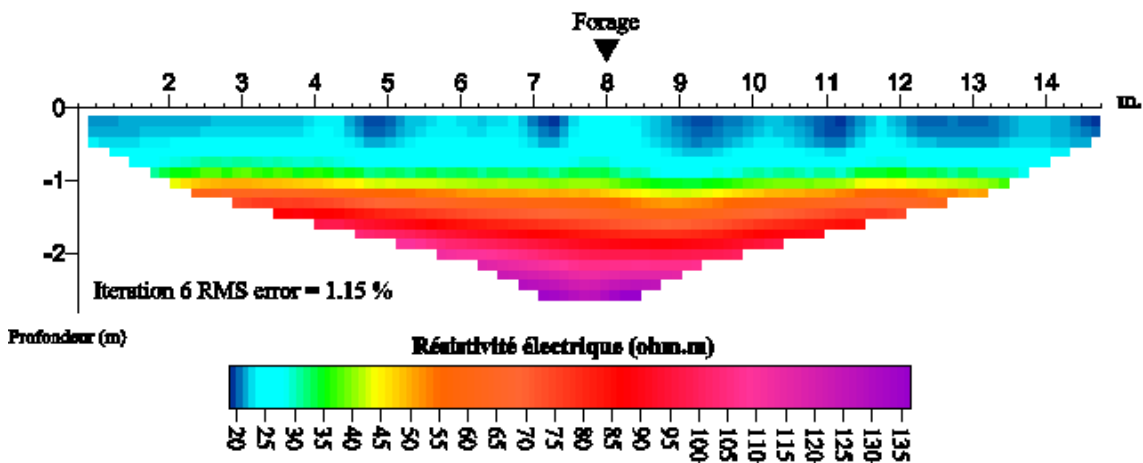


Fig. 1 – Inversion du profil de tomographie électrique 2D réalisé à l'aplomb du forage, la veille de l'installation (wenner alpha, $a=50$ cm)

Le site d'étude est équipé d'une station météorologique, de réflectomètres de teneur en eau, et de sondes de mesure de la température du sol pour le suivi local des différents paramètres pédo-climatiques.

2.2. Le dispositif géophysique en forage : le SMD

Le Subsurface Monitoring Device (SMD) est un équipement géophysique basé sur la méthode électrique développé et commercialisé par la société imaGeau (Bellot et al., 2014). Ce dispositif autonome permet de piloter automatiquement plusieurs acquisitions de profils verticaux de résistivité par jour. Le SMD est constitué d'une ligne de 24 électrodes annulaires espacées de 10 cm ou 20 cm serties le long d'un tube PVC déployée en forage et d'un système d'acquisition autonome en surface permettant de réaliser des mesures de résistivité sur 21 niveaux. Des capteurs de température sont également disposés sur 7 niveaux le long du tube permettant de contrôler les effets de la température sur la mesure de la résistivité électrique. Pour assurer un contact électrique entre le sol et les électrodes, un coulis de bentonite a été inséré (par gravité) autour du tube dans un espace annulaire de 1.5 cm, au moment de l'installation du dispositif. L'influence

de la présence de bentonite sur la mesure de résistivité du sol a été calculée et est considéré comme négligeable (< 1.5%).

.3 RESULTATS

.3.1. Qualité des données mesurées

Sur la période avril 2017 à septembre 2018, il y a eu des mesures 85% du temps. Huit pourcent des données mesurées ont été écartées soit parce que le signal est trop bruité soit parce qu'il a été impossible d'injecter un courant électrique sur le quadripôle interrogé pour différentes raisons (mauvais contact électrique électrode/sol, déficience de l'alimentation électrique par panneaux solaires). Des variabilités fortes et des mesures incohérentes ont été détectées sur les mesures de surface (inférieure à 1 m) laissant supposer des problèmes de contact entre le sol et les électrodes. Les mesures réalisées par les capteurs de températures sont en accord avec les mesures réalisées par les sondes complémentaires installées sur site et mettent en évidence qu'au-delà d'1.5m les températures du sous-sol sont stables.

.3.2. Comparaison des mesures du SMD et de la tomographie

La comparaison des mesures de résistivité réalisées par le SMD et la tomographie montre que les 2 dispositifs détectent une augmentation de la résistivité avec la profondeur, ce qui est cohérent avec la connaissance que nous avons du sous-sol (sol limono-argileux sur couches de calcaires). En revanche, les résistivités des couches profondes mesurées par le SMD ont des valeurs comprises entre 30 et 70 ohm.m (cf. fig. 2) alors que les résistivités inversées issues de la tomographie (sans connaissance a priori du sous-sol) mettaient en évidence des résistivités comprises entre 70 et 135 ohm.m (cf. fig.1). En outre, les mesures réalisées par le SMD permettent d'avoir une résolution fine des mesures profondes, mettant en évidence des couches d'épaisseurs centimétriques que la tomographie ne permet pas de voir.

.3.3. Analyse des chroniques temporelles : premières observations

Les résistivités mesurées sur toute la période d'acquisition (mai 2017-septembre 2018 avec des acquisitions pluriquotidiennes) pour les niveaux supérieurs à 1.5 m sont présentées figure 2 (sans correction de l'effet de la température). Les résistivités mesurées dans les couches supérieures à 2.30 m présentent plus de variabilité haute fréquence que les mesures dans les couches sus-jacentes, probablement en lien avec la nature des matériaux. Les périodes plus sèches (automne 2017 et été 2018) sont marquées par des augmentations globales des résistivités y compris dans les couches les plus profondes. On observe toutefois pendant ces périodes des niveaux où les résistivités diminuent, intercalées entre des niveaux où les résistivités augmentent suggérant des mouvements hydriques ascendant ou descendants.

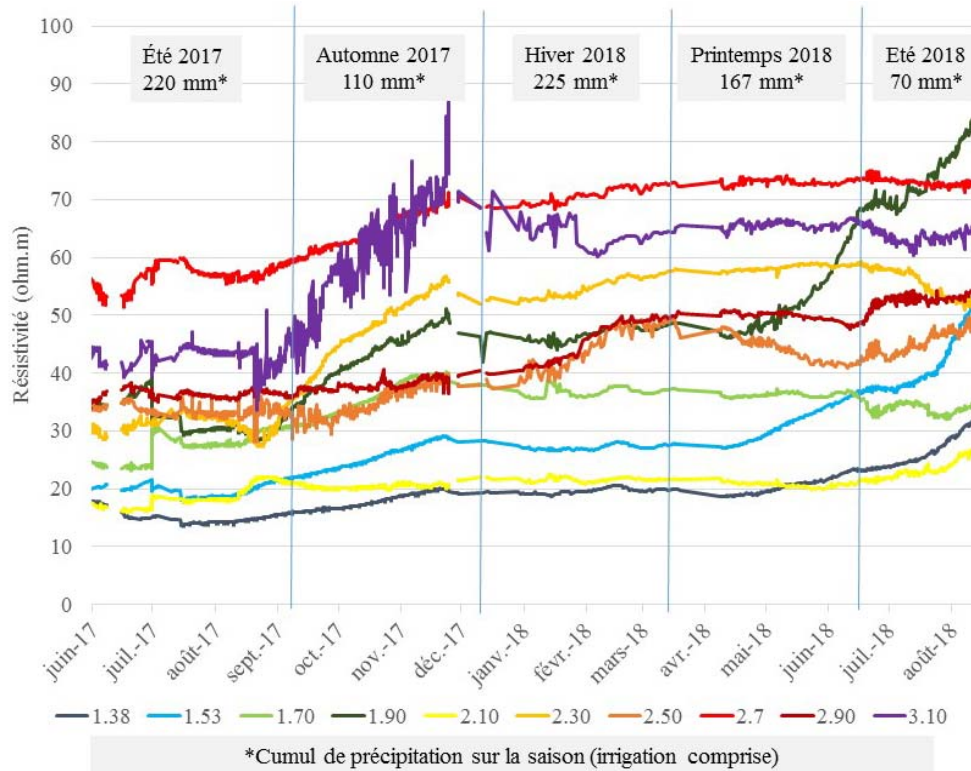


Fig. 2 – Chronique temporelle des résistivités mesurées à plus de 1.5 m durant la période juin 2017 – septembre 2018

.4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le bilan sur les mesures réalisées dans la zone non saturée depuis avril 2017 par le dispositif géophysique SMD nous permet déjà d'être optimiste quant à la qualité des données mesurées, tout en ayant un regard critique en particulier sur les mesures de surface qui présentent des problèmes de contact sol/électrode. La comparaison des résistivités à la connaissance du milieu nous a permis de valider la cohérence avec la nature du sous-sol. Le dispositif nous permet d'acquérir une résolution en profondeur qui ne serait pas accessible par un dispositif géophysique de surface. L'analyse temporelle suggère des échanges hydriques entre les différents niveaux en profondeur. Cette hypothèse devra être validée par une comparaison aux données complémentaires sur une période d'observation plus longue ainsi que par une confrontation aux données qui seront recueillies sur un observatoire longue durée de la ZNS en cours d'installation sur le site d'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELLOT J.P., NEYENS D., JAUZEIN V., NAULEAU F., 2014 – A new downhole, real time and near field hydrogeophysical observatory of groundwater quality: salt water intrusion and treated wastewater infiltration. Colloque *Geofcan*, 2004.

CARACTERISATION D'UN ETABLISSEMENT ANTIQUE EN BASALTE EN GRANDE LIMAGNE – EVALUATION DE L'APPORT DE LA METHODE D'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE (EMI)

**SIMON F.-X.¹, GUILLEMOTEAU J.², DOUSTEYSSIER B.³, DACKO M.³,
HULIN G.⁴**

¹ Inrap, Chrono-Environnement UMR 6249, 9 rue Lavoisier, 25000 Besançon, francois-xavier.simon@inrap.fr

² Institute of Earth and Environmental Science, Université de Potsdam, Allemagne, julien@geo.uni-potsdam.de

³ Maison des Sciences de l'Homme (USR 3550), 4 rue Ledru, 63057 Clermont-Ferrand, bertrand.dousteysier@uca.fr, marion.dacko@uca.fr

⁴ Inrap, Métis UMR 7619, 121 rue d'Alésia, 75014 Paris, guillaume.hulin@inrap.fr

RÉSUMÉ

La caractérisation de structures archéologiques en contexte volcanique et plus spécifiquement lorsqu'elles sont constituées de matériaux basaltiques présente des particularités qui limitent l'emploi de certaines méthodes couramment utilisées. A travers une étude de cas dans la région clermontoise, ce travail propose de mettre en évidence l'intérêt des méthodes électromagnétiques basse fréquence sur ce type de vestiges et dans ce type de contexte tout en dressant au préalable les limites des autres techniques d'investigation. Dans un second temps, seront exposés les enjeux mais également les limites et difficultés de la méthode EMI pour la caractérisation des vestiges archéologiques notamment par le biais de la susceptibilité magnétique.

Mots clés : archéologie, basalte, EMI, susceptibilité magnétique, conductivité électrique.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF ANTIQUE BASALT BUILDINGS IN GRANDE LIMAGNE WITH EMI METHOD

Characterization of archaeological features in basaltic media or features in basalt shows particularities limiting the use of several technics commonly used in archaeology. Nevertheless, other technics could take advantage of these specificities. Through a particular case study in the area of Clermont-Ferrand (France), this work try to highlight some advantages of EMI technics compared to other technics that fail in the detection and characterization of such features. Secondly, main stakes but also limits, and difficulties of EMI technics will be discussed for the characterization of archaeological features especially through the measurement of magnetic susceptibility.

Key words: archaeology, basalt rock, EMI, electrical conductivity, magnetic susceptibility.

.1 INTRODUCTION

Le projet ArchEM, piloté par l'Inrap, s'intéresse au potentiel qu'offrent les méthodes électromagnétiques basse fréquence pour l'archéologie préventive. Ce projet s'articule autour de quatre volets, 1 : la caractérisation des horizons pédologiques dans le cadre des études sur la préhistoire ancienne, 2 : l'identification d'entités géomorphologiques qui ont pu guider l'installation des sociétés anciennes sur leur territoire, 3 :

l'identification d'activités et de structures archéologiques sur surface décapée et 4 : la caractérisation de vestiges archéologiques dans les milieux volcaniques. La présente étude s'intéresse à ce dernier volet. Durant le mois de novembre 2017, une équipe de l'Inrap et de l'Université de Postdam ont cherché à caractériser plusieurs sites archéologiques composés en partie de basalte dans la région clermontoise, dont le site de Saint-Beauzire « Chez Legay » (Puy-de-Dôme). Les résultats présentés ici illustrent dans un premier temps pourquoi il est intéressant d'utiliser la méthode électromagnétique au regard des autres techniques de prospection (Guillemoteau *et al.* 2016, Simon *et al.* 2017) et, dans un deuxième temps, comment peut-on interpréter le signal et en quoi les résultats obtenus sont représentatifs de l'information.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Site d'étude

Le site de Saint-Beauzire est localisé à 11 km au nord-est de Clermont-Ferrand dans le Grand Marais de Limagne. Détecté au cours de prospections pédestres et aériennes, il est constitué de plusieurs bâtiments rectangulaires construits en basalte et plus ou moins visibles sur les clichés aériens. La datation de cet établissement repose sur le mobilier ramassé en surface et renvoie aux quatre premiers siècles de notre ère. La profondeur et la puissance stratigraphique des vestiges ne sont pas connues dans la mesure où le site n'a fait l'objet d'aucune fouille archéologique. Seule la présence de blocs de basalte taillés repérés en surface du terrain atteste l'emploi de basalte comme matériau de construction.

2.2. Instrumentation mise en œuvre

Dans un premier temps, une prospection magnétique a été réalisée sur l'ensemble de la parcelle afin de déterminer les secteurs les plus intéressants à cartographier avec les autres méthodes de prospection. Celle-ci a été réalisée avec un système MXPDA de Sensys. Celui-ci permet de mesurer la différence verticale de la composante en z du champ magnétique terrestre. Les données ont été géoréférencées à l'aide d'un GPS différentiel avec une précision centimétrique.

Sur la base de ces premiers résultats, une prospection électromagnétique a été conduite sur les bâtiments reconnus en prospection aérienne et au cours de la prospection magnétique. Deux appareils ont été mis en œuvre. Une première cartographie a été réalisée avec le GEM2 (Geophex), un appareil EMI multi-fréquentiel. Il possède une configuration de bobines atypique (une bobine d'émission et deux bobines de réception dont la plus proche joue le rôle de *bucking coil*). L'acquisition a été réalisée à trois fréquences distinctes (5, 17 et 60 kHz) en mode continu. Ce système permet l'obtention d'une carte de conductivité électrique apparente mais également de susceptibilité magnétique apparente. Le positionnement a été effectué avec un GPS différentiel afin de s'assurer d'un calage précis des points de mesure. Le système est porté à la main.

En parallèle, le DualEM 21S (DualEM) a été mis en œuvre sur le même secteur. Ce système est composé d'une bobine d'émission et de quatre bobines de réception à 1 et 2 m de distance en mode HCP et 1,1 et 2,1 m en mode PERP. Il permet donc de mesurer simultanément les conductivités et susceptibilités apparentes relatives à quatre volumes/profondeurs différentes. Le système est positionné sur un chariot aimantique et non conducteur, ce qui permet une bonne stabilité de l'appareil. Le positionnement a été effectué avec une station totale robotisée.

Un test radar a également été effectué, mais celui-ci a été gêné par des conditions d'acquisition difficiles liées à l'état de surface (sol hersé). Enfin, un panneau électrique a été réalisé afin de renseigner les valeurs de résistivité du terrain et vérifier la sensibilité de la méthode électrique.

3 RESULTATS

3.1. Difficultés d'interprétation des méthodes standards

La carte d'anomalie magnétique montre très clairement les difficultés qui peuvent être rencontrées sur des structures fortement magnétiques. La technique est bien adaptée à la détection des vestiges puisque l'aimantation de la roche est très forte (notamment l'aimantation rémanente). Néanmoins, la forme de l'anomalie n'est que peu représentative de la géométrie de l'objet recherché. L'identification des structures archéologiques est donc difficile sur ces terrains.

La méthode radar est ici inopérante, du fait du sol relativement conducteur. Si l'utilisation de la méthode radar reste une option pertinente dans de nombreux secteurs (notamment sur le piémont ou les plateaux basaltiques), sa mise en œuvre reste très dépendante du contexte local. La méthode électrique a, quant à elle, permis de révéler les structures résistantes. Toutefois cette méthode nécessite des temps d'acquisition assez longs.

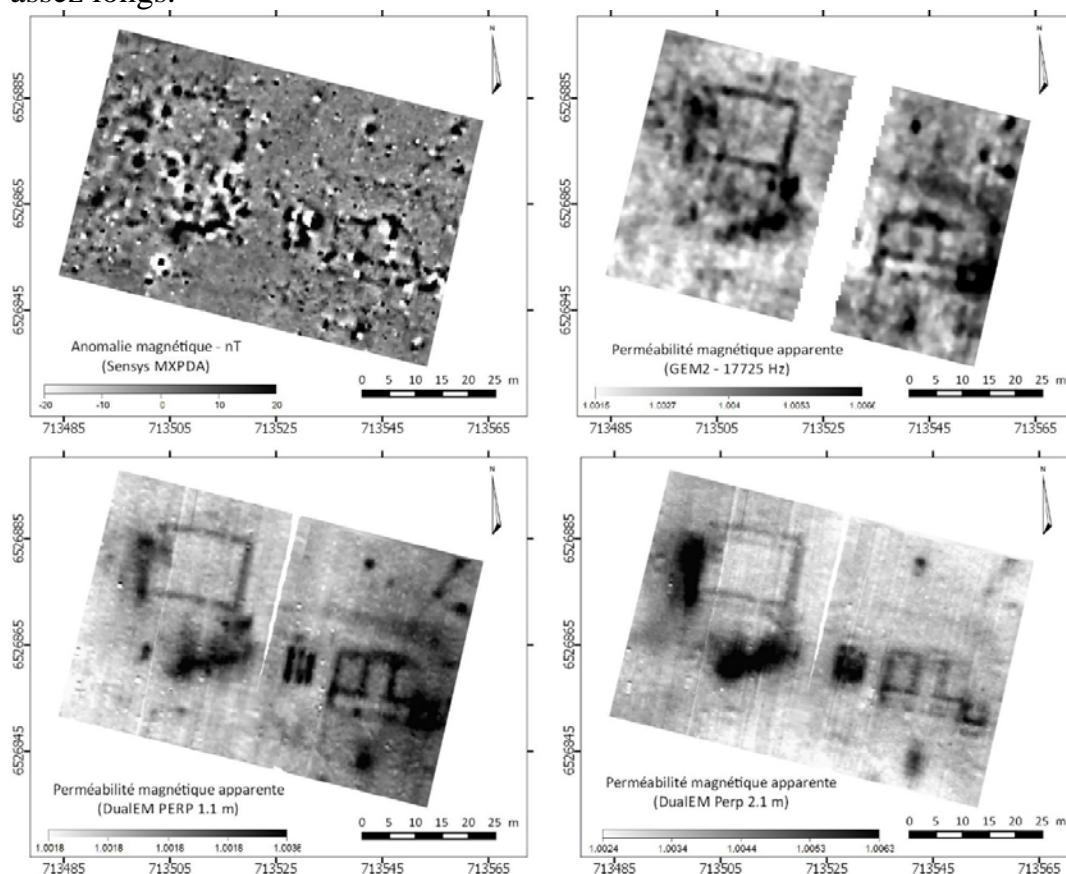


Fig. 1 : Carte des anomalies magnétiques et de la perméabilité magnétique apparente (GEM2 et DUALEM PERP 1.1 et PERP 2.1)

3.2. Apports des méthodes électromagnétiques basse fréquence

La conductivité électrique nous renseigne ici sur les variations sédimentaires globales. Aucun vestige n'est clairement visible sur les cartes de conductivité quel que soit l'appareil mis en œuvre, la fréquence de mesure utilisée ou la configuration/écartement

des bobines. Cela peut s'expliquer par le manque de sensibilité des appareils EM à des variations localisées de résistivité et à un terrain relativement conducteur.

La carte de susceptibilité magnétique fournit des informations nettement plus intéressantes d'un point de vue archéologique. On peut y repérer les vestiges détectés par la prospection aérienne avec un niveau de détail fin et dépendant des configurations utilisées. On peut également observer des différences significatives entre les configurations qui s'expliquent par des sensibilités variables selon les différentes géométries (Klose *et al.* 2018). Nous discuterons également les valeurs enregistrées en ppm et leur transformation en susceptibilité magnétique ainsi que des problèmes rencontrés (transformation du signal, étalonnage des appareils, existence théorique de valeurs négatives en susceptibilité apparente).

.4 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent très clairement l'intérêt des méthodes électromagnétiques basse fréquence pour la caractérisation de vestiges en basalte, notamment par le traitement du signal en phase. Il est dès lors possible de discriminer les vestiges archéologiques là où les autres méthodes, notamment la méthode magnétique, peinent à livrer des informations pertinentes. Ces avantages s'accompagnent néanmoins de difficultés. L'appareil utilisé, caractérisé par sa géométrie, son écartement inter-bobine et sa fréquence sera plus ou moins adapté à la détection des structures recherchées en fonction de leur profondeur d'enfouissement. Il en résulte que les trois configurations de bobines utilisées conduisent à des résultats sensiblement différents. Nous avons également pu observer qu'un maillage fin (50 cm maximum) est nécessaire à une bonne caractérisation des vestiges, ce qui est en accord avec les caractéristiques géométriques des fonctions de sensibilité établies pour les configurations utilisées (voir Klose *et al.* 2018). Enfin les appareils EMI, qui peuvent présenter des instabilités mécaniques, restent difficiles à calibrer et ce malgré les procédures proposées récemment (Thiesson *et al.* 2014). Cette observation est d'autant plus vraie pour les mesures en phase, car ces appareils sont avant tout conçus pour la mesure de la conductivité électrique. Malgré ces difficultés la méthode électromagnétique se doit d'être employée plus souvent en contexte volcanique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GUILLEMOTEAU J., SIMON F.-X., LUCK E., TRONICKE J., 2016 – 1D sequential inversion of portable multi-configuration electromagnetic induction data. *Near Surface Geophysics*, 14, 411-420.

KLOSE T., GUILLEMOTEAU J., SIMON F.X., TRONICKE J., 2018 – Toward subsurface magnetic permeability imaging with electromagnetic induction sensors: sensitivity computation and reconstruction of measured data, *Geophysics*, 83, E335-E345.

SIMON F.-X., TABBAGH A., DOUSTEYSSIER B., PAREILH-PEYROU M., MAYORAL A., LABAZUY P., 2017 – Potential of multi-frequency electromagnetic induction in volcanic soils for archaeological prospection, International Conference of Archaeological Prospection, Bradford 2017, 233-234.

THIESSON J., KESSOURI P., SCHAMPER C, TABBAGH A., 2014 – Calibration of frequency-domain electromagnetic devices used in near-surface surveying, *Near Surface Geophysics*, 12,4, 481-491.

METHODE DU POTENTIEL SPONTANE POUR LA DETECTION DE FUITES DANS LES DIGUES

SOUEID AHMED A.¹, REVIL A.¹, STECK B.², VERGNIAULT C.³

¹ Université Savoie Mont Blanc, CNRS, ISTerre, 73000 Chambéry, France, abdellahi.soueid-ahmed@univ-smb.fr, andre.revil@univ-smb.fr

² EDF R&D, 6 Quai Watier, 78400 Chatou, France, barthelemy.steck@edf.fr

³ EDF DI-TEGG, 905 Avenue du camp de menthe, 13097 Aix-en-Provence, France, christophe.vergniault@edf.fr

RÉSUMÉ

La méthode du potentiel spontané est de par sa facilité de mise en œuvre et sa sensibilité aux écoulements d'eau, une méthode qui à première vue est avantageuse et prometteuse pour l'auscultation digues, l'identification et le suivi des zones de fuite dans les barrages hydrauliques. Ces fuites peuvent constituer un réel danger sur l'intégrité de la structure des barrages et des digues en activant un phénomène d'érosion interne, fortement préjudiciable aux ouvrages en remblai car il constitue une des principales sources d'incidents sur ces ouvrages hydrauliques. La méthode du potentiel spontané permet de localiser ces fuites à travers leurs signatures électriques. Cependant, ce type de signal géophysique dépend de plusieurs facteurs tels que la conductivité électrique du milieu, la salinité du fluide, et la nature du régime d'écoulement (visqueux laminaire versus inertiel laminaire). De plus, la présence d'installations anthropiques peut biaiser la qualité du signal. Tous ces facteurs doivent être pris en compte afin de pouvoir interpréter correctement les distributions de potentiel électrique acquises lors d'une campagne de mesures de potentiel spontané. Nous avons développé un outil numérique dédié à la simulation des signatures de potentiel spontané générées par les écoulements d'eau dans les digues. Nous utilisons cet outil pour réaliser une analyse de sensibilité sur les paramètres géotechniques d'une digue expérimentale afin de mieux interpréter les signaux de potentiel spontané mesurés sur celle-ci et de définir la sensibilité de la méthode du potentiel spontané.

Mots clés : potentiel spontané, modélisation numérique, nombre de Reynolds.

ABSTRACT

SELF-POTENTIAL METHOD FOR LEAKS DETECTION IN EARTH DAMS

Due to its simplicity and high sensitivity to groundwater flow, the self-potential method is particularly appealing for leak detection in embankments and earth dams. Seepage flows may represent a serious threat to the integrity of the embankment or dam structure and their localization is therefore an important task. The self-potential method can be employed on dams to detect the presence of leaks and monitor their evolution through their electrical signatures. That said, the self-potential signal depends on several factors, such as the electrical conductivity of the medium, the salinity of the fluid, and the nature of the flow

regime. In addition, the presence of anthropic facilities may bias the signal. Therefore, any reliable self-potential data interpretation will need to properly take into account these factors. We implemented a numerical tool for simulating the self-potential signatures generated by water flow in dams. We use this tool to perform a sensitivity analysis, which aims to better understand this type of non-intrusive signature of groundwater flow.

Key words: *self-potential, numerical modelling, Reynolds number.*

.1 INTRODUCTION

Les fuites peuvent constituer un réel danger sur l'intégrité des barrages et des digues en remblai, en activant un phénomène d'érosion interne, fortement préjudiciable, car il constitue une des principales sources d'incidents sur ces ouvrages hydrauliques (CFBR, 1997). La facilité de mise en œuvre de la méthode du Potentiel Spontané (PS) et sa sensibilité aux écoulements souterrains la rendent très attractive pour la détection et le suivi des fuites dans les digues et barrages hydrauliques (PANTHULU et al. (2001); SHEFFER et OLDENBURG, 2007; BOLEVE et al. (2007), SOUEID AHMED et al. (2013)). D'un point de vue pratique, il est assez simple de réaliser une campagne de mesures PS, car il suffit de disposer d'électrodes impolarisables (e.g., PETIAU, 1980) et de les connecter à un voltmètre. Une digue expérimentale, a été conçue conjointement par EDF et le CER de Rouen et réalisée par le CER dans le cadre du projet de R&D SurHycate. Sur cette maquette, un monitoring PS avec 16 électrodes en crête confirme qu'un bruit environnemental important est présent. Ce bruit rend impossible la détection du moindre signal PS en lien avec l'écoulement dans les fuites. Afin de définir les modifications à apporter à la maquette pour rendre le signal détectable, une modélisation numérique de cet ouvrage a été mise en œuvre. Une multitude de scénarios de modélisation ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la digue expérimentale et de montrer ainsi l'intérêt qui devrait être porté à la modélisation numérique dans le suivi et la maintenance des ouvrages hydrauliques.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Digue expérimentale

Une digue expérimentale a été réalisée par EDF en collaboration avec le CEREMA. Les dimensions de la digue sont de 3 m de hauteur, 22 m de long et 14 m de large. Un voile de béton fibré synthétique d'une épaisseur de 15 cm d'épaisseur est posé sur le talus de la digue afin de le rendre étanche. La digue est connectée à un bassin d'eau qui est fermé par des murs en béton préfabriqués. Trois conduits traversent l'encaissant de la digue. Ces conduits qui sont connectés au bassin sont utilisés pour simuler la présence de zones d'infiltration qui constituent des chemins préférentiels pour les écoulements de l'eau du réservoir à travers la structure de la digue. Ces chemins préférentiels sont créés en rendant les conduits beaucoup plus perméables que l'encaissant. Ainsi, ces conduits sont remplis de gravier de 4-6 mm. Deux de ces conduits sont

cylindriques de diamètre 10 cm et le troisième conduit est parallélépipédique de base. La géométrie de la digue est représentée sur la **Fig. 1a**.

