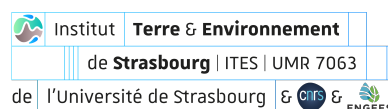
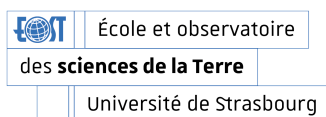


ACTES DU 13ÈME COLLOQUE DE GÉOPHYSIQUE DES SOLS ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

ORGANISÉ PAR LE RÉSEAU
GEOFCAN

7-8 nov. 2023
Collège de l'école doctorale, Strasbourg, France

Co-organisé par les unités :



avec le soutien de :