2.2. Modèle numérique

Le modèle numérique est implémenté sous Comsol Multiphysics, il effectue le couplage entre l'équation de Richards et celle du potentiel électrique. Ce couplage est nécessaire étant donné que les signaux PS sur lesquels nous travaillons sont d'origine électrocinétique. Nos calculs ont montré que la valeur du nombre de Reynolds dans les conduits avoisinait 2.6, ce qui suggère que nous sommes en régime inertiel, ce qui aurait pour effet de diminuer les amplitudes des anomalies PS au niveau de la zone de fuite (**Fig. 1b**). La modélisation numérique a permis de valider un scénario dans lequel un sac de sable placé autour de la zone de fuite permet de réduire la valeur du nombre de Reynolds et de planter les électrodes dans une zone de meilleure sensibilité afin de mesurer des anomalies PS de plus grande amplitude (**Fig. 1c**).

La **Fig. 1c** montre que l'amplitude de l'anomalie de potentiel spontané mesurée sur la digue est maximale au niveau de la zone de fuite.

Cette expérience numérique a permis de valider le scénario selon lequel, placer un tas de sable au niveau de l'entrée des conduits permettrait de réduire le nombre de Reynolds et ainsi de renforcer le signal PS mesuré. En effet, cette modification une fois apportée à la digue a permis d'améliorer la qualité des données et de mesurer ainsi une anomalie PS avoisinant les -8 mV alors que celle-ci était en deçà de la sensibilité de l'appareil de mesure.

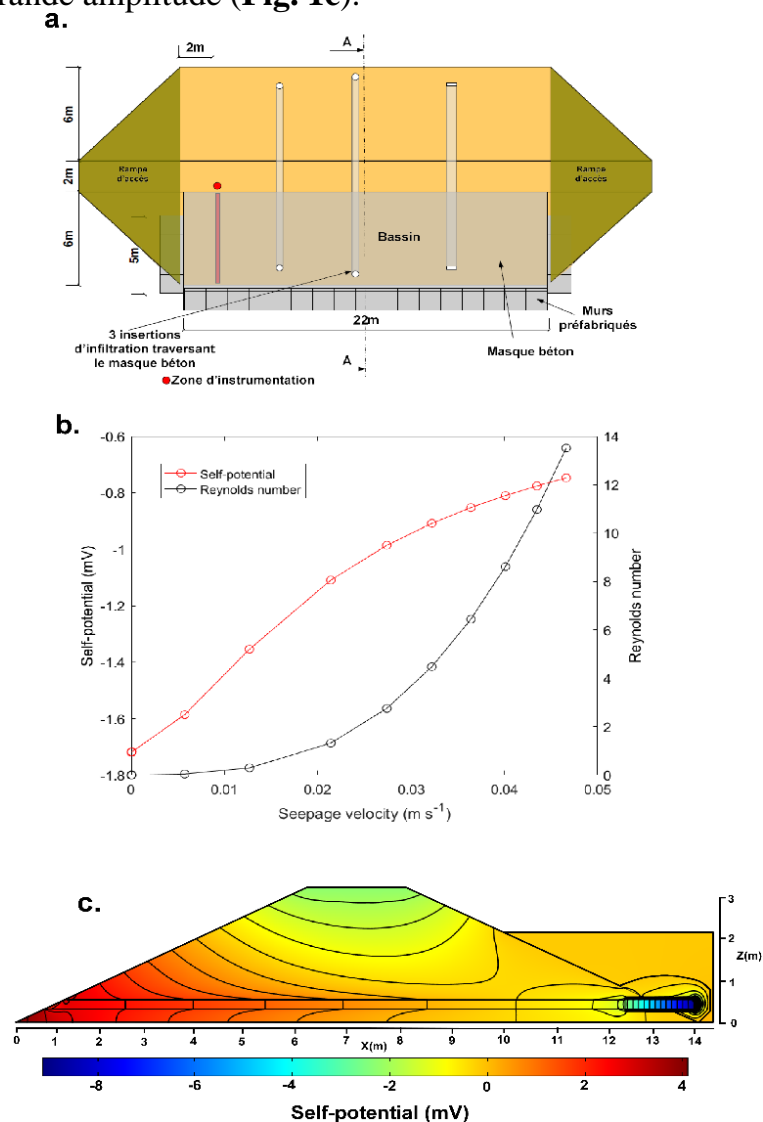


Fig. 1. - Géométrie de la digue et simulations. a. Vue XY de la digue expérimentale. **b.** Evolution du signal de PS avec la vitesse d'écoulement au

niveau de la fuite. **c.** Distribution de PS sur un plan vertical traversant le conduit central.

.3 Conclusion

Nous avons développé un modèle numérique de modélisation des signaux PS mesurés sur les digues. Ce modèle fut initialement mis en place afin de comprendre le fonctionnement d'une digue expérimentale construite pour tester diverses expérimentations géophysiques. Au début de l'expérience, il était impossible de détecter le moindre signal PS en lien avec l'écoulement dans la digue. Une étude de sensibilité effectuée grâce au modèle numérique a permis d'expliquer la faiblesse du signal mesuré, notamment par les hautes valeurs du nombre de Reynolds. A la lumière de ces simulations, une modification de la digue fut proposée afin de disposer d'une configuration de la digue qui permet de réduire les valeurs du nombre de Reynolds et de déterminer la sensibilité des mesures PS aux fuites contrôlées de la digue. A ce jour, l'outil de modélisation numérique couplée hydraulique – électrique est validé par comparaison avec les mesures sur un modèle analogique (maquette de digue). Il apparaît maintenant nécessaire d'utiliser ce nouvel outil, afin de confirmer la sensibilité de la méthode dans un contexte donné, préalablement aux mesures sur le terrain, afin de définir le domaine d'application, car l'anomalie PS liée à un écoulement est fonction de la vitesse de celui-ci, des matériaux constituant la digue, de la résistivité électrique du milieu et du bruit électromagnétique dans l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bolève, A., Crespy, A., Revil, A., Janod, F., Mattiuzzo, J. L., 2007** – Streaming potentials of granular media: Influence of the Dukhin and Reynolds numbers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8).
- CFGB (Comité Français des Grands Barrages), 1997** – Internal erosion: typology, detection, repair. *Comité Français des Grands Barrages*. 126 pages.
- Petiau, G., 2000** – Second generation of lead-lead chloride electrodes for geophysical applications, *Pure Appl. Geophys.*, 3, 357–382.
- Sheffer, M. R., Oldenburg, D. W., 2007** – Three-dimensional modelling of streaming potential. *Geophysical Journal International*, 169(3), 839-848.
- Soueid Ahmed, A., Jardani, A., Revil, A., Dupont, J. P., 2013** – SP2DINV: A 2D forward and inverse code for streaming potential problems. *Computers & Geosciences*, 59, 9-16.

CARACTERISATION DE LA DISPERSION DES BULLES D’AIR AU SEIN DE MODULES MEMBRANAIRES DE TRAITEMENT DES EAUX A L’AIDE DE LA TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

SUARD E.¹, CLEMENT R.², FAYOLLE Y.¹, ALLIET M.^{3,4}, ALBASI C.^{3,4}, GILLOT S.²

¹ Irstea, UR HBAN, F-92761 Antony Cedex, France, yannick.fayolle@irstea.fr

² Irstea, UR REVERSAAL, F-69616 Villeurbanne Cedex, France

³ Université de Toulouse, INPT, UPS, LGC, F-31030 Toulouse, France

⁴ CNRS, Laboratoire de Génie Chimique, UMR 5503, F-31030 Toulouse, France

RÉSUMÉ

La tomographie de résistivité électrique est adaptée et mise en œuvre pour la caractérisation de la distribution de gaz dans un pilote semi-industriel de filtration membranaire. La méthodologie développée, en s'appuyant sur une étude numérique, a permis de mettre en évidence l'impact du débit d'air et de la concentration en matière en suspension sur cette distribution au sein des modules de filtration.

Mots clés : *Traitement des eaux, bioréacteurs à membranes, tomographie de résistivité électrique, aération*

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF GAS DISPERSION INTO MEMBRANE MODULES FOR WASTEWATER TREATMENT USING ELECTRICAL RESISTANCE TOMOGRAPHY

Electrical resistance tomography is adapted and applied to characterize gas dispersion in a semi-industrial pilot for membrane filtration. The developed methodology, based on numerical investigation, allows to study the impact of insufflated air flow rate and mixed liquor concentration on gas dispersion into filtration modules.

Key words: *Wastewater treatment, membrane bioreactors, electrical resistance tomography, aeration.*

.1 INTRODUCTION

Les bioréacteurs à membranes (BAMs) sont des procédés de traitement des eaux résiduaires comprenant un traitement biologique et une filtration membranaire, permettant la séparation des boues biologiques et de l'eau traitée. Cependant, leur gestion et leur optimisation sont confrontées à la problématique du colmatage des membranes de filtration. Afin de maintenir leurs capacités de filtration au cours du temps, l'aération de ces membranes à l'aide d'injection

d'air sous forme de grosses bulles est réalisée. Cependant, les mécanismes d'impact de cette aération sur les membranes sont encore peu étudiés à des échelles représentatives de l'échelle industrielle, et leur étude s'avère essentielle à leur optimisation (BUETEHORN *et al.*, 2012).

Les méthodes de caractérisation utilisées à l'échelle du laboratoire sont difficilement applicables du fait des contraintes liées au milieu (présence de boues activées notamment). Aussi, cette étude propose d'adapter les outils de tomographie de résistivité électrique (ERT), en s'appuyant sur une étude numérique, à la mesure de la distribution de l'air au sein de modules de filtration dans un pilote semi-industriel de filtration membranaire. L'impact des conditions opératoires sur la dispersion du gaz au sein des modules de filtration est présenté dans un second temps.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Pilote semi-industriel de filtration membranaire

Un réacteur semi-industriel en PVC ($V_{\text{liquide}} = 2,0 \text{ m}^3$, $L \times l \times h_{\text{liquide}} = 1,23 \times 0,70 \times 2,40$) est équipé de trois modules membranaires fibres creuses (KMS Puron). Le réacteur est alimenté en continu avec les boues activées prélevées dans une unité industrielle de traitement des eaux. 4 conditions opératoires différentes relatives à l'aération sont appliquées (C1 à C3 = 3 modules aérés / Débit d'air par module respectif de 9.9, 13.9 et 18.0 $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ / C4 = 2 modules aérés / Débit d'air par module aéré de 18.0 $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$). Les mesures ont également été réalisées pour différentes concentrations en matières en suspension (MES = 0/3/6/10 mg L^{-1}).

2.2. Application de la tomographie de résistivité électrique

Pour la réalisation des mesures sur le pilote semi-industriel, un ensemble de 72 électrodes en inox a été réparti sur 3 sections à des distances de 0,42 m, 1,17 m et 1,92 m du fond du pilote. Ces électrodes ont été connectées à un résistimètre multi-canal Syscal Pro (IRIS Instrument, Orléans, France), permettant de sélectionner automatiquement les quadripôles autour du réacteur. L'injection du courant est réalisée sur une durée de 250 ms (soit une durée de mesure de 40s environ basée sur 300 quadripôles).

La mise en œuvre expérimentale s'est appuyée sur une étude numérique afin de valider le nombre d'électrodes, les séquences de quadripôles et les paramètres d'inversion à appliquer (Figure 1). Cette étude numérique a été réalisée à partir de 13 modèles de résistivité définis afin de correspondre à des cas potentiellement observables expérimentalement en termes d'intensité et d'hétérogénéité. Pour chacun de ces modèles de résistivité, la modélisation des distributions de champs électriques a été réalisée sous COMSOL pour différentes séquences de quadripôles en cherchant à minimiser leur nombre. L'étape d'inversion des champs de résistivité apparente a été réalisée à l'aide du logiciel BERT.

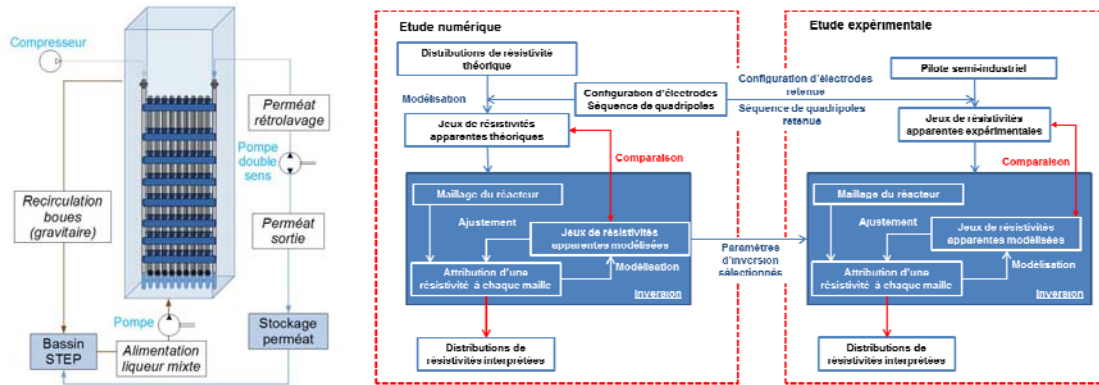


Fig. 1 – Schéma du pilote (gauche) et démarche appliquée dans le cadre de l'étude (droite)

3 RESULTATS

3.1. Etude numérique pour la validation de la méthodologie

Les champs de résistivités interprétées reproduisent de façon satisfaisante les champs de résistivités théoriques en terme de position et d'intensité lorsque les augmentations de résistivité sont les plus importantes. De plus, des augmentations de résistivité sont observées sur les contours des zones délimitées théoriques, indiquant que la méthode employée induit une légère diffusion de l'information, plus marquée dans les zones éloignées des électrodes (Figure 2).

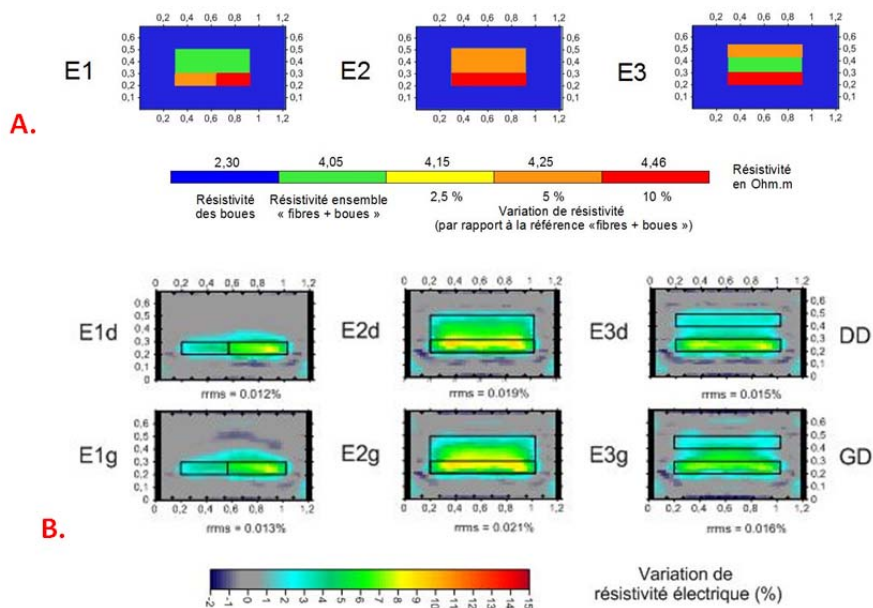


Fig. 2 – A. Exemple de distributions théoriques considérées lors de l'étude numérique / B. Variations de résistivité par rapports aux distributions théoriques pour les deux séquences de quadripôles testées (Dipole-Dipole et Gradient-Dipole)

Cette étude numérique a permis de sélectionner la séquence de mesure retenue (Dipole-Dipole) pour la mise en œuvre expérimentale ainsi que de définir un jeu

de paramètres adéquat pour l'inversion des jeux de résistivités apparentes ($\lambda = 5 / Z\text{-weight} = 0,01 / \text{Blocky} = 0$).

3.2. Caractérisation de la dispersion du gaz au sein de pour différentes conditions opératoires

Les résultats obtenus permettent de visualiser la distribution du gaz au sein des réseaux de fibres pour différentes conditions opératoires. En eau claire, la distribution du gaz est homogène sur l'ensemble des modules de filtration. De plus, une augmentation du débit d'air se traduit par une augmentation de la résistivité électrique et donc de la quantité d'air au sein de la zone centrale. En présence de boues activées, et ce dès une concentration en MES de 3 g L^{-1} , des hétérogénéités sont observées au niveau des augmentations de résistivité au sein des zones occupées par les modules membranaires (Figure 3). Pour un débit d'air donné, des hétérogénéités sont de plus en plus marquées en lien avec une augmentation de la concentration en MES et la viscosité apparente des boues biologiques.

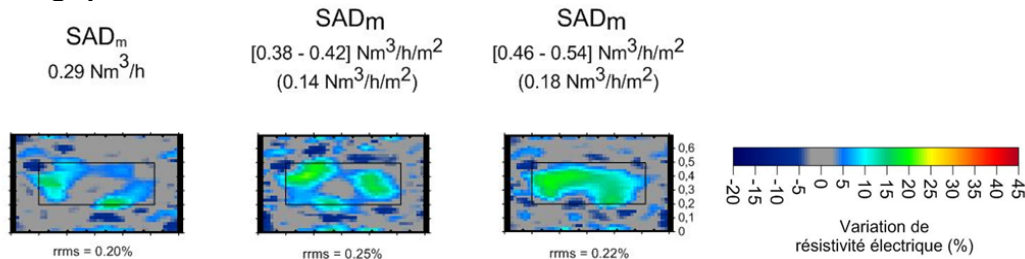


Fig. 3 – Variation de résistivité électrique par rapport aux mesures de références (sans aération) pour une concentration en MES de 6 g L^{-1} et différentes conditions d'aération

4 CONCLUSIONS

L'ERT a été évaluée, en s'appuyant sur une approche numérique, pour la caractérisation de la dispersion de gaz dans les cellules de filtration membranaire. La mise en œuvre expérimentale de cette technique de mesure sur un pilote semi-industriel de filtration membranaire a permis de mettre en évidence que la répartition de l'air au sein des modules membranaires était fortement influencée par le débit d'air injecté et la concentration en matière en suspension. Ces résultats originaux permettent de fournir des éléments d'interprétation de l'évolution des capacités de filtration des installations industrielles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUETEHORN S., BRANNOCK M., LE-CLECH P., LESLIE G., VOLMERING D., VOSSENKAUL K., WINTGENS T., WESSLING M., MELIN T., 2012 - Limitations for transferring lab-scale microfiltration results to large-scale membrane bioreactor (MBR) processes. *Separation and Purification Technology*, 95, 202-215.

DETERMINATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE D'UN SITE KARSTIQUE PAR UN SUIVI TEMPOREL EN TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE – EPIKARST DE LA GROTTTE DE LASCAUX

VERDET C.¹, SIRIEIX C.¹, RISS J.¹

¹ Université de Bordeaux, UMR CNRS 5295 - I2M, Pessac, France

RÉSUMÉ

La connaissance des infiltrations d'eau dans le milieu karstique est nécessaire à la conservation des grottes ornées telle que celle de Lascaux. Des arrivées d'eau dans la grotte, notamment dans la zone d'entrée, sont connues et suivies depuis de nombreuses années. Au moyen de quatre profils de tomographie de résistivité électrique (TRE) acquis en suivi temporel à l'amont hydraulique de l'émergence, l'organisation spatiale de l'épikarst a pu être mis en évidence, avec l'influence du couvert forestier. Une zone d'écoulement préférentiel de l'eau vers le SAS1 a également été identifiée.

Mots clés : Karst, tomographie de résistivité électrique, suivi temporel, écoulements, épikarst, infiltration.

ABSTRACT

DETERMINING THE HYDROGEOLOGICAL FUNCTIONING OF A KARSTIC SITE USING AN ERT MONITORING – LASCAUX CAVE EPIKARST

Knowledge of the water infiltration path through the karst is needed to help the conservation of ornamented caves, such as the Lascaux cave. Water venue are well identified in the cave, principally one in the entrance (SAS1). An electrical resistivity tomography (ERT) monitoring at the upstream of the SAS1 emergence reveled the karstic spatial organization and the forest cover influence. A preferential flow zone to the SAS1 is also identified among the karst.

Key words : Karst, Electrical resistivity tomography, monitoring, flow, epikarst, infiltration.

1. INTRODUCTION

Le milieu karstique est un milieu dont l'organisation spatiale est complexe et hétérogène. Ce milieu peut être découpé en trois grandes parties : le sol pédologique, l'épikarst (zone d'infiltration diffuse) et la zone de transmission (drainage par percolation verticale). C'est dans cette dernière zone que l'essentiel de la grotte de Lascaux se développe. L'entrée de la grotte se situe dans l'épikarst. Une émergence épikarstique se développe à l'entrée, dans le SAS1, au plafond à la faveur du contact entre épikarst et zone de transmission comme montré par Xu et al. (2016).

La grotte de Lascaux est une grotte ornée dont les peintures rupestres sont datées d'entre -16 000 ±500 BP et -18 000 ±190 BP. Ces peintures sont sensibles à l'état hydrique de la grotte, à tout risque de pollution et aux précipitation/dissolution à la paroi. Il est donc nécessaire, dans un souci de conservation de caractériser le fonctionnement hydrogéologique du site. Plusieurs études hydrogéologiques ont été effectuées par l'analyse des eaux de la grotte (Lopez, 2009) et un schéma de

fonctionnement de l'émergence a pu en être déduit (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

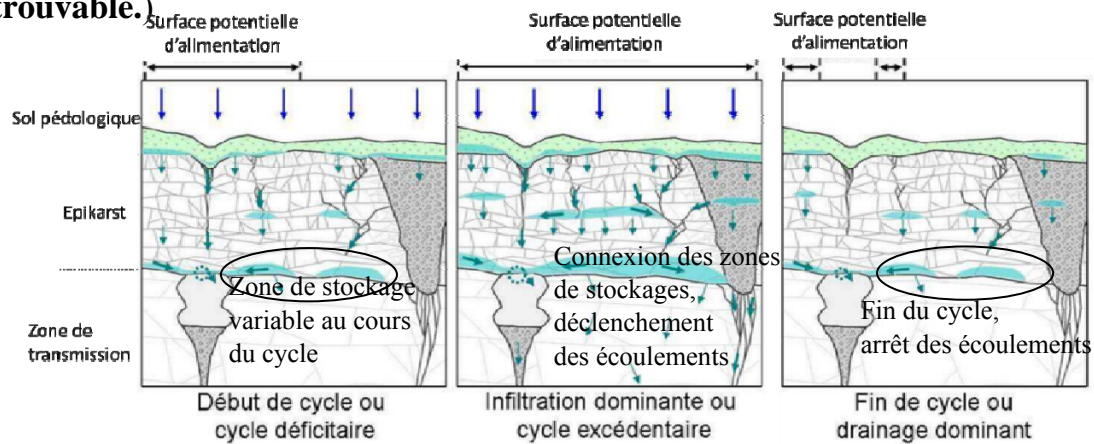


Fig. 1 - Schéma fonctionnel de l'émergence épikarstique du SAS1 de la grotte de Lascaux. D'après Lopez (2009).

La distribution spatiale de chaque compartiment n'est quant à elle, pas connue. Le suivi temporel des mesures de tomographie de résistivité électrique (TRE) permet d'identifier les compartiments dans le massif (Watlet et al., 2018). Un premier suivi temporel de deux ans (Xu et al., 2017) a permis de poser les bases méthodologiques. L'étude a été étendue à six années. Les mesures ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du massif et en particulier celles de l'émergence du SAS1. Nous développons ici la méthodologie et les résultats issus de ce suivi temporel.

2. MATERIEL ET METHODES

Quatre profils de mesure de TRE ont été implantés sur le site, en amont hydraulique de l'émergence du SAS1 de la grotte (Figure 2) : N50 et S50 de longueur 35,5 m et d'espacement interélectrode de 50 cm, N100 et S100 de longueur 71 m, d'espacement interélectrode 100 cm. Chacun de ces profils a fait l'objet de 50 à 53 mesures, composées de la concaténation des dispositifs gradient et pôle – dipôle (direct et inverse). Les données sont ensuite inversées avec le logiciel Res2DInv, et la température corrigée pour ramener les résistivités à une température de référence de 12,6 °C.

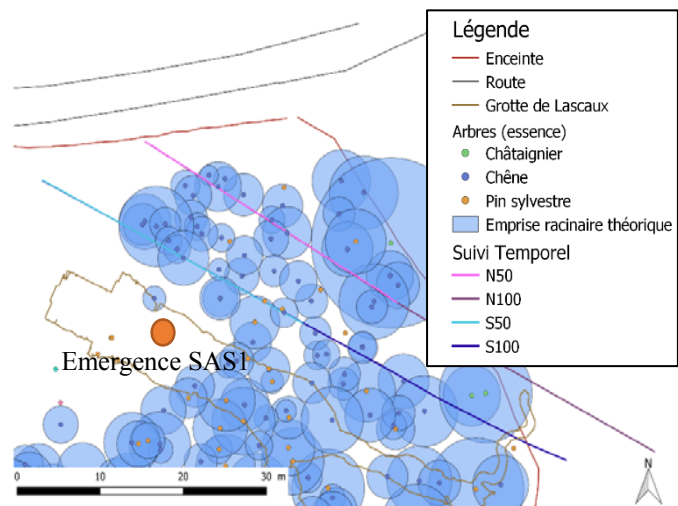


Figure 2 : Plan de la partie nord de la grotte de Lascaux et implantation des quatre profils de TRE.

Une classification hiérarchique ascendante (CHA) permettant de synthétiser la cinquantaine de mesures par profil a ensuite été réalisée. Cette méthode permet de regrouper entre eux les blocs d'inversion ayant une résistivité et un comportement au cours du temps, similaires. Cette analyse est réalisée sur des données centrées et

réduites afin de réduire la contribution des variables à forte variance sur l'analyse. Des classes de blocs sont ainsi créées, et leur médiane analysée et comparée aux mesures de débit dans le SAS1 et à celles des pluies efficaces (= pluie brute – évapotranspiration).

3. RESULTATS

La CHA a permis de créer sept classes pour le profil S50 (Figure 3). Les classes 1 à 4, superficielles, présentent des variations au cours du temps synchrones à celles des pluies efficaces. La variation de la classe 4 montre la plus grande amplitude (300 à 850 $\Omega \cdot m$), contre 160 à 400 $\Omega \cdot m$ pour la classe 1, 140 à 240 $\Omega \cdot m$ pour la classe 2 et 110 à 190 $\Omega \cdot m$ pour la classe 3. Ces classes ont une

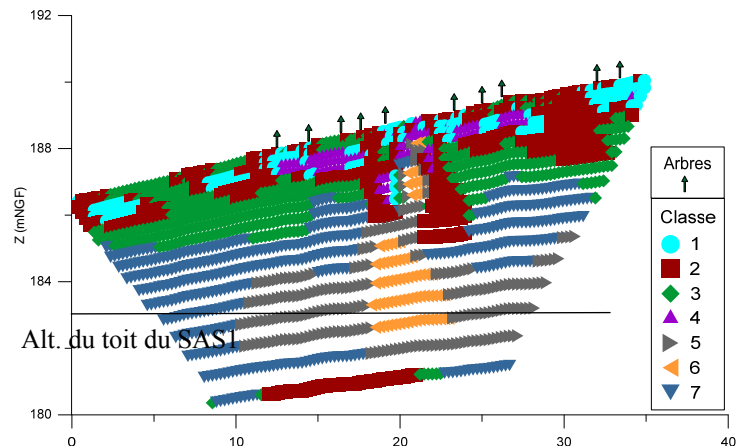


Figure 3 : Répartition des blocs tenant compte des résultats de la CHA du profil S50. La position des arbres sur le profil est donnée.

amplitude décroissante et une résistivité plus faible avec la profondeur, à l'exception de la classe 4. Ceci irait dans le sens d'une variation de la teneur en eau du terrain au cours du temps plus importante proche de la surface qu'en profondeur. La grande variabilité de la classe 4 s'explique par la présence des arbres, dont l'emprise racinaire est localisée au-dessus des blocs de cette classe (Figure 3). Une étude du flux de sève des chênes, majoritaires sur cette zone (Domec, 2017), montre qu'ils ne pompent presque pas d'eau en hiver (de novembre à mai) et qu'ils reprennent un pompage important l'été. Cela explique donc la très forte et brutale augmentation de la résistivité de la classe 4 durant les mois d'été, dû à un déficit en eau important. La TRE montre que l'essentiel de cet effet se fait entre 1 et

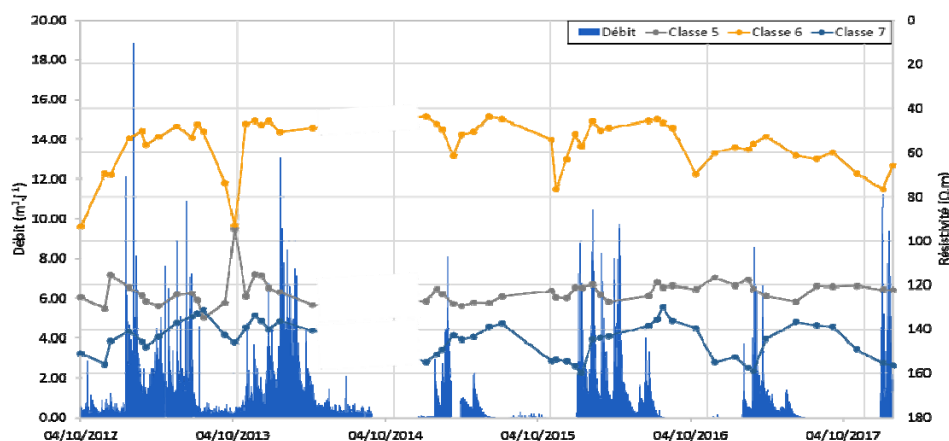


Figure 4 : Résistivité médiane au cours du temps des classes 5, 6 et 7. Le débit mesuré dans le SAS1 est représenté en bleu.

2 m de profondeur.

Les classes 5, 6 et 7, plus en profondeur, présentent des variations de résistivité synchrones de celles du débit dans le SAS1 (Figure 4). La classe 6 est celle dont les

variations de résistivité médiane sont les plus proches de celles du débit au cours du temps, avec une variation entre 45 et 90 $\Omega\cdot m$. Cette classe réagissant comme le débit et avec une faible résistivité est vraisemblablement constituée d'un matériau plus poreux. Il pourrait s'agir d'un calcaire plus altéré/fracturé que les calcaires environnants ou même d'une poche de fantômisation servant de zone de transfert de l'eau vers le SAS1. La classe 5, plus résistive, présente une augmentation de la résistivité immédiatement après la reprise des écoulements dans le SAS1, puis une diminution progressive après l'arrêt des écoulements. Il peut s'agir d'une zone de stockage de l'eau dont le seuil de percolation une fois atteint déclenche des transferts vers la classe 6 puis les écoulements dans le SAS1. La classe 7, enfin, présente de très faibles variations au cours du temps, autour de 120 $\Omega\cdot m$. Il pourrait s'agir d'un banc calcaire marneux mentionné par Schoeller et Vouvé (cf. Lopez, 2009).

Enfin, nous remarquons en bas du profil plusieurs blocs appartenant à la classe 2. Il s'agit en réalité du calcaire compact tel qu'identifié sur le modèle géostatistique 3D par Xu et al. (2016), appartenant à la zone de transmission.

L'étude des trois autres profils montre des classes et comportements similaires, avec une zone préférentielle d'écoulement de l'eau dans le massif vers le SAS1.

4. CONCLUSION

A partir de l'étude du suivi temporel des quatre profils de TRE (Figure 2), nous pouvons déduire une organisation du karst et des zones d'écoulement préférentiel déterminant l'écoulement à l'émergence du SAS1. Les zones de stockages identifiées dans l'épikarst au contact de la zone de transmission (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) sont ainsi localisées spatialement sur le site de Lascaux. La classe 6 est ainsi définie comme une zone de transfert et la classe 5 comme une zone de stockage. L'effet des chênes a aussi pu être montré au droit de la classe 4, entre 1 et 2 m de profondeur correspondant aux racines de chênes.

5. REMERCIEMENTS

Nous remercions la DRAC Aquitaine pour son soutien financier et sa collaboration. Nous remercions également MM. Jean-Christophe Domec et Stéphane Perrin pour l'apport de leur connaissance et l'étude des arbres environnant la grotte ; Fabien Naessens et Sylvain Mateo pour leur aide sur le terrain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DOMEC, J.-C., 2017** - Mesure des flux de sèves des espèces ligneuses principales situées sur le toit de la grotte de Lascaux et détermination de la transpiration potentielle du site. *Bordeaux Sciences Agro*.
- LOPEZ, B., 2009** - Les processus de transfert d'eau et de dioxyde de carbone dans l'épikarst. *Thèse. University of Bordeaux*.
- WATLET, A., KAUFMANN, O., TRIANTAFYLLOU, A., POULAIN, A., CHAMBERS, J.E., MELDRUM, P.I., WILKINSON, P.B., HALLET, V., QUINIF, Y., VAN RUYMBEKE, M., VAN CAMP, M., 2018** - Imaging groundwater infiltration dynamics in the karst vadose zone with long-term ERT monitoring. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 1563–1592. .
- XU, S., SIRIEIX, C., MARACHE, A., RISS, J., MALAURENT, P., 2016** - 3D geostatistical modeling of Lascaux hill from ERT data. *Eng. Geol.* 213, 169–178.
- XU, S., SIRIEIX, C., RISS, J., MALAURENT, P., 2017** - A clustering approach applied to Time-Lapse ERT interpretation - case study of Lascaux Cave. *J. Appl. Geophys.*

EFFET DE PETITES VARIATIONS D'UN MILIEU BICOUCHE SUR UN NOUVEAU OBSERVABLE D'INVERSION

WANG A., LE FEUVRE M., ABRAHAM O., LEPAROUX D.

IFSTTAR, Allée des Ponts et Chaussées, Route de Bouaye – CS 5004, 44344 Bouguenais Cedex
ao.wang@ifsttar.fr

RÉSUMÉ

Pour l'approche sismique par Ondes de Surface, l'inversion classique des courbes de dispersion de vitesse de phase montre ses limites lorsqu'on cherche à différencier de façon quantitative des milieux dont les vitesses V_s varient très faiblement comme c'est le cas en monitoring. Dans le but de pallier ce manque de précision, l'étude proposée ici porte sur une nouvelle observable d'inversion : la dérivée partielle de vitesse de phase par rapport à la fréquence $\partial V_{ph}/\partial f$. L'analyse de l'observable, basée sur un milieu bicouche, montre que cette nouvelle observable est plus sensible aux variations du milieu le plus profond, notamment pour un taux de variation de la vitesse V_s de moins de 10 %.

Mots clés : *quantitative estimation, petites variations, nouvelle observable d'inversion.*

ABSTRACT

IMPACT OF SMALL VARIATIONS IN A TWO-LAYER MEDIUM ON A NEW INVERSION OBSERVABLE

For the surface wave seismic approach, the classical inversion of the phase velocity dispersion curves shows its limits when one seeks to differentiate quantitatively from the medium whose V_s velocities vary very slightly as is the case in monitoring. In order to overcome this lack of precision, the study proposed here deals with a new observable inversion: the partial derivative of phase velocity with respect to frequency. The observable analysis, based on a two-layer medium, shows that this new observable is more sensitive to the variations of the deepest medium, notably for a rate of variation of the speed V_s of less than 10%.

Key words: *quantitative estimation, small variations, new inversion observable.*

.1 INTRODUCTION

Parmi des approches sismiques non destructives, les méthodes des ondes de surface pour l'auscultation de la zone critique ou des structures anthropiques soumises aux aléas climatiques ont attiré beaucoup d'attention des géophysiciens dans les décennies passées. Par exemple, dans le cadre de la surveillance passive

de la digue marine, les ondes de surface peuvent être reconstruites à différents moments à partir de l'interférométrie sismique, et les pseudo-sections 2D de variation de vitesse sont obtenues par des mesures de retard en supposant que la fréquence et la profondeur sont liées par de simples relations empiriques (PLANES et al., 2017). Cependant, si des profils de profondeur quantitatifs de la vitesse de cisaillement sont nécessaires, le potentiel de l'inversion de la courbe de dispersion habituelle pour surveiller de petites variations de la vitesse de cisaillement doit encore être soigneusement étudié. Dans ce sens, nous proposons ici l'analyse de la prise en compte d'une nouvelle observable et de sa sensibilité pour des faibles variations de vitesses V_s du milieu.

Dans un premier temps, des signaux sont générés sans bruit dans un milieu bicouche de référence (**Tab. 1**) constitué d'une couche superficielle de 8 m d'épaisseur superposée sur un milieu semi-infini. La vitesse de cisaillement de ce milieu est ensuite légèrement modifiée avec un taux de variation, noté α , compris entre [-10, 10] %.

Tab. 1 - Paramètres du modèle de référence

Numéro de couche (i)	V_{pi} [m/s]	V_{si} [m/s]	h_i [m]	ρ_i [kg/m ³]
1	1000	600	8	1050
2	2000	1100	∞	1700

2. EFFET DE VARIATIONS SUR LA NOUVELLE OBSERVABLE

2.1. Nouvelle observable $\partial V_{ph}/\partial f$

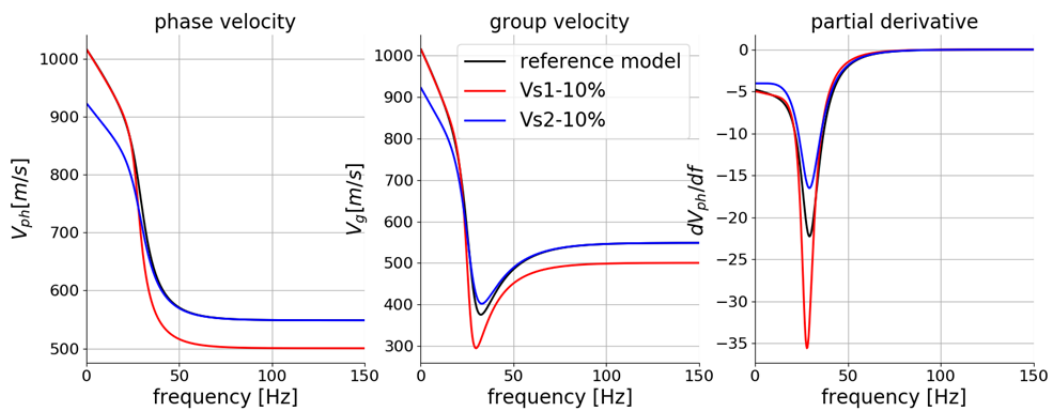


Fig. 1 - Courbes de dispersion pour les trois observables.

Sur les courbes de dispersion classiques de vitesse de phase ou de vitesse de groupe, les basses fréquences correspondent au milieu profond et les informations du milieu superficiel se trouvent à hautes fréquences. Cependant, aux fréquences intermédiaires où se trouvent les informations de l'interface et des variations des deux couches, les informations sont limitées (**Fig. 1**).

Au contraire, comme on le voit sur la **Fig. 1**, l'observable $\partial V_{ph}/\partial f$ est porteuse d'informations pour des fréquences intermédiaires lorsque la vitesse V_s varie de 10 % sur le milieu superficiel comme sur le milieu profond. Notons que la partie basses fréquences de cette observable est sensible uniquement à la variation de vitesses du milieu profond. Et ce jusqu'à très basses fréquences. Ces courbes montrent que la nouvelle observable est plus sensible aux variations du milieu, notamment aux variations du milieu plus profond, par rapport aux vitesses de phase ou de groupe.

2.2. Résultat d'inversion

Dans cette étude, nous utilisons une approche d'inversion globale basée sur l'algorithme de voisinage (SAMBRIDGE 1999, WATHELET 2008). Dans l'inversion classique d'une courbe de dispersion de vitesse de phase, nous utilisons les erreurs réalistes qui est définie empiriquement par une loi statistique issue d'une série de mesures (O'NEILL 2004). Cette erreur nous permet de sélectionner les modèles inversés dont la courbe de dispersion correspond est comprise dans les barres d'erreur. Parmi des modèles sélectionnés, le pire modèle a la plus mauvaise fonction coût (noté P_{min}) qui correspond à la ligne bleue (**Fig. 2**).

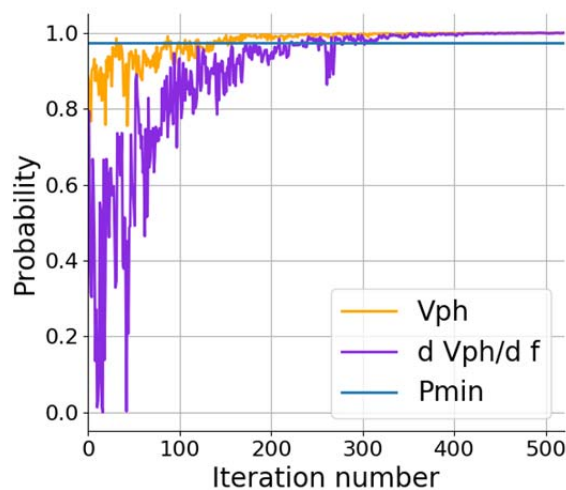


Fig. 2 - Courbes de convergences pour les deux inversions.

En prenant la dérivée partielle de vitesse de phase comme données d'inversion, les modèles inversés sélectionnés sont ceux dont la fonction coût est meilleure que P_{min} , soient les modèles de la courbe violette qui sont au-dessus de la ligne bleue. La **Fig. 3** montre les résultats d'inversion pour le milieu de référence et les milieux avec des variations de vitesses de cisaillement.

D'après la **Fig. 3**, la variation du milieu superficiel (V_{s1}) peut être estimée lorsque $\alpha > 2\%$. Ceci est aussi le cas pour la variation du milieu profond (V_{s2}). De plus, les résultats d'inversion sont plus propres quand $\alpha = 3\%$, ce qui montre

aussi que la nouvelle observable est plus sensible aux variations du milieu profond.

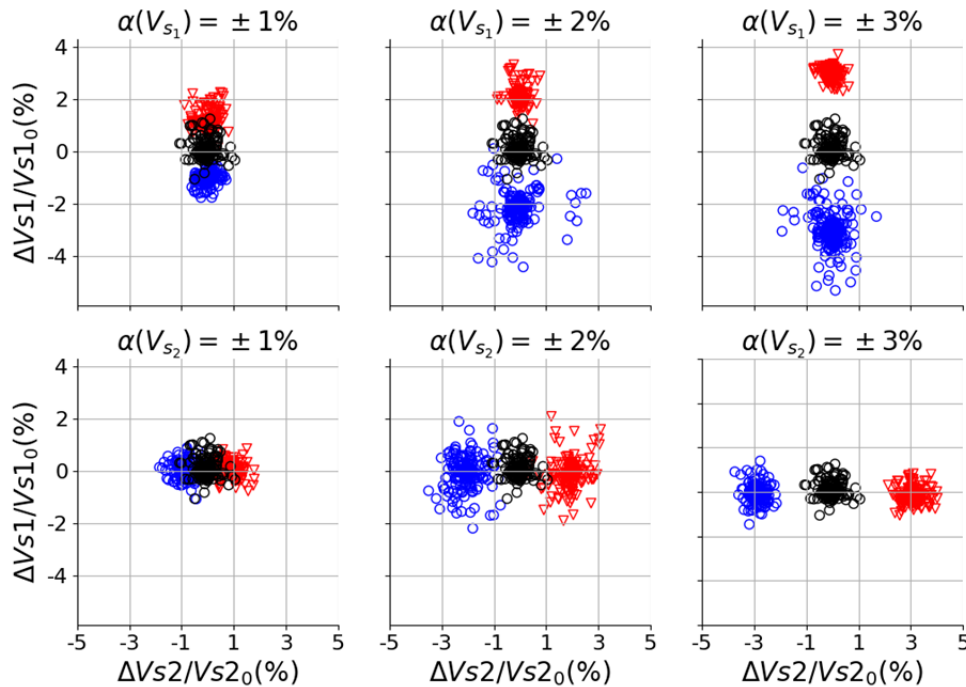


Fig. 3 - Résultats d'inversion dont chaque point correspond à un modèle inversé. Les couleurs des points présentent le taux de variation du milieu : rouge ($\alpha > 0$), noir ($\alpha = 0$), bleu ($\alpha < 0$).

.3 CONCLUSION

Cette étude ouvre des perspectives sur la capacité des ondes de surface à identifier de façon fiable des variations de vitesses V_s de l'ordre de quelques pourcents. Cette possibilité permettrait de mettre en place une méthodologie de surveillance quantitative efficace dans le cadre de faibles variations du taux d'humidité ou d'altération de la zone critique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

O'NEILL A., 2004 – Shear velocity model appraisal in shallow surface wave inversion. *ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, 539-546.

PLANES T., RITTGERS, J.B., MOONEY, M.A., KANNING, W., DRAGANOV D., 2017 – Monitoring the tidal response of a sea levee with ambient seismic noise. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 255–263.

SAMBRIDGE M., 1999 – Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-II. Appraising the ensemble. *Geophysical Journal International*, 138(December), 727-746.

WATHELET M., 2008 – An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9), 1-5.

CARACTÉRISATION DU BISEAU SALÉ AU BÉNIN PAR MESURES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

YALO N.¹, BOUCHER M.², ALASSANE A.¹, KOUNIKA E.¹,
CHODATON H.¹, N'TCHA T.¹

¹ LHA, INE, UAC, 01BP526 Cotonou, BENIN yalonicaise@yahoo.fr

² IRD, UGA, CNRS, G-INP, IGE, marie.boucher@ird.fr

RÉSUMÉ

La caractérisation du biseau salé long des côtes béninoises s'est focalisée sur les localités de Togbin à l'Ouest et de Sèmè-Kpodji à l'Est. Une dizaine de sondages TDEM et quelques kilomètres de profils EM ont été réalisés dans chacune des deux localités. Ces mesures ont permis de localiser la profondeur du biseau salé à environ 6,5 m sur la côte Ouest et à 48 m sur la côte Est. La cartographie du biseau salé a montré que ce dernier est plus étendu sur la côte Ouest où les lagunes sont plus proches de l'Océan que sur la côte Est où les lagunes sont à plus de 2km du rivage. De cette étude il ressort donc que d'Ouest en Est, les côtes béninoises n'ont pas la même vulnérabilité au biseau salé.

Mots clés : Profil EM, Sondage TDEM, Zones côtières, Sèmè-Kpodji, Togbin.

CHARACTERIZATION OF SALT WEDGE IN BENIN BY ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

ABSTRACT

The characterization of the salt wedge along the Beninese coasts, focused on the localities of Togbin in the West and Sèmè-Kpodji in the East. A dozen TDEM surveys and some kilometers of EM profiles were conducted in each of the two localities. These measurements made it possible to locate the depth of the salt wedge about 6,5 m on the West Coast and 48 m on the East Coast. The mapping of the salt wedge has shown that, it is more extensive on the west coast where the lagoons are closer to the ocean than on the east coast where the lagoons are more than 2 km from the shore. From this study it is clear that from West to East, the Beninese coasts do not have the same vulnerability to salt wedge.

Key words : EM profile, TDEM survey, Coastal area, Seme-Kpodji, Togbin.

.1 INTRODUCTION

La connaissance de l'extension de l'intrusion du biseau salé et de la profondeur de l'interface eau douce / eau salée contribue à la prise de décision pour la sauvegarde de l'environnement et la gestion durable des eaux souterraines (ex. Alabjah et al. 2018, Yalo et al. 2012). Au cours de la dernière décennie, les informations hydrogéologiques classiques ont été de plus en plus complétées par des informations géophysiques souterraines permettant d'obtenir des images plus précises des systèmes aquifères. En particulier, les méthodes électromagnétiques

de prospection permettent de déterminer les distributions de conductivité (ou inversement de résistivité) dans les sols et le sous-sol en fonction de la profondeur. Ainsi elles peuvent être utilisées pour délimiter l'interface entre l'eau douce (résistante) et l'eau salée (conductrice) (ex. Goldman et al. 1991, El-Kaliouby et Abdalla 2016).

Notre étude vise à cartographier l'extension du biseau salé et à estimer la profondeur de l'interface eau douce / eau salée dans l'aquifère sableux du quaternaire au sud du Bénin, région densément peuplée. Les prospections électromagnétiques se sont focalisées sur les localités de Togbin et de Sèmè-Kpodji (Fig.1A).

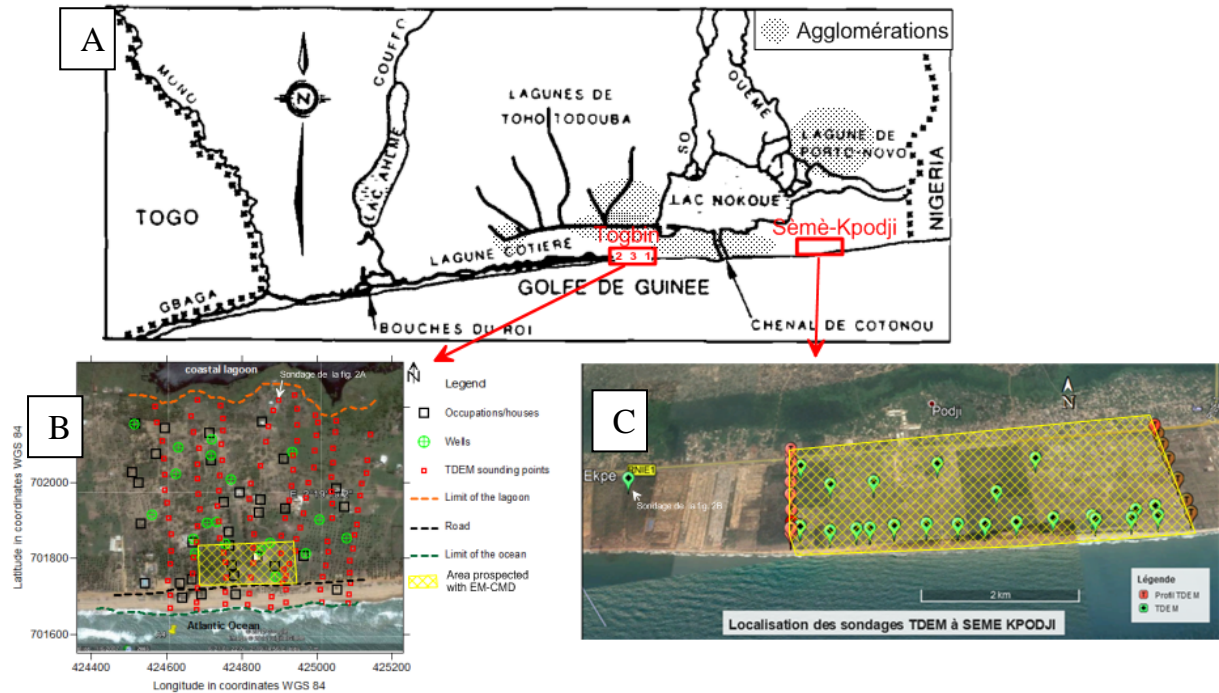


Fig. 1 – Localisation des mesures. Fond de carte en haut : schéma des systèmes lagunaires béninois (Le Barbé et al, 1993).

.2 MÉTHODES

Dans la localité de Togbin 1 (Fig. 1B), 115 sondages TDEM ont été réalisées sur une surface de 600 m x 600 m, soit environ 360 000 m². Ces sondages sont répartis en 8 profils de 15 sondages en moyenne. Les profils sont espacés de 60 m dans la direction perpendiculaire à la ligne de rivage. Sur chaque profil, les sondages sont espacés d'environ 30 m. Dans la localité de Sèmè-Kpodji (Fig. 1C), 40 sondages TDEM ont été réalisés avec les mêmes configurations.

La méthode EM-CMD a été déployée sur les localités de Togbin (Fig. 1B) et de Sèmè-Kpodji (Fig. 1C) avec des profils perpendiculaires à la ligne de rivage.

.3 RÉSULTATS

3.1. Délimitation de la profondeur du biseau salé

Le résultat de l'inversion du log de sondage TDEM à Togbin 1 montre que la profondeur du biseau salé se situe à 6,5 m (fig. 2A). En outre, les mesures de

conductivités (inversement de résistivités) confirment la baisse progressive de la résistivité jusqu'à 7 m de profondeur.

Les résultats du sondage TDEM à Sèmè-Kpodji (Fig. 1C) montrent que le toit du biseau salé se situe à une profondeur de 48 m (Fig. 2B). Les valeurs de conductivités sur confirme que le terrain résistant en surface. Le biseau salé est donc beaucoup plus profond sur la rive Est (Sèmè-Kpodji) des cotes littorales béninoises.

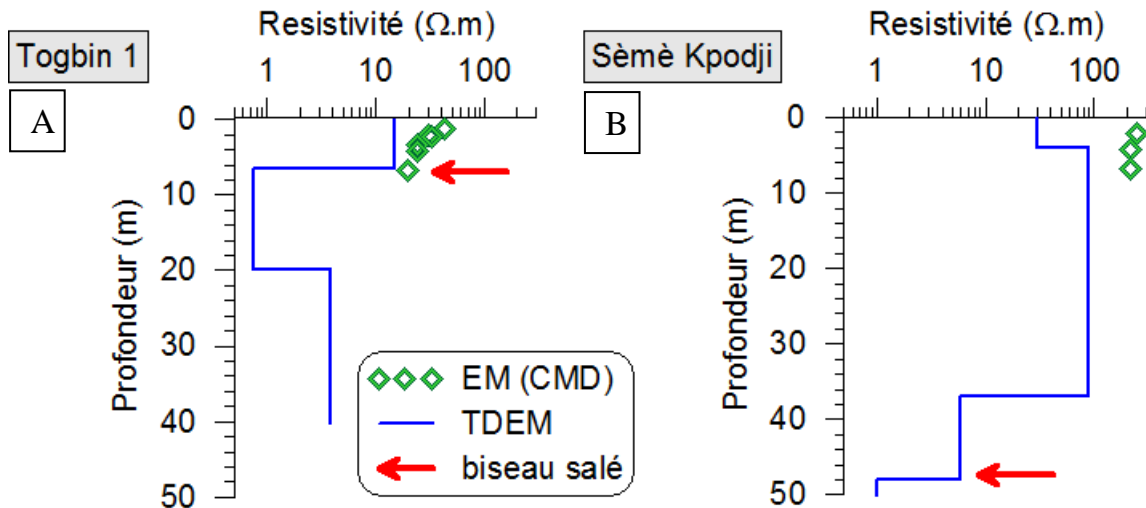


Fig. 2 – Variations des résistivités en fonction de la profondeur.

3.2. Cartographie de l'étendue latérale du biseau salé

Les mesures de conductivités réalisées avec l'EM-CMD dans les secteurs de la localité de Togbin, montrent en général une augmentation de la conductivité en fonction de la latitude : elles varient de ~200 mS/m près de l'Océan à ~20mS/m lorsque qu'on s'éloigne de 300 m de la plage (Fig. 3A). Ce résultat laisse présager que l'interface eau douce – eau salée s'approfondit progressivement du rivage vers l'intérieur des terres. Il est à remarquer que la limite latérale du biseau salé n'est pas totalement parallèle à la ligne du rivage et semble avoir une orientation NNO – SSE.

Les mesures de conductivités réalisées dans la localité de Sèmè-Kpodji, montrent-elles aussi une augmentation en fonction de la latitude (Fig. 3B) : les valeurs de conductivités passent de ~100 mS/m sur la plage à 5-10 mS/m lorsqu'on s'éloigne de 300 m du rivage puis à moins de 2 mS/m à 1.5 km. Cela suggère un approfondissement rapide du biseau salé qui semble confiné en bordure d'océan.

4 CONCLUSIONS

En somme, les mesures électromagnétiques en TDEM et EM ont permis de localiser la profondeur du biseau salé qui est plus superficiel sur la côte Ouest à Togbin (6,5 m) que sur la côte Est à Sèmè-Kpodji (48 m), sachant que ces deux sondages sont respectivement à 650m et 800m du rivage. La cartographie du biseau salé indique que ce dernier est plus étendu sur la côte Ouest où les lagunes sont plus proches de l'Océan que sur la côte Est où les lagunes sont à plus de 2

km du rivage. De cette étude il ressort donc que d'Ouest en Est, les côtes béninoises n'ont pas la même vulnérabilité au biseau salé.

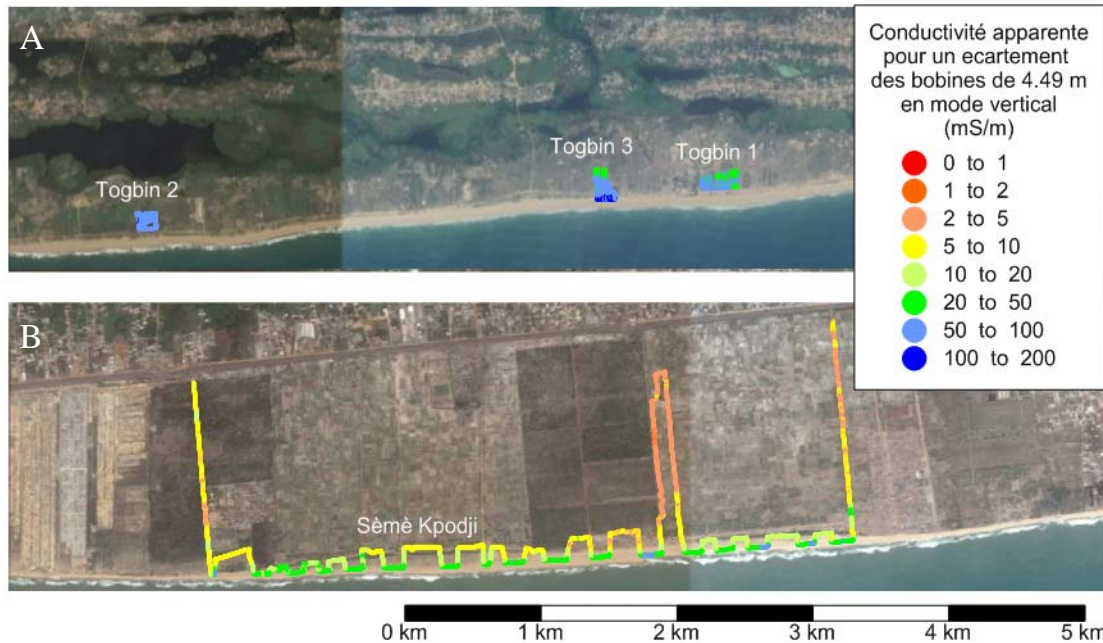


Fig. 3 – Cartographie électromagnétique en bordure d’océan (A) à Togbin (B) à Sèmè Kpodji.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALABJAH B., AMRAOUI F., CHIBOUTB M., SLIMANIC M., 2018** – Assessment of saltwater contamination extent in the coastal aquifers of Chaouia (Morocco) using the electric recognition. *Journal of Hydrology* 566, 363-376.
- EL-KALIOUBYAB H., ABDALLAA O., 2016** – Application of time-domain electro-magnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman. *Journal of Applied Geophysics*, 115, 59-64.
- GOLDMAN M., GILAD D., RONEN A., MELLOUL A., 1991** – Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. *Geoexploration*, 28, 153-174.
- LE BARBE L., ALE G., MILLET B, BOREL Y. GUALDE R., 1993** – Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin. *ORSTOM Editions, Paris, 540 pages.*
- YALO N., DESCLOITRES M., ALASSANE A., MAMA D., BOUKARI M., 2012** – Environmental geophysical study of the groundwater mineralization in a plot of the Cotonou littoral zone (South Benin). *International Journal of Geophysics*, 2012, Article ID 329827, 10 pages.

ETUDE DE L'EXISTENCE D'UNE STRUCTURE EN GRABEN DANS LE CAUSSE D'AGOURAI, MAROC : REPOSE DES METHODES DE RESISTIVITE ELECTRIQUE.

ALLAOUI A., BOUALOUL M., MUZARAFITI A.

*Laboratoire de Géo-Ingénierie et Environnement, Département de Géologie, Faculté
des Sciences de Meknès. abdelhamid.gaig11@gmail.com, boualoul@yahoo.fr*

RÉSUMÉ

Le causse d'Agourai qui forme la partie occidentale de la grande unité structurale du Moyen Atlas tabulaire est caractérisé par sa structure tabulaire constituée essentiellement par des terrains calcaires dolomitiques d'âge liasique avec une présence très importante de fracturations et de failles, Les études géologiques et structurales d'une partie de ce domaine ont mis en évidence l'existence d'une structure en graben ouverte vers le NNE encadrée par deux systèmes de failles NE-SW dont la plus orientale est responsable de l'exutoire de la source de Sidi Youssef. L'objectif de la prospection géophysique entreprise dans ce secteur vise à confirmer ou infirmer l'existence et l'évolution de ce graben en profondeur ; l'étude, à travers une série de sondages, des profils de trainé et un profil de tomographie électrique a pu détecter la faille de Sidi Youssef mais à infirmer l'existence du graben cartographié sur la carte d'Agourai au 1/50000.

Mots clés : causse, calcaire liasique, graben, résistivité électrique, géophysique.

ABSTRACT

STUDY OF THE EXISTENCE OF A GRABEN STRUCTURE IN THE AGOURAI CAUSSE, MOROCCO: RESPONSE OF ELECTRICAL RESISTIVITY METHODS

The Agourai cause, who is the western part of the Middle Atlas, is characterized by its tabular structure consisting mainly of dolomitic calcareous terrains of Liasic age with a very important presence of fractures and faults.

The geological and structural studies of part of this area have highlighted the existence of an open graben structure towards the NNE framed by two NE-SW fault systems, the easternmost of which is responsible for the outlet of the Sidi Youssef spring.

The objective of the geophysical prospection undertaken in this sector is to confirm or no the existence and evolution of this graben in depth; the study, through a series of electrical soundings, profiles and a profile of electrical resistivity tomography (ERT) could detect the fault of Sidi Youssef but to invalidate the existence of the graben mapped on the 1/50000 Agourai map.

Key words: Cause, Liasic calcareous, graben, electrical resistivity, Geophysics.

1. 1 INTRODUCTION

Notre secteur d'étude se situe à l'extrémité NE du causse d'Agourai, dans une dépression caractérisée par une source dite Ain Sidi Youssef qui porte le nom de la localité. Sur le causse d'Agourai, les principales formations géologiques rencontrées

sont de bas en haut, les schistes et les quartzites à intercalations de bancs gréseux et de calcaires d'âge Paléozoïque ; puis le Trias constitué essentiellement des argiles rouges inférieures gypsifères et salifères (dépôts évaporitiques) des argiles rouges supérieures, avec , intercalations des coulées basaltiques doléritiques ; et enfin les calcaires dolomitiques d'âge liasique caractérisé essentiellement par une forte fracturation et une karstification intense.

Les études géologiques et structurales d'une partie de ce domaine structural ont mis en évidence l'existence en surface d'une structure en graben ouverte vers le NNE encadrée par deux systèmes de failles NE-SW.

Notre objectif pour cette étude géophysique vise à confirmer ou infirmer l'existence et l'évolution de ce graben en profondeur à l'aide de la géophysique par l'application de plusieurs méthodes complémentaires.

2. MATERIELS ET METHODES :

La situation de la zone d'étude est donnée à la figure suivante :

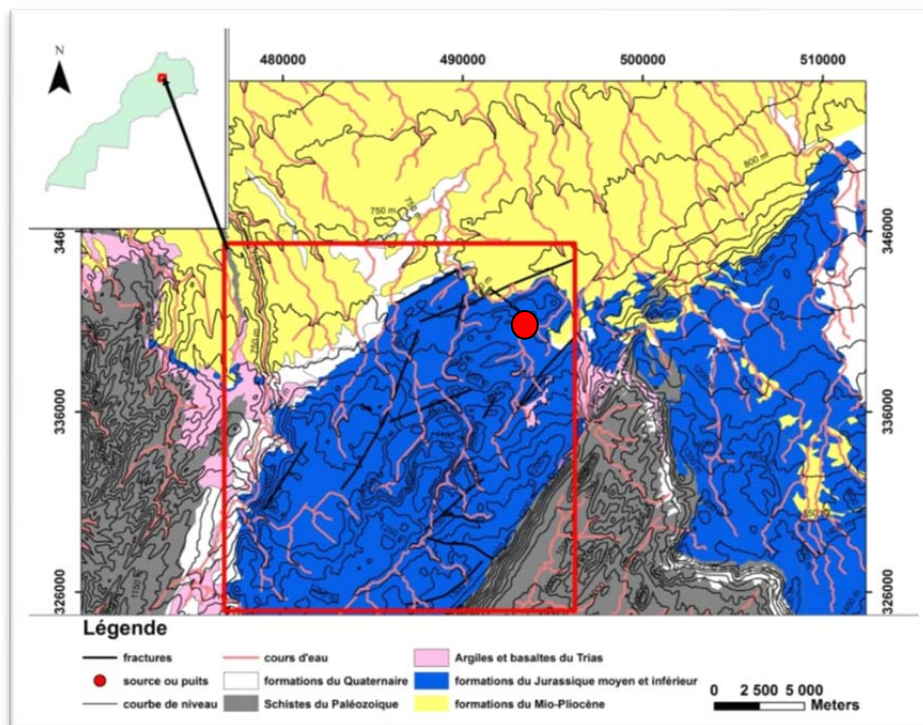


Figure 1 : Carte géologique simplifiée et situation de la zone d'étude

L'approche proposée consiste en une prospection multi-méthode basée en premier lieu sur la réalisation d'un profil de 5 sondages électriques permettant de reconnaître le sous-sol et montrant l'évolution des résistivités des épaisseurs et des résistivités des formations géologiques. Dans un deuxième temps le profil de traîné électrique réalisé sur les bordures de la zone a permis de relever le passage de la faille de Sidi Youssef et en dernier lieu la réalisation d'un profil de tomographie de résistivité avec un dispositif dipôle-dipôle et un espacement de 5m inter-électrodes, ce qui permet d'imager en 2D l'évolution des structures et des résistivités. Le matériel utilisé consiste en un

résistivimètre GeoTrade et un générateur de courant 400W pour les sondages et traînés et un Syscal Pro à 96 électrodes pour la tomographie.

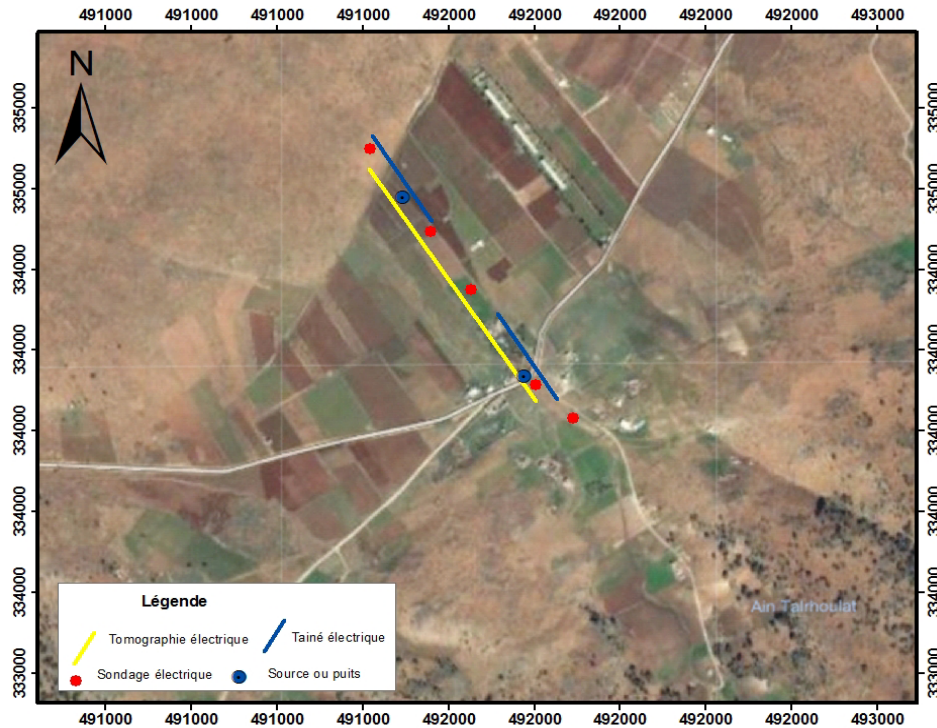
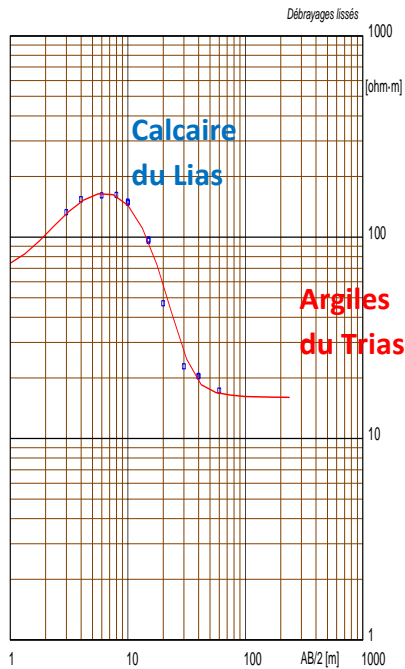


Figure 2 : implantation des mesures géophysique sur image satellitaire

3. RESULTATS

Le traitement et l'interprétation de l'ensemble de ces mesures géophysiques montre effectivement une grande variation des épaisseurs et des résistivités des niveaux électriques entre les bordures et le centre de la structure ; en effet, sur les bordures, les sondages électriques ont permis de montrer que les argiles rouges du Trias comportées en substratum conducteur sont moins profondes, par contre au cœur de la structure ces niveaux deviennent plus profonds (figures 3 et 4).

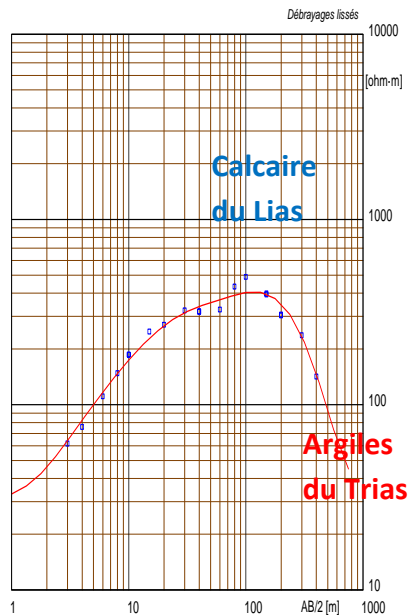
Sondage électrique Schlumberger - SE1.WS3



Situation du SE X = 492007 Y = 333808 Z = 1056 Azim = NE-SW

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm-m]	[m]	[m]	[m]
65	1	1	1056
377	3	1	1055
16		4	1052

Sondage électrique Schlumberger - SE4.WS3



Situation du SE X = 499488 Y = 346278 Z = 1009 Azim = NE-SW

Modèle			
Résistivité	Epaisseur	Profondeur	Altitude
[ohm-m]	[m]	[m]	[m]
30	1.3		1009
693	10	1.3	1007.7
191	15	11	998
1042	37	26	983
194	81	63	946
32		144	865

Figure 3 : le sondage électrique 1 dans la partie Est et le sondage 4 dans la partie Ouest

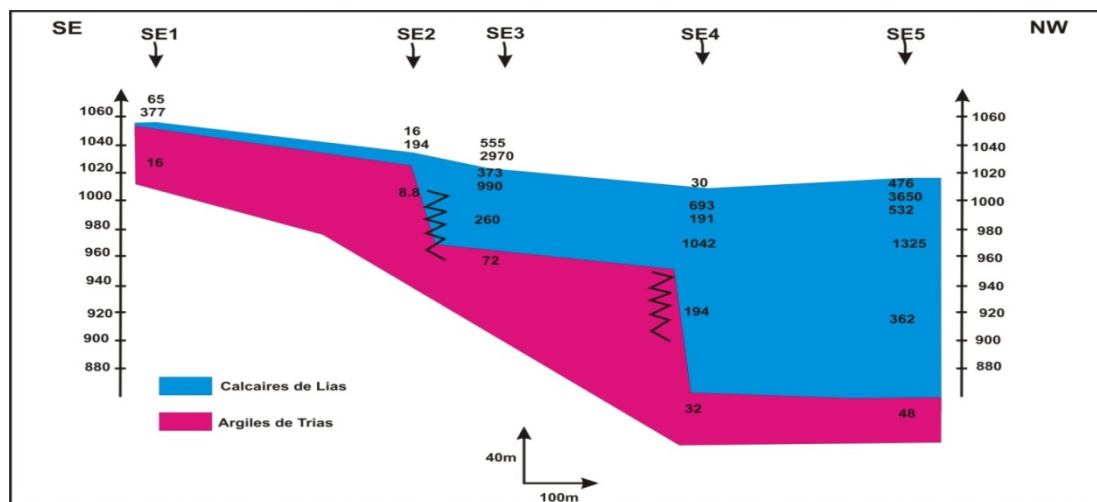


Figure 4 : coupe géo-électrique entre les sondages réalisés

D'autre part les profils des trainés électriques ont mis en évidence l'existence d'anomalies électriques interprétées en termes de failles, ce qui confirme le changement brutal au niveau de l'allure des sondages électriques (figure 5).

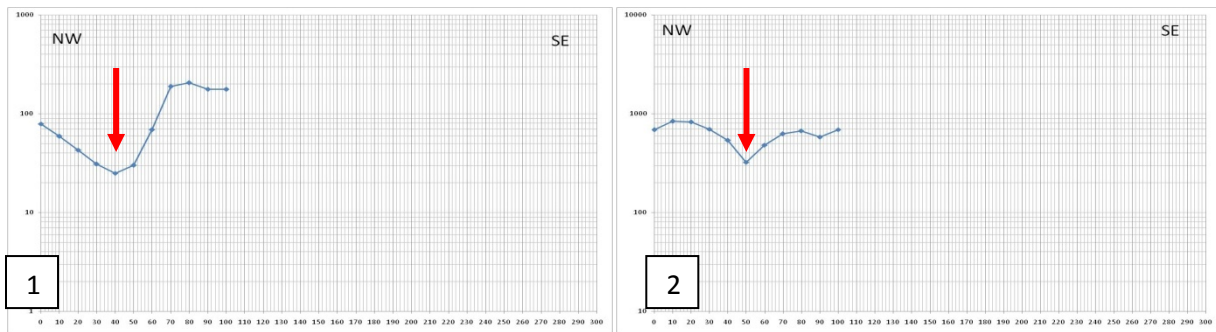


Figure 5 : profils des trainés électriques réalisés (1 réalisé dans la partie Est, 2réalisé dans la partie Ouest)

Par contre la section du profil tomographique n'est pas en faveur d'une structure en graben puisqu'elle montre dans l'extrémité Ouest un plongement régulier de la structure en direction de l'Est, plongement qui est perturbé à l'extrémité Est par la présence de la faille de Sidi Youssef à l'origine de la remontée du compartiment Est du cause d'Agouraï.

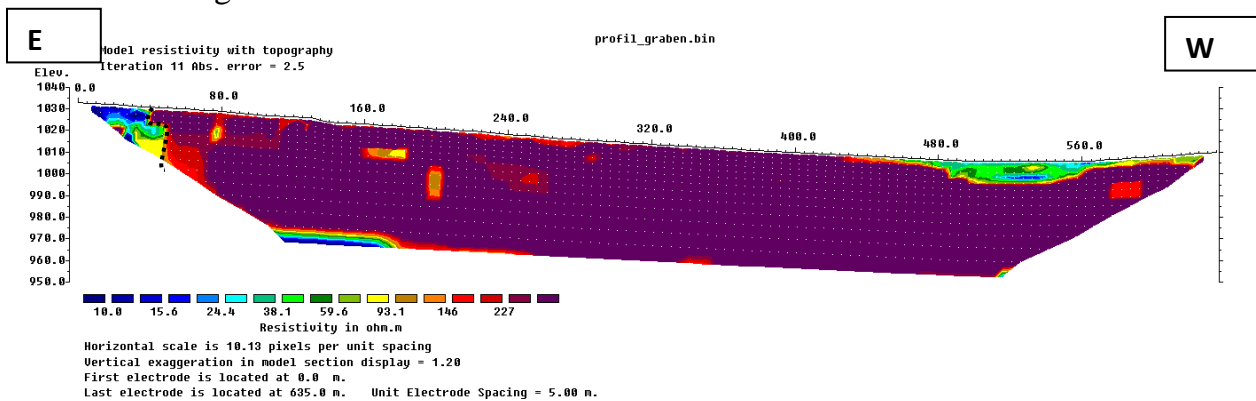


Figure 6 : Section du profil tomographique

La combinaison de l'ensemble de ces méthodes mettre en évidence la structure, objet de cette étude, différente de celle imaginer par l'étude classique, en effet, nous avons permis de relever une seule faille, ce qui permet de dire que la structure est incomplète.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'utilisation d'une approche géophysique multi-méthode (sondages, trainés électriques et tomographie) a permis d'infirmer l'existence d'une structure en graben révélée par l'étude géologique classique réalisée en surface dans le cause d'Agouraï à l'Ouest du Moyen Atlas tabulaire. Pour cela nous proposons de compléter les études classiques par la géophysique, vue son importance dans la géométrie de ces structures en profondeur.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES:

ALLAOUI A., BOUALOUL M., EL OUARDI H., HABIBI M., MUZIRAFITI A., OUHADACHE H. 2018. contribution de la télédétection, de la tomographie

électrique et de l'analyse de la fracturation a la compréhension du transfert des eaux souterraines cause - plaine : cas du complexe sourcier ain Maarouf-ain Boujaoui, Maroc. IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG) e-ISSN: 2321-0990, p-ISSN: 2321-0982. Volume 6, Issue 1 Ver. II (Jan. – Feb. 2018), PP 12-19

BOUIKBANE H. 2015. Apport d'un couplage géophysique et hydrochimique à l'étude du transfert naturel des écoulements souterrains entre le cause calcaire d'El Hajeb-Ifrane et la plaine de Saïss (MAROC). Thèse Doctorat, Univ. My Ismaïl. 175p.

BOUYA N. (2014). Utilisation des données géophysiques aéroportées magnétique et spectrométriques dans la cartographie géologique de la partie NE du massif central et des causes moyen-atlasiques. Thèse d'Université Fac. Meknès Maroc, 176.

BOUYA N., El Ouardi H., Habibou E.H., Mercier E., et Ansan V. (2013). Interprétation géologique des données aéromagnétiques et leur utilisation pour la cartographie des structures du plateau d'Agourai (Moyen Atlas tabulaire, Maroc). Africa Géoscience Review, vol.20, N 1, PP. 13-20.

El Ouardi H., Boualoul M., Ouhaddach H., Habibi M., Muzarafuti A., Allaoui A., Amine A. 2018. Fault analysis and its relationship with karst structures affecting Lower Jurassic limestones in the Agourai plateau (Middle Atlas, Morocco). Geogaceta, 63 (2018), 119-122 ISSN (versión impresa): 0213-683X, ISSN (Internet): 2173-6545

QARQORI Kh. 2015. Contribution à l'étude du réservoir discontinu et karstique des causes moyen-atlasiques et de sa jonction avec le bassin de Saïs par télédétection spatiale et imagerie géophysique. Thèse Doctorat, Univ. My Ismaïl. 183p.

SEFRIQUI S. 2013. Caractérisation Hydro-Structurale et Quantification des Ressources en eau Souterraine dans le bassin de Sebou-Maroc: apport des Outils Isotopiques et du SIG. Thèse Doctorat, Univ. My Ismaïl. 229p.

**APPORT DES DONNÉES GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES A
L'ÉTABLISSEMENT DU MODÈLE LITHOLOGIQUE 3D : APPLICATION
AU GISEMENT DE KOULEKOUN (GUINÉE).**

BOUBKARI L.¹, AIT SLIMAN B.², ELGHORFI M.¹, SAIDI A.¹ MAACHA L.

¹ Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire Géo-Ressources, Marrakech,
laila.boubkari@gmail.com

² Groupe Managem, twin center, tour A, B.P. 5199,
M.AITSLIMAN@managemgroup.com

RÉSUMÉ

L'avancée des techniques d'exploration géophysiques et les forages profonds ont contribué récemment à plusieurs découvertes spectaculaires de minéralisations porphyriques, alors que les techniques d'exploration géochimiques, pour la plupart, n'ont pas réussi à avoir le même impact que les méthodes géophysiques, en raison notamment des défis associés à la modification ou à la destruction, par des phénomènes supergènes, des anomalies géochimiques hypogènes. Le projet d'Or Koulekoun est une perspective importante pour le groupe Managem. C'est l'un des projets en Guinée (Afrique de l'Ouest) pour lequel un permis d'exploration a été accordé. Le gisement de Koulekoun est situé dans le bassin de Siguiri d'âge birimien dans la région orientale de la Guinée; où se trouvent la plupart des mines d'or. Dans notre études, nous avons analysé et interprété des cartes de résistivité et de chargeabilité issues de levé de polarisation provoquée, et nous avons proposé un modèle 3D du principal corps lithologique porteur de la minéralisation en utilisant le logiciel Datamine studio 3.

Mots clés : *exploration géophysique, polarisation provoquée, gisement de Koulekoun, modélisation 3D.*

**CONTRIBUTION OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA TO THE
ESTABLISHMENT OF THE 3D LITHOLOGICAL MODEL: APPLICATION
TO THE KOULEKOUN DEPOSIT (GUINEA).**

ABSTRACT

Advances in geophysical exploration techniques and deep drilling have recently contributed to several dramatic discoveries of porphyry mineralization, while geochemical exploration techniques, for the most part, have failed to have the same impact as geophysical, in particular because of the challenges associated with the modification or destruction, by supergenic phenomena, of hypogenetic geochemical anomalies. The Koulekoun gold project is an important prospect for the Managem group. This is one of the projects in Guinea (West Africa) for which an exploration permit has been granted. The Koulekoun deposit is located in the Siguiri basin of Birimian age in the eastern region of Guinea; where most gold mines are. In our

studies, we analyzed and interpreted resistivity and chargeability maps from induced polarization survey, and we proposed a 3D model of the main lithological body carrying the mineralization using the software Datamine studio 3.

Key words: *geophysical exploration, induced polarization, Koulékoun deposit, 3D modeling.*

.1 INTRODUCTION

Le massif de Kéloukoun situé au NE de la Guinée (bassin de Siguri) d'âge Birimien (MILÉSI et al. 1992, THIÈBLEMONT, 2005) est composé essentiellement de deux facies majeurs : Le porphyre de Kéloukoun (KLKN porphyre) essentiellement magmatique acide avec des dacites et rhyodacites altérées, les tuffs koulékoun (KLKN tuffs), formées principalement de turbidites, de pélites schisteuses et de grés.

L'ensemble de ces roches présente une altération hydrothermale à quartz secondaire, séricite, chlorite ferrifère et chalcoppyrite.

Notre étude s'est focalisée sur l'analyse et l'interprétation des cartes de résistivité et de chargeabilité qui ont été établis à partir de levés de polarisation provoquée, mis en œuvre à Kéloukoun. Nos résultats contribuent à la modélisation du principal corps lithologique porteur de la minéralisation, en utilisant le logiciel Datamine studio 3.

.2 MÉTHODES ET RESULTATS

2.1. Exploration géophysique

2.1.1. Principe général

Le secteur de Koulekoun a fait l'objet d'un levé de polarisation provoquée mis en œuvre en configuration pôle-dipôle multi-séparations. Cette méthode est une méthode électrique d'investigation non destructive permettant d'obtenir une image du sous-sol dans le but d'identifier sa structure interne comme des hétérogénéités géologiques, des failles, etc. Cette technique est particulièrement efficace dans la détection des gisements de sulfures surtout ceux à caractère disséminés, (EDWARDS, 1977) et elle permet une imagerie continue 2D (ou 3D) des variations de résistivité et/ou de la chargeabilité du sous-sol (DAHLIN, 2001). Grâce au développement d'outils performants d'acquisition automatisée et d'inversion mathématique (LOKE et BARKER, 1996), cette technique est devenue relativement facile à mettre en œuvre et largement utilisée dans divers champs d'application en sciences de la Terre.

.3 Par ailleurs, les instruments de mesures utilisés actuellement permettent aussi d'effectuer des mesures précises de la chargeabilité du sous-sol. Ceci constitue l'un des atouts majeurs de la technique d'imagerie électrique en exploration minière,

notamment, en ce qui concerne l'exploration des minéralisations sulfurées disséminées.

2.1.2. Discussion des résultats

La prospection par polarisation provoquée du secteur de Koulékoun a permis de révéler l'existence de trois anomalies principales qui occupent essentiellement la partie centrale de la grille de levé (figure 1). L'alignement de ces anomalies définit une bande polarisable orientée N-S. La faible amplitude des trois anomalies de chargeabilité indique qu'elles sont liées à des sources à faible teneur en éléments polarisables. Ceci représente le type d'anomalies que génèrent les occurrences d'or liées à de faibles concentrations de sulfures.

La carte de résistivité (figure 2) montre que les trois principales anomalies mises en évidence par le levé de polarisation provoquée coïncident systématiquement avec des zones résistives, ce qui indique que les sources polarisables identifiées présenteraient une texture disséminée. Ce type de signature géophysique est typiquement reconnu pour les occurrences d'or associées à du quartz (Quartz aurifère). L'examen des données de résistivité dans une perspective de cartographie structurale a permis l'identification d'un réseau de structures qui sont principalement orientées selon deux directions préférentielles NNW-SSE et NNE-SSW. Ces directions coïncident avec l'orientation générale du porphyre de Koulékoun (la principale structure minéralisée).

La superposition des données géophysique (contour des anomalies de résistivité et de chargeabilité) au contour du porphyre de Koulékoun montre la coïncidence parfaite des anomalies géophysiques avec la structure du porphyre de Koulékoun (Figure 3).

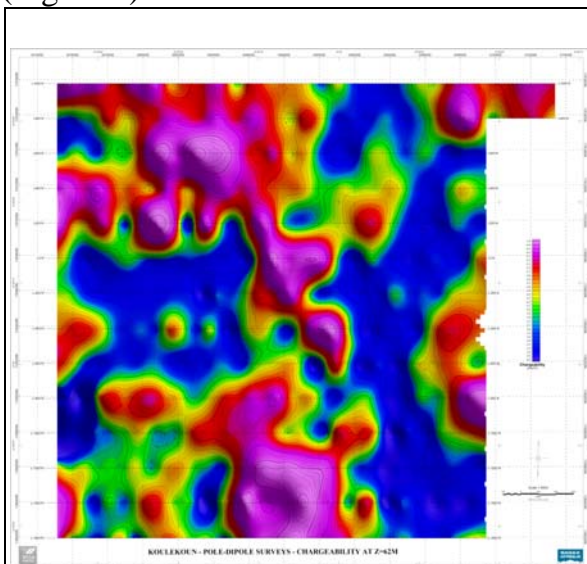


Fig. 1 - Levé de Polarisation Provoquée, modèle de chargeabilité du sous-sol à 62m de profondeur

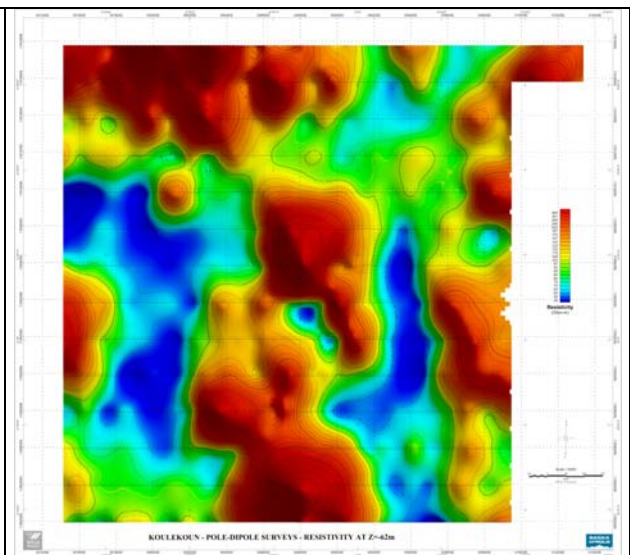
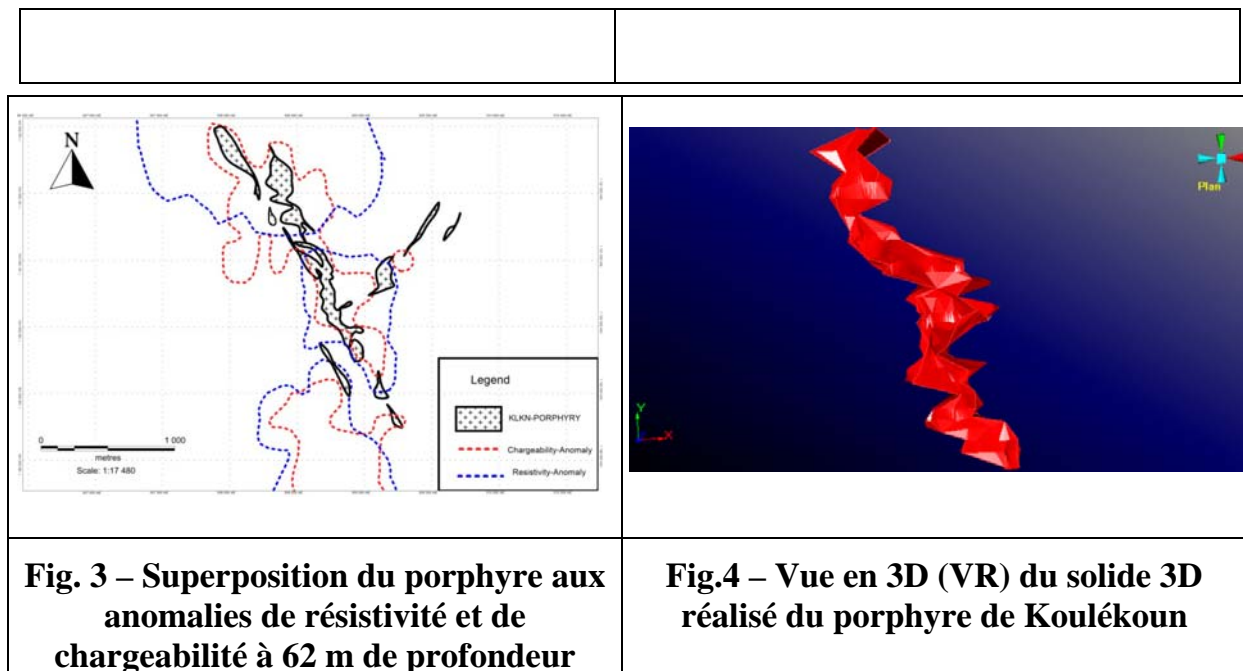


Fig. 2 - Levé de Polarisation Provoquée, modèle de résistivité du sous-sol à 62m de profondeur



2.2. Modélisation

Le modèle proposé inclut toute la structure géologique du porphyre et le corps minéralisé principal du gisement de Koulékoun. On en déduit l'individualisation d'une structure minéralisée orientée Nord-Sud à pendage subvertical, d'une longueur de 2150 m à une profondeur de 450 m. La comparaison de notre modèle établi avec celui déjà existant quoiqu'il montre la même direction, présente cependant une prolongation N-S, due à la mise à jour des données de sondage. (Figure 4).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DAHLIN T., 2001** – The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27 (9), 1019-1029.
- EDWARDS L.S., 1977** – A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42 (5), 1020-1036.
- LOKE M.H., BARKER R.D., 1996** – . Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44 (2), 131-152.
- MILÉSI J.P., LEDRU P., FEYBESSE J.L, DOMMANGET A., and MARCOUX E., 1992** – Early proterozoic ore deposits and tectonics of Birimian orogenic belt, West Africa. *Precambrian Research*. 58: 305-344.
- THIÉBLEMONT D. 2005** – Géologie et pétrologie de l'archéen de Guinée : une contribution régionale à la formation de la croûte continentale. *Thèse, Université de Bretagne occidentale*, pp. 150.

**CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES INFILTRATIONS
D'EAUX USEES TRAITEES DANS LES ZONES DE REJET
VEGETALISEE.**

**CLEMENT R.¹, PAPIAS S.¹, DUBOIS V.¹, MOREAU M.², CHOUBERT J.-
M.¹, BOUTIN C.¹, FORQUET N.¹**

¹ IRSTEA, UR REVERSAAL, 5 rue de la Doua - BP 32108, 69616, Villeurbanne Cedex, France (remi.clement@irstea.fr)

² IRSTEA, UR HBAN, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, F-92761 Antony, France

RÉSUMÉ

Les eaux usées traitées alimentant de nombreuses ZRV s'infiltrent naturellement dans le sol, ce qui pose de nombreuses questions techniques. Il existe une connaissance limitée sur l'impact des eaux traitées sur le sol, particulièrement sur la capacité d'infiltration. C'est pour cette raison que nous avons étudié l'utilisation combinée de l'ERT et du traçage salin pour suivre l'évolution temporelle de l'infiltration durant 3 ans dans une ZRV. Cette méthode a permis d'identifier une évolution de la forme de la zone d'infiltration et indirectement une transformation du sol au cours du temps.

Mots clés : suivi temporel, zones de rejets végétalisées, eaux usées traitées, sol, ERT, traçage

**INFILTRATION OF TREATED WASTEWATER IN A SOIL-BASED
TREATMENT WETLANDS**

ABSTRACT

Most of treated wastewater flowing through soil-based tertiary treatment wetlands naturally infiltrates. It raises several concerns regarding the impact of treated wastewater on soil properties, especially on the infiltration capacity. This study aims at temporally monitoring of the infiltration capacity using time-lapse Electrical Resistivity Tomography (ERT) in combination with a saline tracer for contrast enhancing. Experiments were carried out over a 3-years period. Results highlight that the shape of the infiltration zone had changed.

Key words: Time-lapse monitoring, soil-based treatment wetland, wastewater

.1 INTRODUCTION

Les zones de rejet végétalisée (ZRV) sont des aménagements à faible coût, utilisant généralement un sol en place. Elles sont implantées à l'aval des stations d'épuration en vue de limiter le flux de polluants et les rejets directs dans le milieu récepteur. On recense 500 ZRV construites ces 15 dernières années en

France. Ces ZRV sont dimensionnées avec une connaissance limitée du comportement dans le temps des paramètres hydrauliques (*i.e.* capacité d'infiltration) (Forquet et al., 2014, Petitjean et al., 2015). En effet, selon la charge hydraulique appliquée, la qualité des effluents traités (teneur en matière organique et teneur en Matière En Suspension (MES)), l'infiltration de l'effluent traité peut conduire à un colmatage du sol. L'évaluation de la présence ou l'absence de colmatage est essentielle pour la définition de stratégies d'alimentation en eau pour optimiser le fonctionnement de la ZRV. L'utilisation de mesures hydrologiques classiques, (mesures de perméabilité, teneur en eau) ont l'avantage d'être des mesures précises, mais ces mesures ont une représentativité limitée dans l'espace et un caractère destructeur. Il est également possible d'élaborer des bilans hydriques réguliers en estimant les flux entrants et sortants, la différence étant affectée à l'infiltration et à l'évaporation. Mais entre ces deux échelles de mesure, il y a un manque d'outils de mesure à l'échelle intermédiaire. En géophysique, la mise au point récente de la tomographie de résistivité électrique (ERT) permet d'obtenir des informations 2D dans le temps sur l'évolution de la forme de l'infiltration. Le contraste peut être amélioré par l'utilisation d'un traceur salin ce qui est particulièrement utile lorsque le sol est saturé en eau. Nous avons réalisé 4 suivis temporels entre 2014 et 2016. Le présent article vise à démontrer l'avantage de l'ERT pour l'étude de l'évolution des capacités d'infiltration d'un sol recevant des pollutions résiduelles

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Description du site expérimental

Le site expérimental (480 m³/jour) a été spécifiquement construit dans le cadre du projet ONEMA/AFB ZRV (<https://zrv.irstea.fr/>) à proximité de la station d'épuration de Clos de Hilde (Bègles, 33). L'investigation a porté sur 2 pilotes « fossé » de 80 m construits sur sol en place (remblais) et plantés de roseaux. Chaque fossé dispose d'une alimentation indépendante :i) soit du rejet direct de la station d'épuration, ii) soit du rejet de la station d'épuration complété par un filtre planté de roseaux vertical. Les concentrations en MES dans les fossés 1 et 2 varient eon une valeur <3 mg/L et entre 7 et 14mg/L, respectivement.

2.2. Méthodologie générale

Dans les ZRV, l'apport des eaux usées traitées sur le sol, est continue ce qui sature le sol. La saturation du sol contribuant majoritairement au signal de la résistivité électrique, l'évolution de l'infiltration ne sera pas détectable dans ces conditions. Les phénomènes en jeu pouvant modifier le sol lorsque l'on injecte des eaux usées traitées sont généralement longs. Nous avons opté pour un suivi discontinu durant plusieurs années, avec des injections ponctuelles de traceur salin (bromure de potassium) pour créer un contraste suffisant entre l'eau s'infiltrant et l'eau déjà présente dans le sol (Fig.1).

2.3. Suivi géophysique et injection du traceur salin

48 électrodes ont été installées dans 4 micro-forages. Les forages sont espacés de 0,85 m. Deux forages ont été installés de chaque côté du fossé (largeur du fossé de 1,10 m). Les électrodes sont fixées sur un dispositif en PVC permettant une acquisition 2D de 217 quadripôles (dipôle-dipôle, et dipôle-dipôle inter-forage).

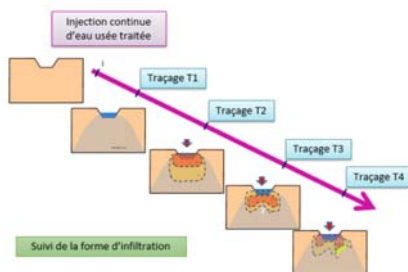


Fig. 1 – Méthodologie générale : suivi théorique de la forme d'une infiltration évoluant en fonction du colmatage



Fig. 2 – Dispositif de mesure de résistivité électrique autour du fossé d'injection (vue année 0, avant développement des végétaux)

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un résistivimètre SYSCAL PRO 48 électrodes (Iris Instrument). L'acquisition avait une durée inférieure à 4 min (250 ms par quadripôle, 1 répétition). L'ensemble des inversions a été réalisé avec le logiciel BERT (Günther and Rücker, 2010) en 2D en intégrant la forme du fossé la position des électrodes enterrées et le niveau d'eau dans le fossé. Il n'était pas possible d'injecter du traceur salin sur toute la longueur des fossés. Nous avons isolé 6 m de fossé où nous avons réalisé les expérimentations (3 m en aval du dispositif ERT et 3 m en amont). Le traçage a été réalisé par l'apport d'une bûchée d'eau de 0.68 m^3 à $5000 \mu\text{s/cm}$ soit une eau 5 fois plus conductrice que l'eau traitée apportée en continue. La diminution de la hauteur d'eau dans le fossé a été enregistrée par un capteur de pression et intégrée dans les inversions ERT.

.3 RESULTATS

Les premières injections d'eau usée traitée sur les deux fossés, ont démarré en juin 2015. Les expérimentations suivantes ont été réalisées en mars 2016, juillet 2016, octobre 2017 et mai 2018. Les résultats du traçage et de l'infiltration montrent aucune infiltration dans le fossé n°2 (et ne sont pas présentées). Dans le fossé n°1, nous avons observé des infiltrations de l'ordre de 7 à 12 mm/h, avec une certaine stabilité de cette capacité d'infiltration tout au long du suivi. Du point de vue géophysique, on observe des modifications non-négligeables de la forme de l'infiltration dans le temps (Fig.3). La première image sans végétation montre une forme d'infiltration sphérique, puis les images se déforment dans le temps, ce qui traduit bien une évolution du sol sous le fossé n°1. Entre les deux fossés, la seule différence est le type d'eau qui est injecté. On suppose que rapidement le fossé n°2 s'est colmaté, ne permettant plus l'infiltration d'eau.

Après les expérimentations, nous avons réalisé des fosses pédologiques. Elles montrent que le fossé n°2 présente une quantité importante de boue en son fond et que les racines des roseaux sont cantonnées au premier centimètre sous le fossé. Dans le cas du fossé n°1, les racines des roseaux se sont propagées dans le sol et nous émettons l'hypothèse que le type d'eau (dont l'absence d'un apport très rapide de boues avant un établissement des roseaux)) a influencé le développement racinaire de la végétation favorisant le maintien de l'infiltration sur la parcelle.

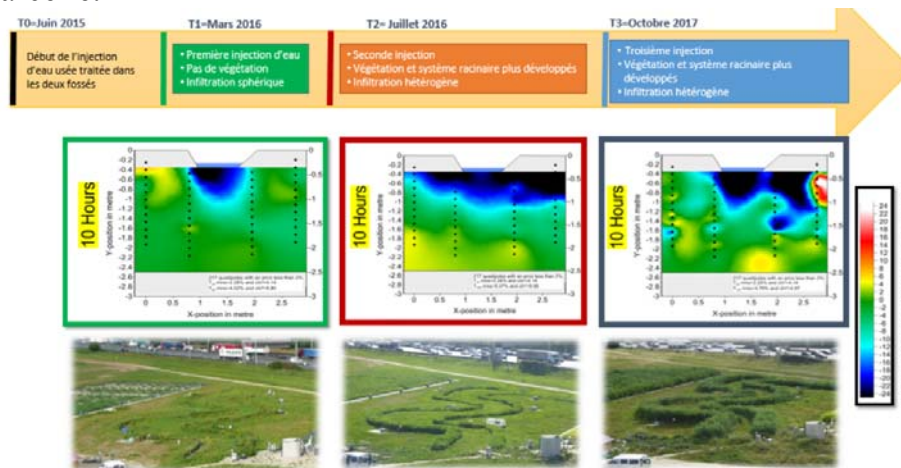


Fig. 3 – Résultats des différentes campagnes de mesure après 10h d'infiltration

.4 CONCLUSIONS

L'ERT a permis de suivre la forme de l'infiltration sous deux fossés alimentés en continue et montrer l'impact de la végétation en fonction du type d'eau. Il semble apparaitre une augmentation du volume de sol mouillé au cours du temps sous le fossé n°1. On peut émettre l'hypothèse que les racines ont favorisé le maintien de la capacité d'infiltration. Sur le fossé 2, on est en droit de s'interroger sur le fait que les rhizomes ne se sont développés uniquement dans la couche de dépôt suite au colmatage du fossé par un apport massif de boues.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FORQUET, N., PETITJEAN, A., BLOEM, E., AND BOUTIN, C., 2014, L'infiltration d'eau usée traitée dans le sol pour les ZRV : revue bibliographique, objectifs de l'étude, moyens et méthodes mis en œuvre.

GÜNTHER, T., AND RÜCKER, C., 2010, Boundless Electrical Resistivity Tomography BERT-the user tutorial: Leibniz Institute for Applied Geophysics, Hannover and Institute of Geology and Geophysics, University of Leipzig.

PETITJEAN, A., FORQUET, N., CHOUBERT, J.-M., COQUERY, M., BOUYER, M., BOUTIN, C., 2015. Land characterization for soil-based constructed wetlands : Adapting investigation methods to design objectives. Water Practice & Technology 10(4): 660-668.

DEVELOPPEMENT D'UN RESISTIVIMETRE 4 ELECTRODES « LOW-COST » SUR BASE D'UNE PLATEFORME ARDUINO

CLEMENT R.¹, AUBERT J.¹., DUBOIS V.¹., FORQUET N.¹.

¹ IRSTEA, UR MALY, 5 rue de la Doua - BP 32108, 69616, Villeurbanne Cedex, France (remi.clement@irstea.fr)

RÉSUMÉ

Le développement de la tomographie de résistivité électrique et notamment l'amélioration des outils de traitement en suivi temporel, rend la méthode de plus en plus attractive pour le suivi de pilote de laboratoire. Cependant il existe peu d'équipements adaptés aux études en laboratoire en suivi continu. L'objectif de l'article est de présenter les premiers essais de développement d'un résistivimètre sur la base d'une plateforme de développement Arduino. Le système développé présente l'avantage d'avoir un coût faible et d'être facilement contrôlé par différents types de capteurs externes.

Mots clés : Arduino, résistivité électrique, open-source.

ABSTRACT

Development of electrical resistivity tomography and including improving treatment in time-lapse monitoring tools, makes the method more in more attractive for the laboratory application. However there are few adapted facilities to laboratory in time-lapse studies. The purpose of the article is to present the first tests of development of a resistivimeter based on Arduino development platform. The developed system has the advantage to have a low cost and easily be controlled by different types of external sensor. Titre traduit en anglais

Key words: Arduino, electrical resistivity, open-source

.1 INTRODUCTION

Ces 25 dernières années la méthode de tomographie de résistivité électrique (ERT) a énormément progressé. Les équipements de mesures ont évolué, avec des résolutions, des sensibilités, des vitesses d'acquisition de plus en plus importantes liés à l'apparition des dispositifs multicanaux. L'ERT s'est énormément généralisée avec une vaste plage d'applications : i) recherches minières, ii) hydrogéologie, iii) contamination des sols, iv) étude de méthaniseur, v) caractérisation de champs de bulle en colonne. Ces applications sont multi-échelle et d'une représentation centimétrique au laboratoire à kilométrique sur le terrain ; c'est d'ailleurs une des forces de la méthode. Cette multiplicité d'application est rendue possible par la qualité des outils commerciaux présents

sur le marché qui sont flexibles (Dahlin, 2001). Dans le domaine de l'environnement, les suivis temporels géophysiques sont devenus clef (Clément et al., 2009). D'abord appliqués à l'étude de phénomènes de courte durée, on voit de plus en plus apparaître des suivis temporels « long-terme », qui nécessitent de mobiliser des équipements sur de longues durées ce qui n'est pas toujours possible. C'est entre autres pour cette raison que nous avons envisagé de développer un appareil de recherche. D'autre part pour bien suivre les phénomènes, nous souhaitons disposer de mesures contrôlées par le temps et des mesures contrôlées par des capteurs externes. Cette combinaison permettra aussi de limiter les quantités de données inutiles et d'obtenir des mesures décrivant mieux les phénomènes. La question était de savoir comment développer un équipement de recherche robuste et pour un coût limité. Les plateformes open source pour le développement en électronique sont devenues très populaires, dans l'ingénierie et la recherche scientifique ces dernières années. Parmi l'ensemble des plateformes disponibles, Arduino est l'une des plus en vue et des moins chères. Cet article présente un premier essai d'implémentation de carte Arduino pour le développement d'un petit résistivimètre pour des applications de recherche en laboratoire. Nous montrerons les prémices de l'implémentation, les premières applications, les limites d'utilisation et les futures améliorations possibles de cet appareil que nous nommerons « Ohmuino ».

.2 NOS MOTIVATIONS

Dans le cadre des travaux menés à IRSTEA au laboratoire sur les filtres plantés de réseau, les centres de stockages de déchets ou les zones de rejets végétalisées. Nous avons besoin de réaliser des suivis continus sur des petits pilotes et de pouvoir multiplier les équipements de mesure pour avoir des séries de données continues. D'autre part, ces expérimentations nécessitent d'être contrôlées en fonction de paramètres extérieurs comme la température, la pression ou la teneur en eau. Ces capteurs sont aujourd'hui disponibles et compatibles avec l'ensemble des outils Arduino. Nos motivations à utiliser les plateformes de développement Arduino résident dans le fait qu'elles bénéficient de développement de code gratuit et de module compatible pour l'ensemble des besoins de l'ERT. On notera aussi que ces 5 dernières années les articles scientifiques utilisant des cartes « open-source » ont explosé dans la littérature. Enfin les milieux étudiés ont la particularité d'avoir des résistivités incluses entre 2 et 250 Ohm.m généralement, avec des résistances de contact faibles, souvent inférieur à 0.3 Kohm. Dans ces conditions et pour des faibles espacements, il apparaît que l'appareil n'a pas besoin de beaucoup de puissance, pour réaliser des mesures adaptées.

.3 DEVELOPPEMENT DU RESISTIVIMETRE

3.1. Schéma de fonction

Classiquement un résistivimètre doit être composé d'un certain nombre de fonctionnalités pour réaliser les mesures (fig.1). Tout d'abord le cœur du résistivimètre se compose d'un CPU, c'est lui qui va gérer toute la fonctionnalité de l'appareil (déclenchement de la mesure, stockage des données, gestion temporelle). Il sera nécessaire que l'appareil puisse disposer d'un système d'horodatage des données et de stockage, il faudra donc une horloge interne et une carte mémoire par exemple pour stocker les données. Il est nécessaire de disposer d'une alimentation pour injecter du courant dans le système et enfin d'un voltmètre et d'un ampèremètre destinés à la mesure de la résistivité électrique.

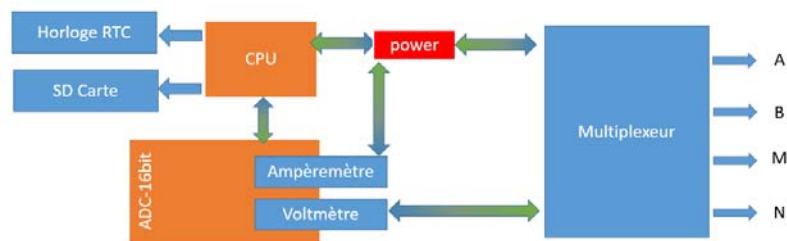


Fig.1 schéma de principe de fonctionnement d'un résistivimètre

3.2. Description des éléments implémentés

Pour contrôler notre appareil (4 électrodes pour le moment) nous avons retenu une carte Arduino Due combinée à un certain nombre de modules. Pour horodater les données nous avons utilisé un Module RTC (real time clock) DS1302. Pour le stockage de données, nous avons retenu un « bouclier » Velleman VMA 202, permettant un stockage sur Carte SD. Pour l'alimentation de courant, nous utilisons une alimentation de laboratoire en 12V. En ce qui concerne les mesures de voltage et d'ampérage (réalisées autour d'une résistance de précision), la carte Arduino présente un défaut majeur pour la mesure de résistivité électrique. En effet, elle permet des mesures de tension analogique sur des plages 0-5 volt et avec une résolution de 10-bit, ce qui fait une résolution de 4.88 mv sur un signal 0-5 V. Dans notre cas, les mesures sont réalisées dans une gamme comprise entre 0 et 12v proportionnelle à notre alimentation. Il faut donc dans un premier temps diminuer le signal proportionnellement à notre gamme de mesure. Ensuite pour gagner en résolution nous avons utilisé, un module convertisseur extérieur ADS1115 (16-bit sur une plage 0-5 V, pour une résolution de 71 μ V). Pour l'injection de courant, elle est activée par une carte relai, « Saint-Smart four channel » permettant une inversion du courant électrique. Cette inversion permet de limiter l'effet de polarisation des électrodes (la correction est appliquée numériquement). Dans la conception de l'équipement des masses sont connectées entre elles et reliées à l'électrode B qui devient l'électrode de référence des mesures. La séquence de mesure de la plateforme Arduino se compose de : i) Injection de courant (selon un délai choisi), ii)

Mesure de potentiel après un certain délai, iii) Arrêt de l'injection de courant et attente proportionnelle au temps d'injection, iv) Injection inversée v) Mesure de potentiel, vi) Arrêt injection de courant, vii) Correction des effets de polarisation, viii) Calcul de la résistivité électrique, ix) Écriture et stockage des données.

.4 PREMIERS ESSAIS

Les premiers essais de mesure ont été réalisés sur un filtre planté de roseaux. Les mesures ont été comparées à des mesures réalisées en différents points du filtre avec notre équipement et un appareil commercial (Fig.2). Les mesures montrent une excellente corrélation entre les mesures Arduino et les mesures de références. Les mesures ne sont pas encore parfaites, si l'on considère la corrélation actuelle, mais les futurs développements et l'optimisation numérique possible (répétition, filtre) devraient permettre d'améliorer l'outil. Dans un futur proche l'objectif est de rendre publics les développements pour offrir une base collaborative aux instituts de recherche autour de ces outils.

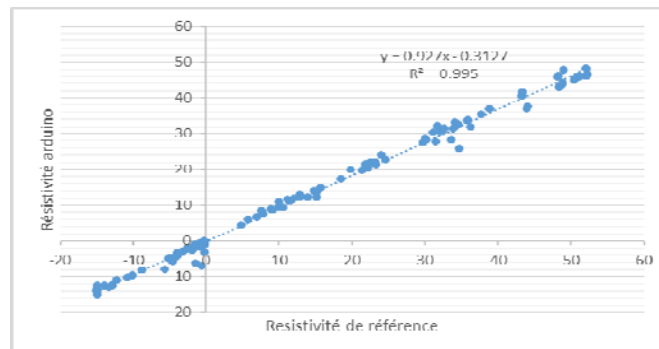


Fig .2 :Corrélation entre les mesures arduino et les mesures de références

.5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'utilisation de carte Arduino n'est pas encore parfaite, mais laisse entrevoir des perspectives à court terme d'utilisation. D'autant plus qu'une utilisation avec plusieurs électrodes est déjà possible au travers de cartes relai compatibles à interfacer avec les cartes Arduino. Cet outil présente une bonne opportunité pour des expérimentations en laboratoire sur les milieux conducteurs. L'objectif sera de mettre en ligne les schémas et des codes dans un délai raisonnable, avec la possibilité d'une base ouverte disponible et évolutive par la communauté.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CLEMENT, R., DESCLOITRES, M., GUNTHER, T., RIBOLZI, O., AND LEGCHENKO, A., 2009, Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT: Experience of advanced interpretation: *Comptes Rendus Geoscience*, v. 341, no. 10–11, p. 886–898.
- DAHLIN, T., 2001, The development of DC resistivity imaging techniques: *Computers & Geosciences*, v. 27, no. 9, p. 1019–1029.

MODELISATION GEOLOGIQUE 3D DES FALAISES DES VACHES NOIRES, BASSES NORMANDIE

HASSEN I.¹, FAUCHARD C.¹, ANTOINE. R.¹, MAQUAIRE.O.², COSTA.S.²,
ROULLAND.T.², DUGUE. O.³

¹ Cerema, Equipe-projet ENDSUM, 10, chemin de la Poudrière, CS90241, 76121 Le Grand Quevilly, France

² Normandie Univ, Unicaen, CNRS, UMR LETG-Caen, 14000, Caen, France

³ Normandie Univ, Unicaen, CNRS, UMR M2C-Caen, 14000, Caen, France

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de créer un modèle géologique et structurel des falaises des Vaches Noires, à l'aide du logiciel GeoModeller 3D, et des nombreuses données géologiques issues de la bibliographie. Ce travail sur ce site remarquable situé entre Villers-sur-Mer et Houlgate (Normandie, France), permet de visualiser la géologie, le réseau de failles et de comprendre son système hydrologique à une échelle régionale. Il mène en particulier à une première quantification des volumes des couches géologiques étudiées. Le modèle obtenu peut être facilement actualisé au fur et à mesure de la production de nouvelles données géologiques et géophysiques. Dans une étape ultérieure, ce dernier constitue la base d'un modèle géophysique 3D qui sera traité une fois le modèle géologique est validé. Il permettra enfin la création d'un modèle géophysique 3D à l'échelle hectométrique et, ainsi, d'avoir un modèle géologique et géophysique complémentaire menant à une meilleure analyse de l'érosion observée sur le site des falaises des Vaches Noires.

Mots clés : Falaises, Vaches Noires, Modèle géologique 3D, GeoModeller

ABSTRACT

3D GEOLOGICAL MODELING OF THE VACHES NOIRES CLIFFS IN LOW NORMANDY, FRANCE

The challenge of this study was to create a 3D geological and structural model of the Vaches Noires Cliffs (Normandy, France). This was achieved using GeoModeller 3D, taking into account the available geological data. A current model is presented which provides defendable predictions for the spatial distribution of geology throughout the model-domain. This work has allowed validation of regional scale geology and fault networks in the study area, and has facilitated the first-ever estimations of the volume of the geological units in this region by a 3D method. Once geophysical data become available, the current model can be easily edited and re-computed to provide an updated geological and geophysical model ready for the next stage of investigation by numerical flow modeling.

Key words: Vaches Noires cliffs, 3D geological model, GeoModeller

.1 INTRODUCTION

La modélisation géologique 3D est un outil de plus en plus utilisé qui permet de rassembler et de synthétiser toutes les données disponibles pour une meilleure représentation réaliste du contexte géologique. Son utilité a été démontrée à travers de nombreuses approches qui ont été largement discutées dans la littérature (Calcagno et al. 2008).

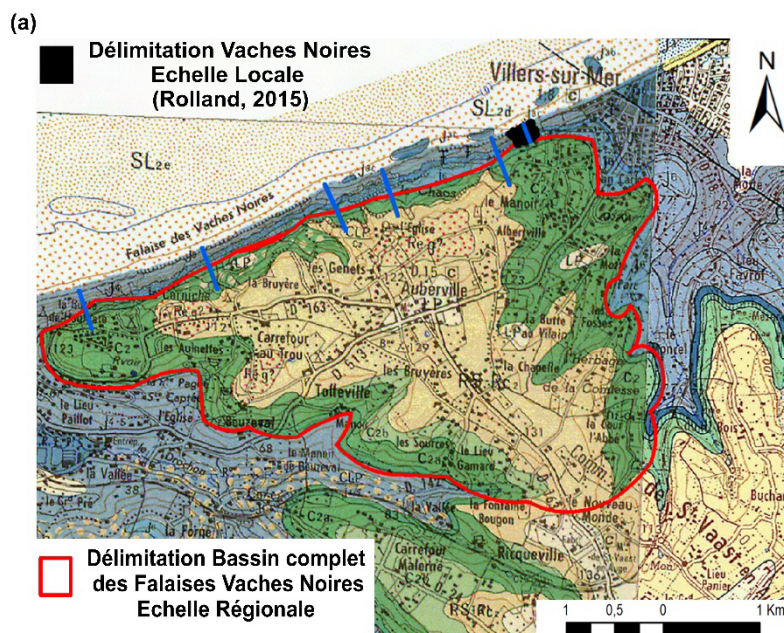
Jusqu'à présent, aucune application de la modélisation géologique 3D n'a été tentée sur les Falaises des Vaches Noires (Normandie, France, entre Houlgate et Villers-sur-Mer) à l'échelle régionale. Pour une meilleure compréhension du système géologique et hydrologique de ces falaises, la modélisation 3D a été appliquée pour : (1) extrapoler la carte géologique existante vers une carte géologique 3D, (2) évaluer la géométrie et les volumes des formations stratigraphiques pouvant également informer sur les ressources en eau disponibles. Nous pourrions ainsi fournir des éléments de réponse quant à l'impact de l'hydrologie, et notamment évaluer l'érosion sur le site étudié.

.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les falaises des Vaches Noires présentent une orientation NE-SO, parallèle à la mer. Elles appartiennent au plateau du Pays d'Auge qui s'intègre parfaitement dans le schéma topographique du Bassin parisien (Klein, 1975). Le climat y est maritime et tempéré, (température : 7 à 15 °C, précipitation annuelle moyenne : entre 700 et 900 mm). Elles se distinguent par l'originalité de leurs couches géologiques et leur morphologie complexe et chaotique (Maquaire et al., 2013).

Sur le plan géologique, ces falaises représentent un système multicouche allant du Jurassique au Crétacé, incluant un réservoir régional, la craie glauconieuse fissurée du Cénomaniens. Cette dernière comprend un aquifère profond, non confiné et perché, (niveau d'eau moyen : 100 m ; épaisseur moyenne : 50 m) (Elhai, 1983).

Les unités stratigraphiques sont décrites plus en détail dans la figure 1-b.



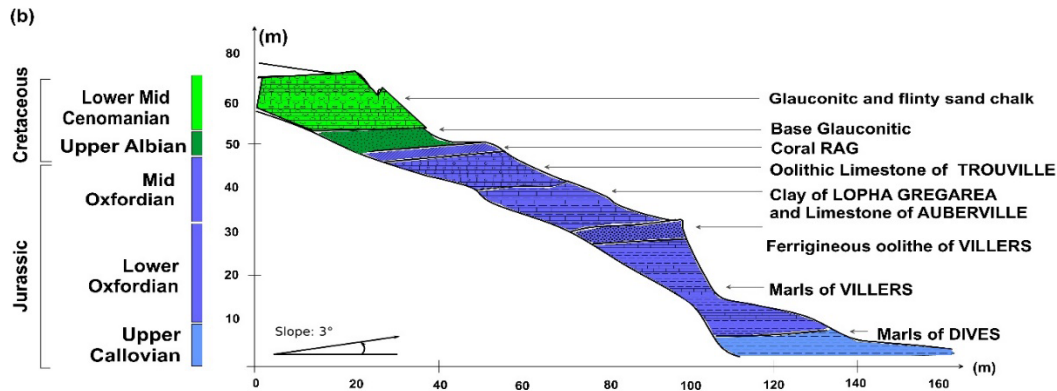


Fig. 1– (a) Carte géologique de la zone d'étude, (b) Coupe géologique du Bassin des Falaises des Vaches Noires

.3 MATERIELS ET METHODES

GeoModeller 3D est développé à l'origine par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et plus récemment par Intrepid Geophysics. GeoModeller 3D permet la construction de modèles géologiques et géophysiques 3D utilisant la méthode d'interpolation potentielle et le cokrigage (Lajaunie et al., 1997).

Plusieurs types de données géologiques (Banque du sous-sol, BRGM, ...) ont été collectés, tels que le modèle numérique de Terrain (MNT), les cartes géologiques, les coupes transversales, les fiches de forage et les différentes études antérieures.

Le modèle géologique 3D régional couvre une superficie de 6 km x 4.8 km, et s'étend sur une profondeur de 0.5 km. Le schéma stratigraphique adopté a été homogénéisé de manière à restituer les séquences géologiques les plus importantes. Le schéma stratigraphique est le suivant : i) formations superficielles, ii) Cénomaniens inférieurs à moyens, iii) Albien supérieur-Cénomaniens basaux, iv) Oxfordien et v) Callovo-oxfordien.

Le modèle géologique final respecte les contraintes géologiques disponibles et fournit des prévisions acceptables pour la lithologie et la structure partout dans l'espace du modèle.

.4 RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle tridimensionnel (figure 2) élaboré permet de visualiser l'architecture du bassin complet (volume et épaisseur des unités, Tab.1), de réaliser des coupes géologiques dans toutes les directions et en tout endroit et de suivre l'évolution en profondeur de l'aquifère de la craie du Crétacé et de toutes les couches géologiques à caractère glissant tel que les argiles de l'Albien.

Tab. 1 – Volume et épaisseur des unités stratigraphiques du site d'étude

Unités stratigraphiques	Volume (m ³)		Pourcentage (%)		Epaisseur (m)
	Echelle Régionale	Echelle Locale	Echelle Régionale	Echelle Locale	
Cénomaniens Inf. A Moy.	5.38 10 ⁸	4.17 10 ⁵	18	2.5	15-30
Albien Sup. -Cénomaniens Basaux	3.41 10 ⁸	4.95 10 ⁵	12	3.75	5
Oxfordien	1.15 10 ⁹	4.8 10 ⁵	36	26.4	25-35
Callovo-Oxfordien	5.21 10 ⁸	5.2 10 ⁵	12	33	10

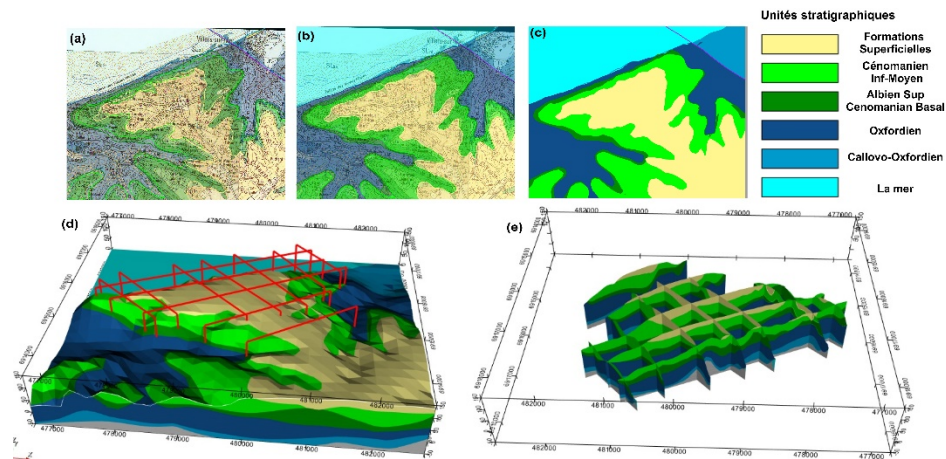


Fig. 2 – (a) : carte géologique de la zone d'étude ; (b) construction des limites géologiques ; (c) calage de la carte géologique finale (D) Modèle géologique 3D final ; (E) coupes géologiques

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La modélisation géologique à l'aide de GeoModeller 3D permet de mieux représenter et comprendre la géométrie des différentes couches géologiques à l'échelle du bassin étudié (Pays d'Auge). Elle intègre aisément l'ensemble des nouvelles données que l'on peut apporter localement (à l'échelle des falaises des Vaches Noires par exemple) comme régionalement (données bibliographiques, sondages, campagnes de mesures satellites et aériennes...). Cette approche permettra dans une étape ultérieure d'affiner la modélisation géophysique 3D grâce à des mesures terrestres et aériennes locales qui seront très prochainement prises en compte. Elle devrait aussi permettre de mieux comprendre les processus hydrologiques accélérateurs de l'érosion observée sur les falaises des Vaches Noires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Calcagno P., Chile's J.P., Courrioux G., Guillen A., 2008-** Geological modeling from field data and geological knowledge. *Phys. Earth Planet Int.*, 171, 147–157.
- Elhai H., 1983-** La Normandie occidentale : entre la Seine et le golfe Normand-Breton. Etude morphologique. *Thèse Etat, Univ. Sorbonne, Paris, 581p.*
- KLEIN C., 1975-** Massif Armoricain et Bassin Parisien : Contribution à l'étude géologique et géomorphologique d'un massif ancien et de ses enveloppes sédimentaires, Normandie, Maine, Anjou, Touraine, Poitou Septentrionale et contrées Adjacentes. *Press. Univ. Strasbourg, France, 882p.*
- Lajaunie C., Courrioux G., Manual L., 1997-** Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Math. Geol.*, 18, 571–584.
- Maquaire O., Afchain P., Launay A., Costa S., Lissak C., Fressard M., Letoru P., Davidson R., Thierry Y., 2013-** Evolution à long terme des falaises des Vaches Noires et occurrence des glissements (Calvados, Basse-Normandie, France). *JAG 2013, Troisième journée Aléas Gravitaires, Grenoble, France, 7p.*

SUIVI GEOELECTRIQUE D'UN DECHET MENAGER AU COURS DE SA BIODEGRADATION A L'ECHELLE DU LABORATOIRE

JOUEN T.¹, CLEMENT R.², MAZEAS L.¹, LOISEL S.³, MOREAU S.¹

¹IRSTEA, Hydrosystèmes et Bioprocédés Antony, HBAN, 1 rue Pierre Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex, France.

²IRSTEA, REVERSAAL, 5 rue de la Doua, CS 20244, F-69626 Villeurbanne Cedex, France.

³SAS Les Champs Jouault, Directeur général
Corresponding author: thomas.jouen@irstea.fr

RÉSUMÉ

Afin de déterminer si trois méthodes géoélectriques, la résistivité électrique, la polarisation provoquée temporelle et la polarisation provoquée spectrale, peuvent être utilisées pour suivre l'évolution de la biodégradation des déchets dans le temps, quatre cellules expérimentales ont été développées, permettant un suivi géophysique tout au long du processus de biodégradation d'un déchet. La surveillance géoélectrique mise en place montre que (1) la résistivité semble être principalement influencée par la teneur en eau mais pourrait servir d'indicateur qualitatif de la saturation des déchets (2) les mesures de chargeabilité et de déphasage augmentent parallèlement à la diminution de la densité des déchets lors de la biodégradation. Les méthodes de polarisation provoquée semblent donc être prometteuses pour suivre l'évolution de la biodégradation d'un massif de déchets

Mots clés : Biodégradation de déchets, résistivité électrique, polarisation provoquée, suivi géoélectrique.

ABSTRACT

GEOELECTRICAL MONITORING DURING HOUSEHOLD WASTE BIODEGRADATION PROCESS AT LABORATORY SCALE

In order to determine whether three geoelectrical methods, electrical resistivity, time domain induced polarization and spectral induced polarization, can be used to monitor the evolution of waste biodegradation over time, four experimental cells were developed allowing geophysical monitoring during the entire process of waste biodegradation. The implemented geoelectrical monitoring show that (1) the resistivity seems mainly influenced by the water content but could be used as a qualitative indicator of the waste saturation (2) an increase of chargeability and phase shift measurements in parallel with the decrease in the density of the waste during biodegradation. Induced polarization methods therefore seem promising to monitor evolution of waste mass biodegradation

Key words: Waste biodegradation, Electrical resistivity, Induced polarization, Geoelectrical monitoring.

.1 INTRODUCTION

En France, le mode de gestion des déchets ménagers le plus utilisé est le stockage, à hauteur de 37%. Les déchets ainsi stockés sont envoyés dans des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) qui, autrefois exploitées comme de

simples fosses de remplissage, constituent aujourd'hui des ouvrages de plus en plus complexes dont l'objectif est de réduire l'impact environnemental et de valoriser énergétiquement le biogaz produit. Depuis les années 90, un autre mode de gestion est apparue, le bioréacteur, basé sur la réinjection des liquides de percolation s'écoulant dans le déchet, appelés lixiviats, et collectés en fond de casier afin d'accélérer et augmenter la production de biogaz permettant ainsi au massif de déchets de se stabiliser plus rapidement. Cependant le mode bioréacteur ne permet pas de placer l'ensemble d'un massif de déchets dans des conditions optimales pour la biodégradation. Apparaissent donc aujourd'hui de nouveaux enjeux pour les ISDND liés à l'évolution de l'état de biodégradation des massifs de déchets. Les outils actuels donnés par le ministère de l'environnement pour justifier de la stabilisation d'un casier de déchet, que sont le suivi de la production de biogaz et des lixiviats ne donnent qu'une information globale de l'avancée de la biodégradation pour l'ensemble du casier de déchets et ne peuvent pas traduire la complexité des massifs de déchet. Il y aurait un intérêt significatif de disposer d'une méthode de mesure permettant d'apporter des informations sur l'évolution de la biodégradation d'un massif de déchet et ce de manière distribuée. La géophysique, depuis des années appliquées sur les ISDND, et notamment les méthodes électriques qui sont les plus utilisées sur site (Clément et al., 2010; Gazoty, et al., 2012), mais aussi pour caractériser les processus de biodégradation d'un milieu (Atekwana & Slater, 2013), pourrait répondre à ce besoin. Dans la plupart des études biogéophysiques l'évolution et l'interprétation des signaux géophysiques au cours de la biodégradation d'un milieu ne sont pas encore bien établis. Pour cette raison le suivi de mesure est généralement réalisé sur des colonnes expérimentales à l'échelle du laboratoire et dans des conditions contrôlées. On propose donc ici de travailler en laboratoire avec des colonnes contenant des déchets non dégradés dans des conditions expérimentales définies. L'objectif de ce travail est d'étudier le potentiel de trois méthodes électriques, la résistivité électrique, la polarisation provoquée temporelle (PPT) et la polarisation provoquée spectrale (PPS), pour suivre l'évolution des paramètres bio-physico-chimiques au cours de la biodégradation des déchets et ce à l'échelle du laboratoire.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Afin d'évaluer le potentiel et les limites des méthodes géophysiques choisies, quatre colonnes expérimentales ont été développées contenant 875 g de déchets ménagers reconstitués broyé à une granulométrie de 10 mm afin d'être le plus homogène possible. Deux colonnes ont été saturées en eau et deux autres placées à capacité au champ, plus proche des conditions de terrain. Toutes les colonnes ont ensuite été placées à 35°C afin d'accélérer le processus de biodégradation. Les colonnes sont en plexiglas incolore (PMMA) afin d'éviter toute influence sur les mesures électriques. La Fig. 1 présente une des colonnes expérimentales mise en place ainsi qu'un schéma de principe. Les colonnes sont équipées de deux paires d'électrodes de mesure, une paire d'électrode non polarisable de type Cu/CuSO₄ faites à la main, et une paire inox.

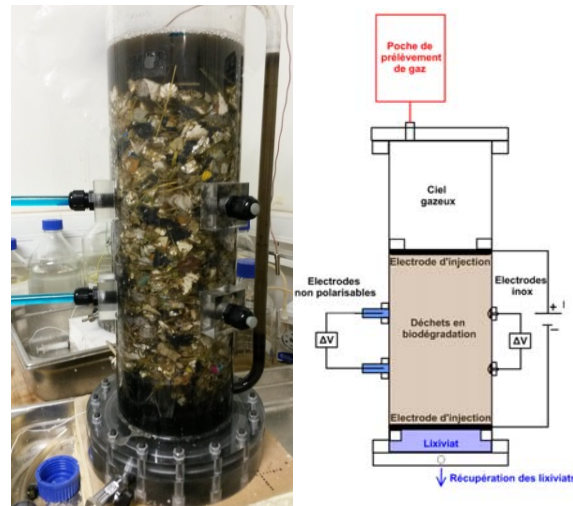


Fig. 1 : a) photo d'une cellule de déchet b) schéma du principe expérimental

L'injection de courant est réalisée avec des plaques circulaires en inox situées en dessous et au-dessus de la colonne de déchets. Un sac de prélèvement de gaz placé au-dessus des colonnes permet de récupérer le biogaz produit. Un dispositif de collecte de lixiviat permettra d'analyser le pH et la concentration en acides gras volatils.

Les mesures de résistivité et de chargeabilité ont été réalisées à l'aide d'un Syscal pro (IRIS Instruments) avec un temps d'injection de 1 s, l'utilisation du mode save energy qui permet de minimiser l'injection de courant et les risques de perturbations des micro-organismes, et un échantillonnage de la courbe de décroissance réalisé sur les 20 fenêtres avec un écartement semi-logarithmique. Les mesures de résistivité complexe sont réalisées avec un potentiostat, le VMP3 de Biologic, entre 50 mHz et 20 kHz avec 5 points d'échantillonnage par décade. Les mesures sont issues de la moyenne de 100 répétitions par fréquence de mesure.

.3 RESULTATS

La FIG. 2 présente l'évolution des trois méthodes géoélectriques retenues au cours de la biodégradation d'une des colonnes de déchets placées à capacité au champ. Sur la Fig. 2.a on peut voir que la résistivité de la colonne augmente progressivement de 30 ohm.m à 47 ohm.m du jour 30 au jour 100, pour une variation de 0.23 à 0.18 m³/m³ de teneur en eau. La mesure oscille ensuite entre 45 et 52 ohm.m jusqu'à la fin du suivi, et la teneur en eau se stabilise sur la même période à 0.16 m³/m³. Sur la Fig. 2.b on peut voir que la chargeabilité, déduite des mesures PPT, passe progressivement de 1.5 mV/V à 25 mV/V du jour 40 au jour 250. Sur cette même période la densité diminue de façon continue et passe de 0.228 à 0.22. La chargeabilité comme la densité se stabilise ensuite sur le reste du suivi. Sur la Fig. 2.c on peut voir que le déphasage, déduit des mesures PPS, passe progressivement de 0 à -45 mrad du jour 40 au jour 250. Sur cette même période la densité diminue de façon continue et passe de 0.228 à 0.22. Le déphasage comme la densité se stabilise ensuite sur le reste du suivi. La résistivité semble augmenter parallèlement à la diminution de teneur en eau du déchet contrairement aux mesures de chargeabilité et déphasage qui augmentent parallèlement à la diminution de la densité au cours de la biodégradation.

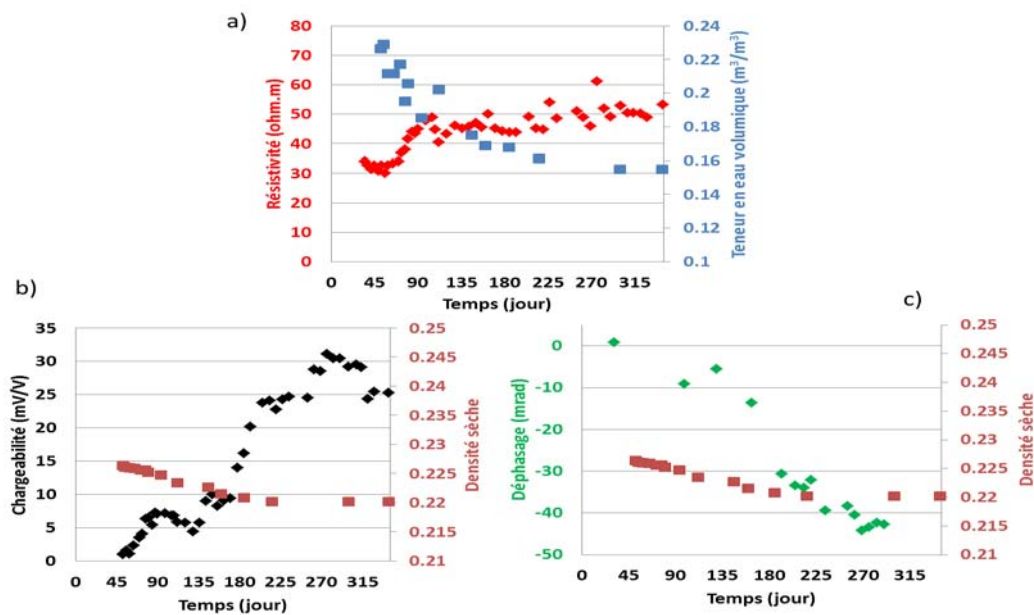


Fig. 2 : Suivi géoélectrique d’une colonne à capacité au champ : évolution de la résistivité (a) la chargeabilité (b) et du déphasage (c) associée aux paramètres de teneur en eau et de densité au cours de la biodégradation du déchet

.4 CONCLUSIONS

Le suivi géoélectrique d’un déchet au cours de sa biodégradation a premièrement confirmé que la résistivité semblait principalement influencée par la teneur en eau dans le déchet. Les mesures de polarisation provoquée, plus particulièrement la chargeabilité et le déphasage, augmentent au cours de la biodégradation du déchet que ce soit à saturation ou à capacité au champ. Cette augmentation évolue parallèlement à la diminution de la densité du déchet au cours de la biodégradation ou à l’augmentation de sa porosité. En effet la consommation de la matière organique par les micro-organismes entraîne une augmentation de la porosité et une diminution de la densité, ce qui pourrait se traduire par une augmentation de la surface polarisable totale du déchet et ainsi augmenter la chargeabilité et le déphasage. Les méthodes de polarisation provoquée semblent donc prometteuses pour suivre la biodégradation d’un massif de déchets.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atekwana, E. a., & Slater, L. D. (2013). Geophysical Signatures of Subsurface Microbial Processes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(8), 77–84.
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L., Morra, C., Laurent, J.-P., & Gourc, J.-P. (2010). Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Management*, 30(3), 452–64. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.002>
- 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(1957), 575–586. <http://doi.org/10.3997/1873-0604.2012046>

APPORT DE LA CAMPAGNE GEOPHYSIQUE 2017-2018 SUR LE SITE EXPERIMENTAL HYDROGEOLOGIQUE DE UNILASALLE (BEAUVAIS, 60)

LUTZ P., ZOUHRI L., GOUJON M., MEURANT PE.

AGHYLE, SFR Condorcet FR CNRS 3417, Institut Polytechnique UniLaSalle
Beauvais, 19 Rue Pierre Waguet, 60000 Beauvais, France
pascale.lutz@unilasalle.fr ; lahcen.zouhri@unilasalle.fr ; michael.goujon@unilasalle.fr ; pierre-evan.meurant@unilasalle.fr

RÉSUMÉ

Devant la nécessité de caractériser et d'étudier le comportement hydrogéologique de l'aquifère de la craie, l'Institut Polytechnique UniLaSalle s'est doté d'un site expérimental hydrogéologique. Ce dernier, composé d'une vingtaine de piézomètres et forages fait l'objet de mesures hydrogéologiques et hydro-géophysiques (tomographie électrique et sondage par Résonance Magnétique des Protons (RMP)) depuis une dizaine d'années.

Les mesures de la campagne 2017-2018, réalisées à différentes périodes de l'année et sur un plus grand secteur d'étude qu'auparavant, permettent d'améliorer les connaissances sur les paramètres hydrogéologiques de l'aquifère de la craie et leurs variations spatio-temporelles.

Mots clés : *aquifère de la craie, tomographie électrique, sondage RMP, site expérimental hydrogéologique, teneur en eau, perméabilité, transmissivité.*

ABSTRACT

CONTRIBUTION OF THE 2017-2018 GEOPHYSICAL CAMPAIGN ON THE EXPERIMENTAL HYDROGEOLOGICAL SITE (UNILASALLE, BEAUVAIS, 60)

Regarding the need to characterize and study the hydrogeological behavior of the chalk aquifer, the UniLaSalle Polytechnic Institute developed an experimental hydrogeological site. It consists of about twenty piezometers and boreholes and is used for hydro-geophysical monitoring (electrical resistivity tomography and Magnetic Resonance Soundings (MRS)) for the last decade.

The measures of the 2017-2018 campaign, which were carried out at different times of the year and on a larger area than before, make it possible to improve the spatial and temporal knowledge of the hydrogeological parameters of the chalk aquifer.

Key words: *chalk aquifer, electrical tomography resistivity, MRS, experimental hydrogeological site, water content, permeability, transmissivity.*

.1 INTRODUCTION

L'augmentation des activités industrielles et agricoles dans l'Oise (60) ainsi que le développement de l'aéroport Beauvais-Tillé, nécessitent une bonne gestion des ressources en eau dans ce département. C'est pourquoi l'institut Polytechnique UniLaSalle s'est doté d'un site expérimental hydrogéologique. Ce dernier, localisé sur le campus UniLaSalle (**Fig.1a**), est constitué notamment de 14 piézomètres, 5 forages et 1 forage carotté de 110 m de profondeur (**Fig.1b**). Il permet ainsi, dans le cadre des activités de l'équipe de recherche AGHYLE de l'institut et de travaux d'élèves en formation (Ingénieurs ou Techniciens Supérieurs en « Sciences de la Terre et Environnement »), d'étudier l'aquifère de la craie depuis plusieurs années.

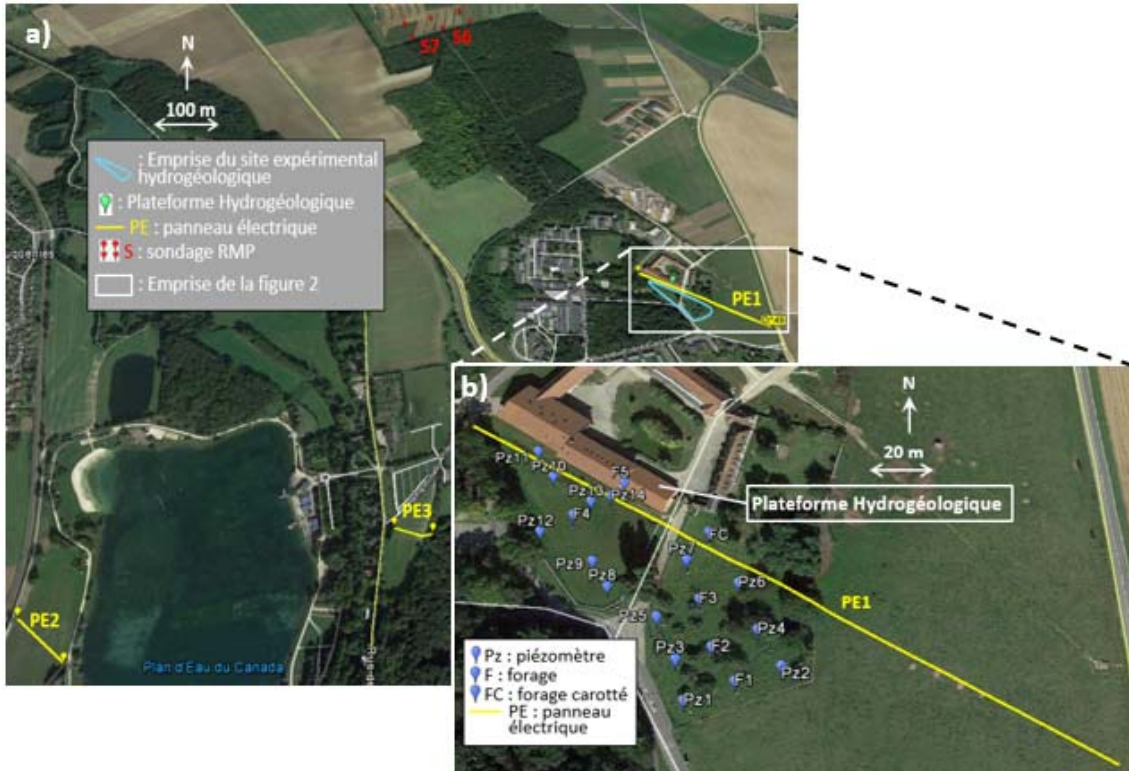


Fig. 1 - Localisation du site expérimental hydrogéologique de l'Institut UniLaSalle et des mesures géophysiques 2017-2018 (Beauvais, 60)

.2 METHODOLOGIE

Afin de caractériser et suivre dans le temps le comportement de l'aquifère de la craie, une démarche pluridisciplinaire a été menée depuis une dizaine d'années. Cette dernière consiste notamment en des relevés piézométriques réguliers, des mesures météorologiques, des tomographies électriques, des profils par sismique réfraction, des diagraphies et des sondages par Résonance Magnétique des Protons (RMP) depuis 2014 (Zouhri and Lutz 2016 ; Lutz *et al.* 2017).

La campagne de géophysique 2017-2018 a notamment consisté en (**Fig. 1**) :

- des mesures régulières par sondage RMP, localisées au nord du site expérimental (S6 et S7) ;
- 3 tomographies électriques, à proximité du site expérimental pour l'une (PE1) et sur un nouveau secteur d'étude plus au sud-ouest (PE2 et PE3).

Les outils et principaux paramètres d'acquisition utilisés sont synthétisés en Tab.1

Tab. 1 - Matériel et principaux paramètres lors des mesures géophysiques de 2017-2018.

Méthode	Équipement	Paramètres d'acquisition	Traitement
Sondage RMP	NumisPoly (IRIS Instruments)	Logiciel Prodiviner Boucle carrée de 100 m	Samovar V6.6 Filtre 50 Hz
Tomographie Électrique	ABEM TERRAMETER SAS 4000	Protocole gradient ; électrodes ; 1,5 m ≤ inter-électrodes ≤ 5 m	RES2DINV

.3 RESULTATS ET CONCLUSION

3.1. Sondages RMP

Les mesures régulières des sondages S6 et S7 permettent de suivre les variations temporelles :

- de la teneur en eau en fonction de la profondeur (Fig. 2) ;
- de la perméabilité et de la transmissivité en fonction de la profondeur (Fig. 3).

Ces résultats, confrontés aux variations du niveau de la nappe mesurées dans les piézomètres (Fig. 2) et à la pluviométrie (Fig. 4), contribuent à la caractérisation du comportement de nappe et de l'aquifère de la craie.

3.2. Tomographie électrique

Les mesures, effectuées sur 3 secteurs différents, permettent de préciser les variations spatiales de la lithologie et du niveau statique (Fig. 5).

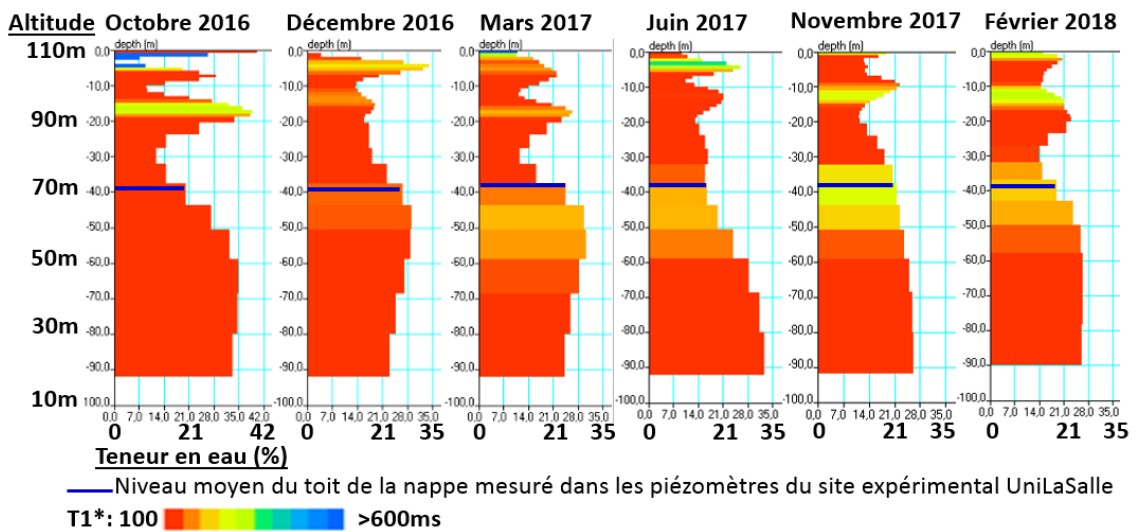


Fig. 2 - Evolution temporelle des diagrammes de teneur en eau du sondage RMP S6.

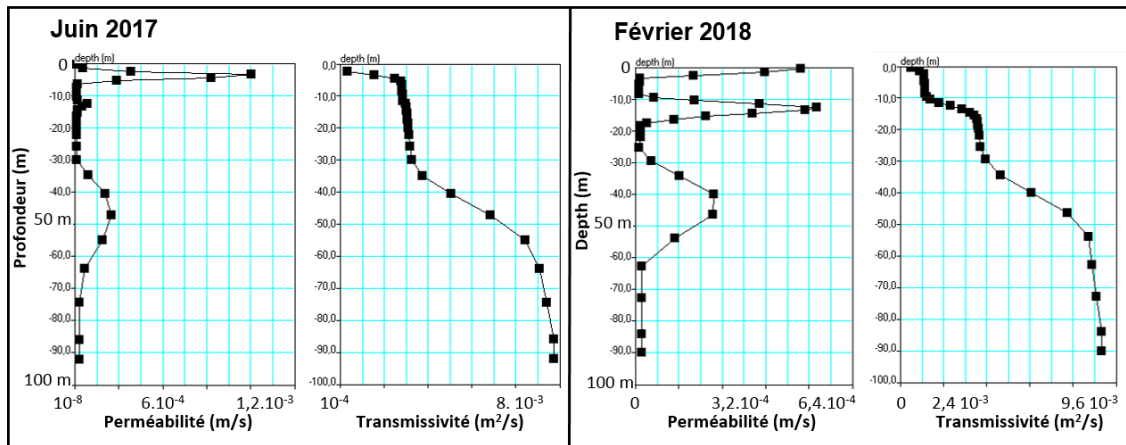


Fig. 3- Courbes de perméabilité et transmissivité en fonction de la profondeur du sondage RMP S6 en juin 2017 et février 2018.

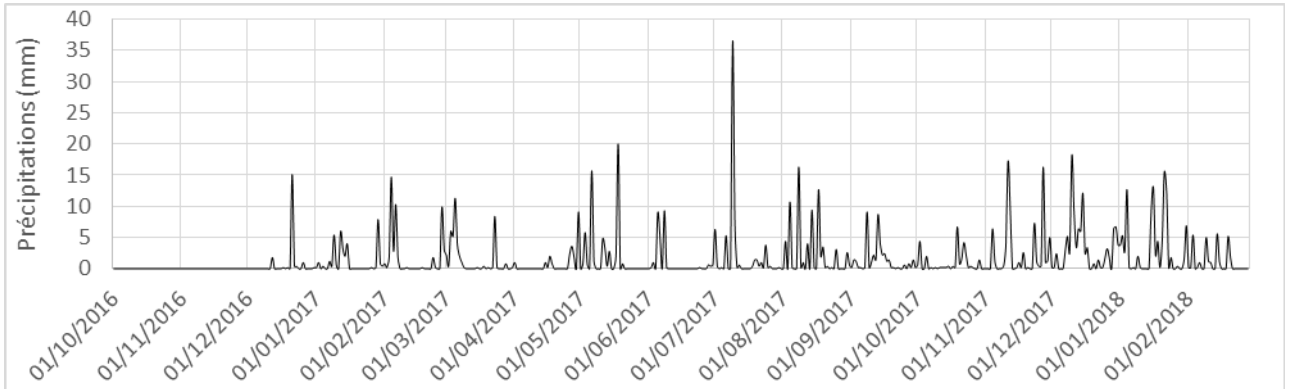


Fig. 4 - Précipitations journalières à la station de Tillé (Oise, 60) d'octobre 2016 à février 2018.

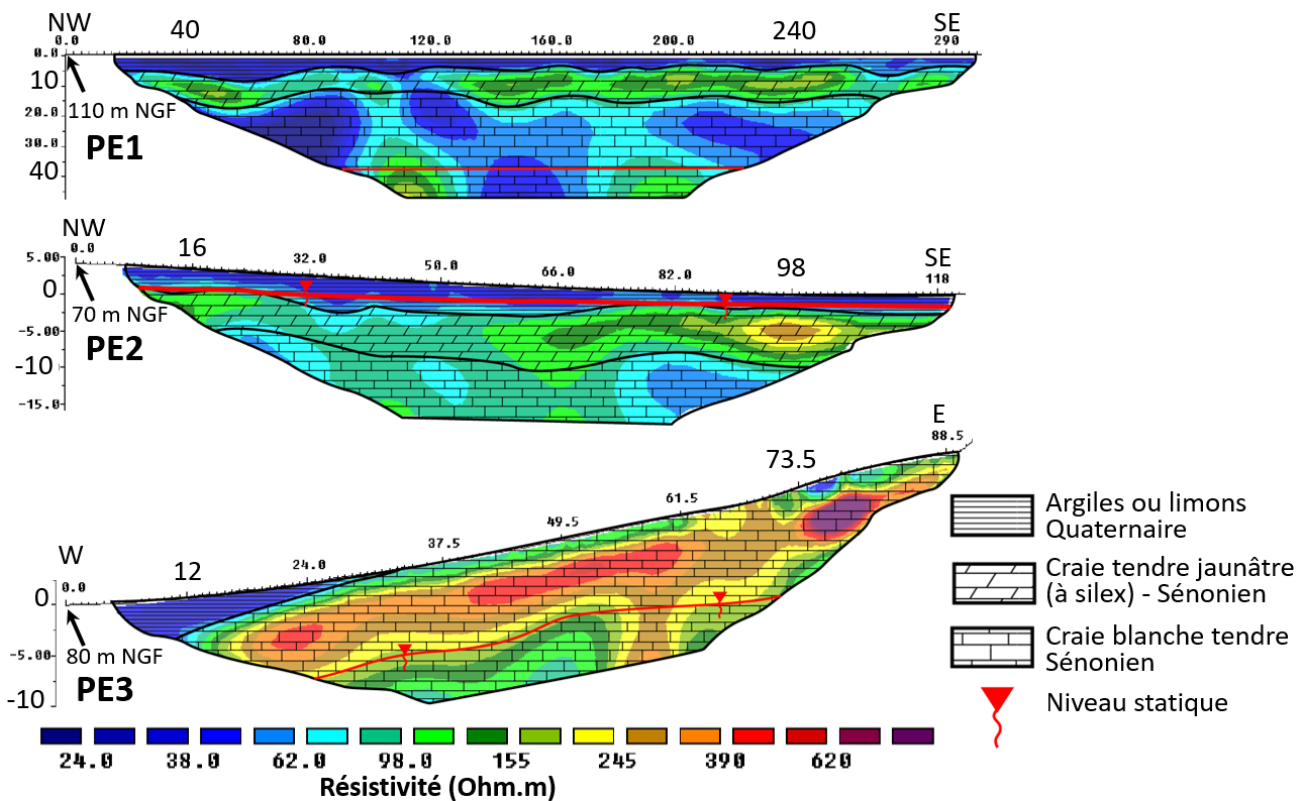


Fig. 5 - Sections de résistivité interprétées issues de la campagne 2017-2018.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LUTZ P., GIRARD J-F, ZOUHRI L., MEURANT P-E., 2017 – Towards a time monitoring of the chalk aquifer (Beauvais, North of France) using the Magnetic Resonance Soundings. 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics - Near Surface Geoscience, 3-7 September 2017, Malmö, Sweden.

ZOUHRI L., LUTZ P., 2016 – Hydrogeophysical characterization of the porous and fractured media (chalk aquifer in the Beauvais, France). *Environmental Earth Sciences*, 75, 343.

ANISOTROPIE INDUITE PAR DES FRACTURES DANS UN BASSIN VERSANT MONTAGNEUX

MENDIETA A.¹, BRADFORD J.²

¹ Sorbonne Université, UMR 7619 METIS, Paris, France,
aida.mendieta_tenorio@upmc.fr

² Colorado School of Mines, Dept of Geophysics, Golden, Colorado, USA

RÉSUMÉ

Dans le cadre des études de la Zone Critique et hydrogéophysique, les mesures géophysiques sont souvent faites en 2D. Pour mieux comprendre comment l'anisotropie induite par des fractures influence les profils 2D, nous avons acquis plusieurs profils 2D de sismique réfraction à différents azimuts, sur deux sites, Lower Weather (LW) et Treeline (T), dans le bassin versant Dry Creek Experimental Watershed. À LW, nous avons trouvé les preuves d'une forte anisotropie, et à T nous avons trouvé une anisotropie modérée à faible. Le système de fracture est potentiellement plus complexe à T qu'à LW.

Mots clés : Anisotropie, Sismique réfraction, Fractures, Zone Critique.

FRACTURE INDUCED SEISMIC ANISOTROPY IN A MOUNTAIN WATERSHED

ABSTRACT

For Critical Zone and hydrogeophysical purposes, geophysical surveys are often times performed in 2D profiles. To better understand how fracture induced anisotropy acts in 2D profiles, we collected 2D seismic refraction profiles at different azimuths, in a spoke-wheel fashion in two sites, Lower Weather (LW) and Treeline (T), within the Dry Creek Experimental Watershed. In LW we found evidence of strong seismic anisotropy, and in T we found moderate-weak anisotropy. T has potentially a more complicated fracture system than LW.

Key words: Anisotropy, Seismic Refraction, Fractures, Critical Zone.

.1 INTRODUCTION

La Zone Critique (ZC) est la partie de la Terre qui s'étend du haut des arbres jusqu'à une profondeur où le sous-sol n'est plus affectée par les fluides météoriques (Befus et al., 2011; Riebe et al., 2016). Délimiter la partie supérieure de la ZC est facile. En revanche, la caractérisation de la partie inférieure est un défi. Le fond de la ZC se trouve dans le sous-sol (>10 m profondeur) et pour la délimiter nous avons besoin de forages ou de mesures géophysiques. Les fractures peuvent avoir un effet significatif sur l'architecture profonde de la ZC. Selon Riebe et al. (2016), les fractures présentent une conductivité hydraulique élevée permettant le transport des fluides météoriques dans les parties profondes jusqu'à la limite d'altération de la ZC. St. Clair et al. (2015) ont montré que l'emploi de l'imagerie de résistivité électrique et de la sismique réfraction peut révéler les zones fortement fracturées, et dans certains cas, peut être corrélé avec

le champ de contrainte régional. La plupart des études sur les bassins versants montagneux ignorent l'anisotropie induite par les fractures. La présence de fractures dans un milieu introduit de l'anisotropie sismique azimutale (Tsvankin and Grechka, 2011; Lynn and Michelena, 2011; Burns et al., 2007; Crampin, 1985). L'anisotropie doit être prise en compte lors des mesures géophysiques dans les milieux anisotropes afin que des modèles corrects puissent être utilisés. Des sondages multi-azimutaux peuvent augmenter significativement le temps et les coûts sur le terrain. Néanmoins l'utilisation de modèles isotropes sur un milieu anisotrope conduira à des résultats erronés. La plupart des sondages de la ZC en hydrogéophysique sont acquis en utilisant un seul azimut (Olona et al., 2010; Befus et al., 2011; Holbrook et al., 2014; Yamakawa et al., 2011 et 2010). Les résultats peuvent varier considérablement en fonction de l'orientation du sondage par rapport à l'orientation préférentielle des fractures. Dans ce travail, nous essayons de quantifier la différence entre plusieurs sondages de sismique réfraction acquis à différents azimuts dans un bassin versant avec un socle fracturé.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Sites étudiés

Nous avons acquis ces données dans le bassin versant Dry Creek Experimental Watershed (DCEW) à Treeline (T) et près du DCEW (~400 m) à Lower Weather (LW). Le DCEW, situé à environ 16 km au nord-est de la ville de Boise dans le sud-ouest de l'Idaho (États-Unis), a été créé pour mieux comprendre les processus hydrologiques dans un environnement semi-aride. Le terrain est majoritairement granitique. LW est situé à une altitude d'environ 1140 m. Les précipitations sur ce site sont majoritairement sous forme de pluie (Parham, 2015). T est un petit bassin d'environ 1.5 ha, situé dans le DCEW, dans la zone de transition pluie-neige. L'altitude moyenne y est de 1622 m avec deux crêtes prédominantes identifiées comme: Crête nord (CN) et Crête sud (CS).

2.2. Acquisition des données

Les profils ont été acquis en utilisant des Geodes (Geometrics) de 24 canaux, déployés sur des lignes de 62 à 83 canaux. La séparation des récepteurs était de 5 m et celle des sources de 20 m. Nous avons utilisé des géophones de 10 Hz, avec uniquement la composante verticale. À LW, nous avons acquis deux profils 2D perpendiculaires, un parallèle à la crête et l'autre perpendiculaire (fig.1a). À T, nous avons acquis 7 profils 2D. 3 lignes passant sur la CN, 3 sur la CS, et 1 ligne commune (fig.1b).

2.3. Traitement des données

Un filtre passe-bande de 0-50-100-150 Hz a été utilisé (logiciel Geotomo) pour retirer le bruit haute fréquence des données. L'inversion et les sections de vitesse d'onde P (V_p) ont été obtenues avec le logiciel Rayfract.

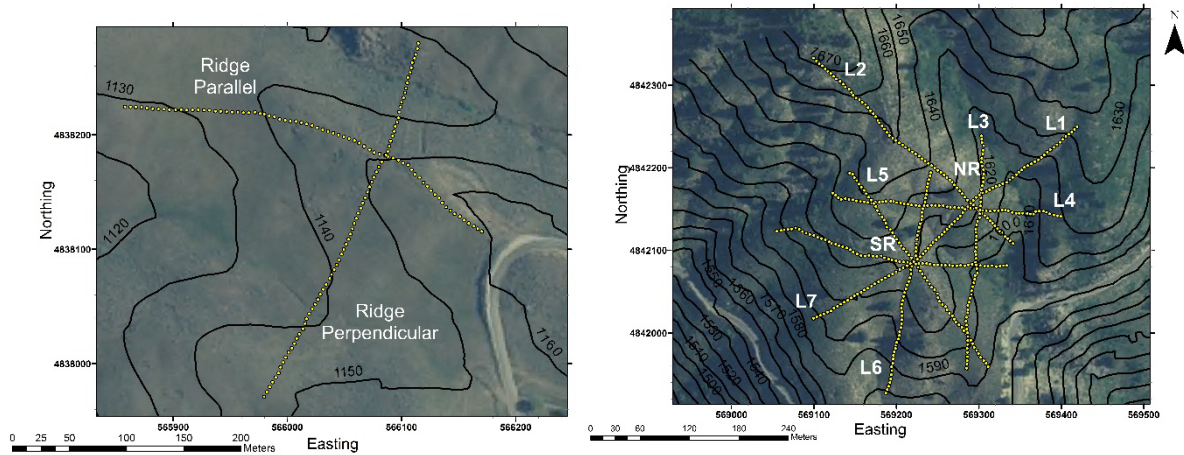


Fig. 1: Plan d'acquisition des données a) à Lower Weather, et b) à Treeline.

.3 RESULTATS

3.1. Lower Weather

Dans nos résultats inversés on observe une différence importante des valeurs de V_p , au point d'intersection entre les profils parallèles et perpendiculaires à la crête. La direction préférentielle des fractures devrait correspondre à la direction de la V_p la plus rapide (V_{rapide}). Pour LW la valeur d'anisotropie sismique est de 28,56%. Thomsen (1986) mentionne que des différences de moins de 20% sont dans la gamme d'anisotropie faible à modérée. Pourtant, une différence de presque 30% indique une forte anisotropie. Nous calculons l'anisotropie comme la différence en pourcentage des valeurs de V_p au point d'intersection des profils sismiques (eq.1) où V_{rapide} représente la valeur plus élevée de V_p et V_{lente} la valeur la plus faible, au point d'intersection.

$$anisotropie = 100 \times \left(\frac{V_{rapide} - V_{lente}}{V_{lente}} \right) \quad (1)$$

3.2. Treeline

Le site T est plus complexe que le précédent. À T nous avons mesuré à 4 azimuts et obtenu des valeurs de V_p plus élevés pour les profils L3, L4, L6 et L7 (fig.1b). La plus grande valeur d'anisotropie observé à la CN est de 17,4% et à la CS de 13,7%. Nous n'avons pas une couverture azimutale suffisante, pour mettre en évidence l'orientation préférentielle des fractures.

.4 CONCLUSIONS

Des sondages géophysiques peuvent être menés pour obtenir les paramètres hydrologiques du sous-sol. Lors d'un sondage dans un milieu fracturé l'anisotropie peut être importante. La négliger peut mener à des interprétations erronées du système hydrologique souterrain, particulièrement dans des applications de la ZC. Nos résultats suggèrent la présence d'anisotropie sismique sur les sites étudiés. LW montre la valeur d'anisotropie la plus élevée, presque 30%. On constate une anisotropie plus faible sur le site de T.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEFUS K.M., SHEEHAN A.F., LEOPOLD M., ANDERSON S.P., ANDERSON R.S., 2011** – Seismic constraints on Critical Zone architecture, Boulder Creek Watershed, Front Range, Colorado. *Vadose Zone Journal* 10(4), 1342.
- BURNS D.R., WILLIS M.E., TOKSOZ M.N., 2007** – Fracture properties from seismic scattering. *The Leading Edge*, 26(9), 1186-1196.
- CRAMPIN S., 1985** – Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics* 50(1), 142–152.
- HOLBROOK W.S., RIEBE C.S., ELWASEIF M., HAYES J.L., BASLER-REEDER K., HARRY D.L., ARMEN M., DOSSETO A., HARTSOUGH P.C., HOPMANS J.W., 2014** – Geophysical constraints on deep weathering and water storage potential in the Southern Sierra Critical Zone Observatory. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(3), 366–380.
- LYNN H., MICHELENA R.J., 2011** – Practical applications of anisotropy. *The Leading Edge* 30(7), 726-730.
- OLONA J., PULGAR J.A., FERNÁNDEZ-VIEJO G., LÓPEZ-FERNÁNDEZ C., GONZÁLEZ-CORTINA J.M., 2010** – Weathering variations in a granitic massif and related geotechnical properties through seismic and electrical resistivity methods. *Near Surface Geophysics* 8, 585–599.
- PARHAM W.B., 2015** – Spatial and temporal storage dynamics moderate the ecohydrologic significance of evapotranspiration in semi-arid mountainous terrain. *Unpublished Master's thesis, Boise State University Library*.
- RIEBE C.S., HAHM W.J., BRANTLEY S.L., 2016** – Controls on deep critical zone architecture : a historical review and four testable hypotheses. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- ST. CLAIR J., MOON S., HOLBROOK W.S., PERRON J.T., RIEBE C.S., MARTEL S.J., CARR B., SINGHA K., RICHTER D.D., 2015** – Geophysical imaging reveals topographic stress control of bedrock weathering. *Science* 350(6260), 534–539.
- THOMSEN L., 1986** – Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51(10), 1954–1966.
- TSVANKIN I., GRECHKA V., 2011** – Seismology of azimuthally anisotropic media and seismic fracture characterization. *Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists*.
- YAMAKAWA Y., KOSUGI K., MASAOKA N., SUMIDA J., TANI M., MIZUYAMA T., 2011** – Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered granitic hillslope. *Geomorphology* 145-146, 56–69.
- YAMAKAWA Y., KOSUGI K., MASAOKA N., TADA Y., MIZUYAMA T., 2010** – Use of a combined penetrometer – Moisture probe together with geophysical methods to survey hydrological properties of a natural slope. *Vadose Zone Journal* 9, 768–779.

CONTRIBUTION GÉOPHYSIQUE A L'ÉVALUATION DU RISQUE D'INTRUSION SALINE DANS LES AQUIFÈRES CÔTIERS URBAINS TROPICAUX : CAS DE COTONOU (BÉNIN)

SOGNON L.M.^{1,2}, YALO N.¹, BOUCHER M.³, LAWSON F.M.A.^{1,2,3},
ALLE C.^{1,2,3}

¹ UAC, INE, Cotonou, Bénin, 01BP : 526 Cotonou, ine@uac.bj

² CIPMA, Cotonou, Bénin, 072BP 50 Cotonou, cipma_secretariat@cipma.net,
www.cipma.net

³ IRD, UGA, CNRS, G-INP, IGE, Grenoble, France, www.ird.fr

RÉSUMÉ

Les aquifères côtiers urbains tropicaux qui assurent l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou et ses environs sont menacés par l'intrusion d'eau salée. Cette menace est liée à l'aléa de l'intrusion saline qui peut rendre ces aquifères vulnérables à la contamination. La contribution géophysique de cette étude se résume à la mise en évidence de la propagation de l'intrusion saline en fonction de la structure lithologique de ces aquifères. La zone d'étude est située entre la plaine littorale de l'aquifère sableux du Quaternaire et le plateau de l'aquifère sablo-argileux du Continental Terminal. Une trentaine de sondages TDEM et 5 sondages RMP ont été réalisés. Les résultats des mesures géophysiques ont été comparés aux logs géologiques disponibles. Les résistivités électriques ont montré que l'intrusion saline reste confinée entre l'Océan Atlantique et les lagunes côtières sauf à proximité du Lac Nokoué où les pompages importants (station de captage) relèvent localement l'interface eau douce-eau salée. En conclusion, l'aquifère du Continental Terminal reste protégé de l'intrusion saline par la présence d'un niveau argileux de grande extension.

Mots clés : Aquifère du Continental Terminal, Aquifère du Quaternaire, Niveau argileux, TDEM, RMP.

GEOPHYSICAL CONTRIBUTION FOR EVALUATING RISK OF SALT INTRUSION IN TROPICAL URBAN COASTAL AQUIFERS: CASE OF COTONOU (BENIN)

ABSTRACT

The tropical urban coastal aquifers that supply water to the city of Cotonou and its surroundings are threatened by the intrusion of salt water. This threat is related to the hazard of saline intrusion that can make these aquifers vulnerable to contamination. The geophysical contribution of this study comes down to highlighting the propagation of the saline intrusion according to the lithological structure of these aquifers. The study area is located between the coastal plain of the Quaternary sandy aquifer and the shelf of the Continental Terminal sandy-clay aquifer. Thirty TDEM surveys and five RMP surveys were conducted. The results of the geophysical measurements were compared to the available

geological logs. The electrical resistivities have shown that the saline intrusion remains confined between the Atlantic Ocean and the coastal lagoons except near Nokoué Lake where the large pumping (catchment station) locally raise the interface fresh water - salt water. In conclusion, the Continental Terminal aquifer remains protected from saline intrusion by the presence of a clay level of great extension.

Key words: Continental Terminal aquifer, Quaternary aquifer, Clay level, TDEM, RMP

.1 INTRODUCTION

L'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou (capitale économique du Bénin, ~680.000 habitants) est assuré principalement à partir des ressources en eau du système aquifère du Continental Terminal (**Fig. 1**) et accessoirement à partir de de l'aquifère des sables littoraux du Quaternaire (YALO, 2013). Ces aquifères sont vulnérables d'une part aux pollutions urbaines de surface notamment du fait du manque d'assainissement des eaux usées et, d'autre part, aux intrusions salines depuis l'océan, le lac Nokoué et/ou des lagunes à eaux salées ou saumâtres. Ce système aquifère en exploitation depuis 1956 (BOUKARI, 1998) est soumis à diverses pressions anthropiques (croissance urbaine; agriculture intensive; développement industriel et du tourisme) qui accentuent sa vulnérabilité. Ainsi, des phénomènes d'intrusion saline ont déjà commencé à affecter les forages du champ de captage (localité de Godomey) géré par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB). Pour mieux évaluer les risques de contamination nous avons menées une étude géophysique pour à la fois cartographier l'interface entre l'eau douce et l'eau salée et pour caractériser les formations argileuses qui constituent des protections naturelles de l'aquifère.

.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Une trentaine de sondages TDEM (Time Domain Electromagnetism) et 5 sondages RMP (Résonance Magnétique des Protons) ont été réalisés entre la plaine littorale du Quaternaire et le plateau du Continental Terminal (**Fig. 1**).

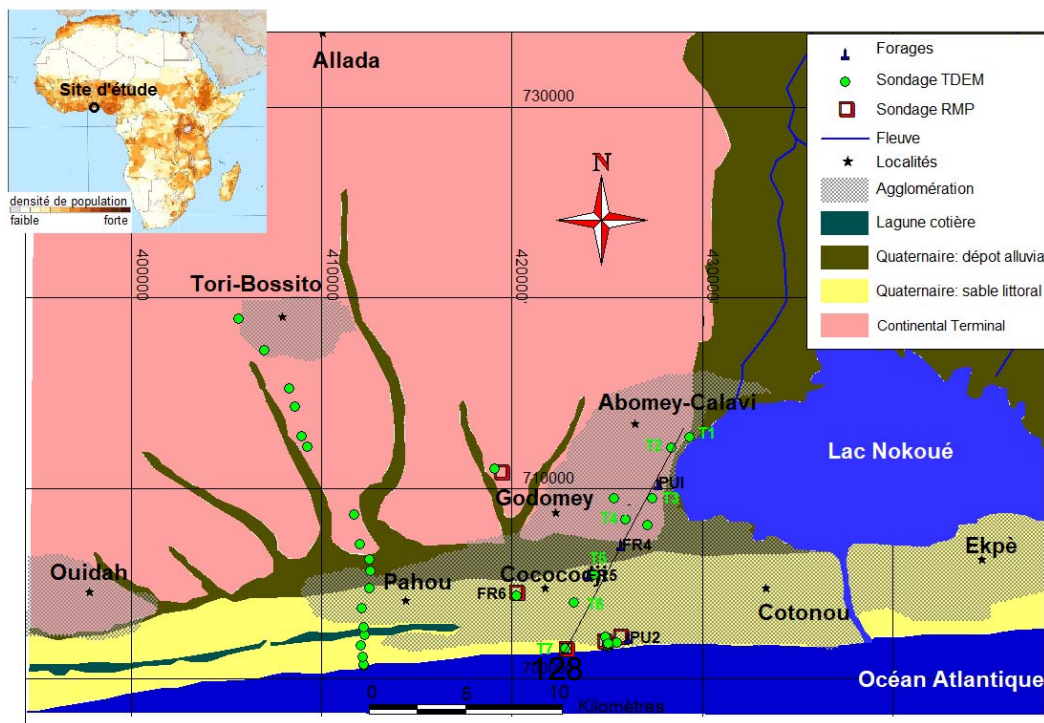


Fig. 1 – Localisation des mesures géophysiques.

Les sondages TDEM ont été réalisés avec l'équipement TEM-FAST en utilisant des boucles coïncidentes de 25 m de côté. Ils ont été inversés avec le logiciel TEMRES. Les sondages RMP ont été réalisés avec un équipement NUMIS en utilisant des boucles de 50 à 125 m de côté, parfois en forme de huit en fonction des conditions de bruits électromagnétiques. Ils ont été inversés avec le logiciel SAMOVAR.

.3 RÉSULTATS

Les résultats des mesures géophysiques ont été comparés aux logs géologiques disponibles (MALIKI, 1993) afin d'améliorer l'interprétation. **La fig. 2** montre des exemples typiques de résultats comparatifs : le piézomètre FR6 sur le plateau de l'aquifère du Continental terminal et le piézomètre PU2 dans la plaine de l'aquifère du Quaternaire. On observe que les fortes conductivités observées en TDEM peuvent traduire soit la présence d'eau salée, soit celle d'un niveau argileux. Les données RMP, sensibles uniquement à l'eau libre permettent distinguer la teneur en eau aussi bien douce que salée (absence d'eau libre dans les argiles).

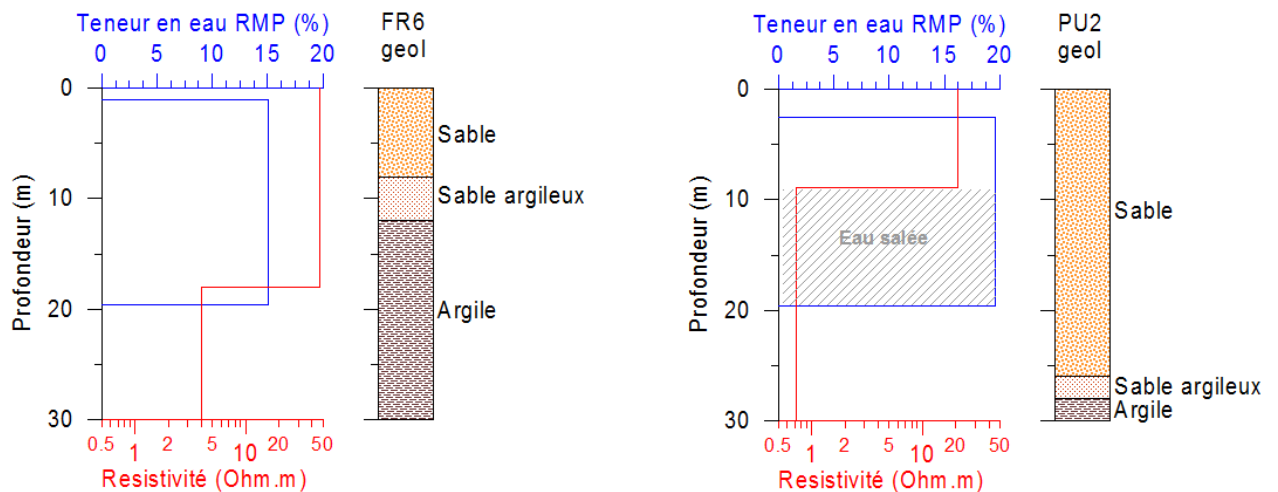


Fig. 2 – Comparaison des données géophysiques et géologiques sur 2 sites emblématiques (FR6 et PU2). NB : les sites RMP/TDEM sont à quelques centaines de mètres des logs géologiques.

Une coupe transversale partant du Lac Nokoué à l'Océan Atlantique en passant par le plateau du Continental Terminal a été réalisée (**Fig.3**). Des niveaux de très faibles résistivités électriques (<3 ohm.m) sur les sondages T1, T6 et T7 sont interprétés comme une présence de l'intrusion saline. Sur le sondage T3 le niveau

conducteur est quant à lui lié à la présence d'un niveau argileux (confirmée par les informations géologiques sur le site de mesure).

Des résultats similaires ont été obtenus sur une autre section plus à l'ouest. Il est à retenir que l'intrusion saline ne dépasse pas la lagune côtière et localement on observe un niveau argileux (imperméable) peu profond qui protège l'aquifère du Continental Terminal.

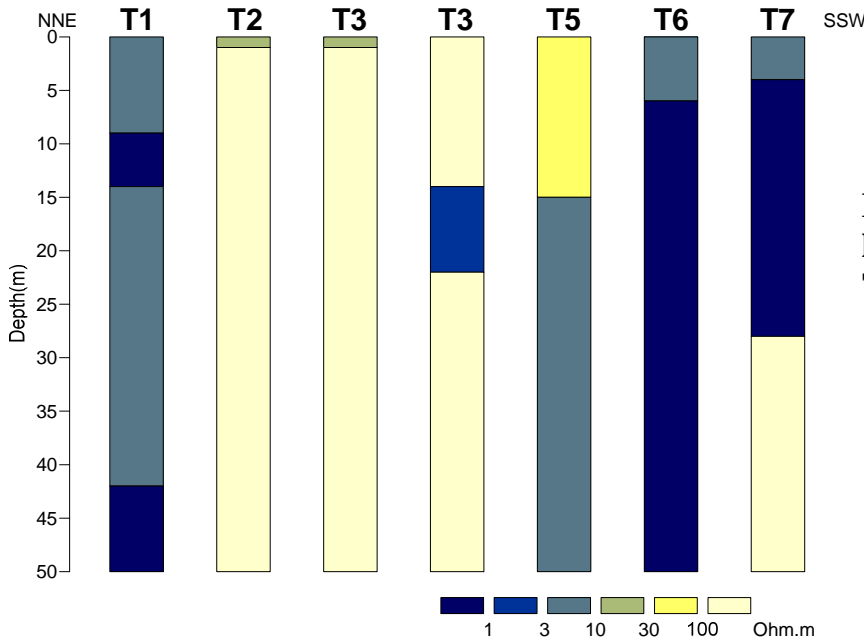


Fig. 3 – Coupe TDEM de la plaine littorale au plateau du Continental Terminal
(Localisation : trait noire sur la Fig.1)

.4 CONCLUSION

Malgré des conditions de mesures difficiles, des données TDEM et RMP de qualité ont été obtenus dans la zone urbaine et péri-urbaine de l'agglomération de Cotonou. Les résistivités électriques montrent que l'intrusion saline reste confinée entre l'Océan et les lagunes côtières sauf à proximité du Lac Nokoué où les pompages importants (station de captage) relève localement l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. L'aquifère du Continental Terminal est souvent protégé des pollutions de surface par un niveau argileux de grande extension. Une meilleure cartographie de cette formation argileuse permettrait de donner des recommandations pour la protection de la qualité des ressources en eaux souterraines.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUKARI M. 1998 – Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact

du développement urbain sur la qualité des ressources. *Thèse de doctorat, Universités de Dakar, 345 pages*

MALIKI R.A., 1993 – Etude hydrogéologique du littoral béninois dans la région de Cotonou et ses environs. *Thèse de doctorat, Universités de Dakar, 164 pages.*

YALO N., DESCLOITRES M., VOUILLAMOZ J.M., ALLE C. 2013 – Delimitation of the salt water wedge in the shallow coastal aquifer by TDEM method at Togbin (South Benin). *International Journal of Science and Advanced Technology, 3, 21-29.*

EXPÉRIENCES ACOUSTIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE STRENGBACH EN ALSACE

ZILLMER M.¹, DOUKOURE F.², MARTHELOT, J.-M.¹

¹ IPGS, CNRS UMR 7516, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex, matthias.zillmer@unistra.fr

² EOST/Unistra, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex

RÉSUMÉ

La diaggraphie acoustique et les profils sismiques verticaux montrent que la vitesse de propagation des ondes dans le granite du bassin versant de Strengbach est plus élevée pour des fréquences de 30 kHz que des fréquences de 100 Hz. On suppose que les ondes sismiques avec des longueurs d'onde plus grandes sont affectées par plus des fractures que les ondes soniques.

Mots clés : *bassin versant, granite, fractures, diaggraphie acoustique, profil sismique vertical.*

ACOUSTIC EXPERIMENTS IN THE STRENGBACH CATCHMENT IN ALSACE

ABSTRACT

Acoustic logging and vertical seismic profiles show that the wave propagation velocity in granite of the Strengbach catchment is higher for frequencies of 30 kHz than for frequencies of 100 Hz. We assume that the seismic waves with the larger wavelengths are affected by fractures of different size than the sonic waves.

Key words: *catchment, granite, fractures, acoustic logging, vertical seismic profiling.*

INTRODUCTION

Le projet ANR Hydrocriszto étudie le bassin versant de Strengbach dans les Vosges en Alsace. Trois types d'expériences acoustiques ont été réalisées depuis 2014: des diaggraphies soniques (acoustiques), des profils sismiques verticaux (PSV) et des profils sismiques de la proche surface. Dans les années précédentes, cinq forages ont été creusés pour des mesures scientifiques. Par la suite, on va analyser des résultats de diaggraphie acoustique et du PSV dans le forage F7. Ce forage a été creusé 50 m dans le granite. Le diamètre du forage est 10 cm.

DIAGRAPHIE ACOUSTIQUE

Une sonde de diagraphie acoustique de Mount Sopris a été utilisée. La profondeur de la sonde est déterminée automatiquement. La sonde a un transducteur piezo-céramique et deux récepteurs piezo-céramiques avec une distance de 90 cm et de 120 cm du transducteur. L'onde se propage à travers l'eau dans le forage et puis comme onde conique (head wave) dans la roche. La vitesse de propagation dans la roche est déterminée en utilisant la différence des temps d'arrivée sur les deux récepteurs. Les vitesses des ondes P et S dans le granite sont plus élevées que la vitesse dans l'eau. Par conséquent, deux ondes coniques se propagent.

La fréquence du transducteur piezo-céramique peut être sélectionnée: La fréquence maximale est 30000 Hz et la fréquence minimale est 1000 Hz. Pour une vitesse de propagation de 3000 m/s ces fréquences correspondent aux longueurs d'ondes de 10 cm et 3 m. En utilisant le signal de 30 kHz on observe des ondes coniques P et S. En utilisant le signal 1000 Hz on observe l'onde de Stoneley qui est une onde guidée dans le forage avec une vitesse inférieure à 1500 m/s. On observe aussi des diffractions (Stoneley ou pseudo-Rayleigh) produites par des larges fractures.

Sur la Figure 1 on voit le champ d'ondes pour le signal 30 kHz sur les deux récepteurs. Les mesures sont faites tous les 10 cm. La Figure 1 montre d'environ 400 sismogrammes pour chaque récepteur. L'onde conique P peut être facilement identifiée.

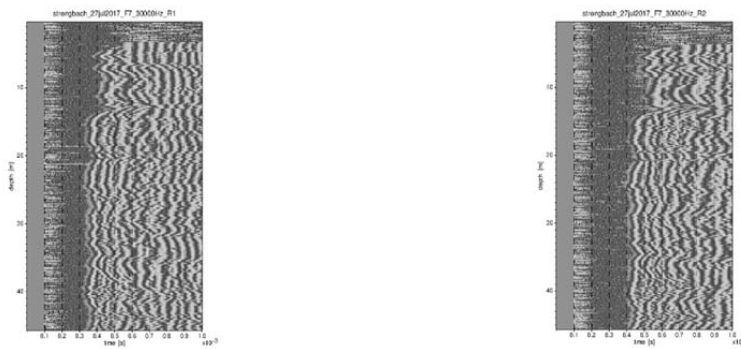


Fig. 1 - Diagraphie acoustique dans le forage F7 avec un signal de 30 kHz.

La prochaine étape du processing est de déterminer les temps d'arrivée des ondes dit *picking*. Pour le petit nombre de sismogrammes (plusieurs centaines) on fait

du picking manuel. La Figure 2 montre la vitesse de l'onde P en fonction de la profondeur dans le granite du forage F7.

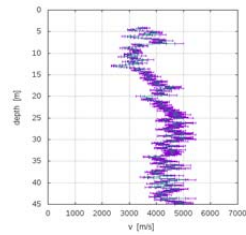


Fig. 2 - Vitesse de l'onde P dans le granite.

La vitesse maximale de l'onde P est d'environ 5000 m/s. Des vitesses plus élevées ont été obtenues avec des mesures acoustiques sur des échantillons dans le laboratoire (Thierry Reuschle, communication personnelle). Nous avons aussi mesuré des vitesses plus élevées dans une ancienne mine à Saint-Marie-aux-Mines creusée dans le soubassement du bassin versant. On en déduit que le granite dans le forage F7 est fracturé même pour la vitesse la plus élevée.

On peut faire la même analyse pour les ondes S qui sont plus difficiles à détecter. Le but est de convertir les vitesses P et S en densité de fracturation et teneur en eau en utilisant une des théories des milieux effectifs.

La Figure 3 montre le champ des ondes acoustiques dans le forage F7 avec un signal source de 1000 Hz. On observe des diffractions à 8 m, 13 m et 20 m profondeur qui correspondent à des vitesses minimales sur la Figure 2. Les diffractions sur des grandes fractures indiquent des trajets de l'eau dans le granite.



Fig. 3 - Diagraphie acoustique dans le forage F7 avec un signal de 1 kHz.

PROFILS SISMIQUES VERTICAUX

Un profil sismique vertical a été mesuré dans le forage F7 en mai 2018. La source était un marteau de 5 kg et le récepteur un hydrophone Oyo Geospace. La fréquence dominante de la source est environ 100-200 Hz. La Figure 4 montre la section sismique.

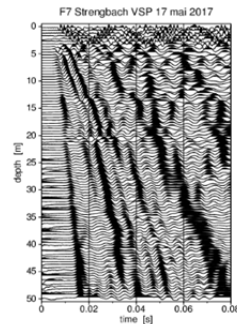


Fig. 4 - PSV dans le forage F7.

La vitesse de l'onde P dans le granite est 2600 ± 100 m/s dans l'intervalle de 5 m à 20 m profondeur et 3700 ± 100 m/s de 20 m à 50 m. Les vitesses sismiques sont plus faibles que celles de la diagraphie acoustique (Figure 2).

Sur les premiers 13 mètres de profondeur les amplitudes des ondes P diminuent beaucoup plus rapidement que la décroissance géométrique avec la distance entre source et capteur. La cause est la forte fracturation du granite proche de la surface qu'on peut aussi observer avec les vitesses faibles de la diagraphie acoustique (Figures 1 et 2).

En septembre 2018 nous avons fait plusieurs PSV de type *walk-away* avec l'hydrophone positionné à différentes profondeurs. Les résultats ont confirmé que l'atténuation des amplitudes est plus forte proche de la surface. On va essayer d'expliquer l'atténuation avec la théorie des milieux effectifs pour des milieux fracturés (O'Connell and Budiansky, 1974).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

O'CONNELL, R.J., BUDIANSKY, B., 1974 – Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. *J. Geophys. Res.* 79, 5412-542.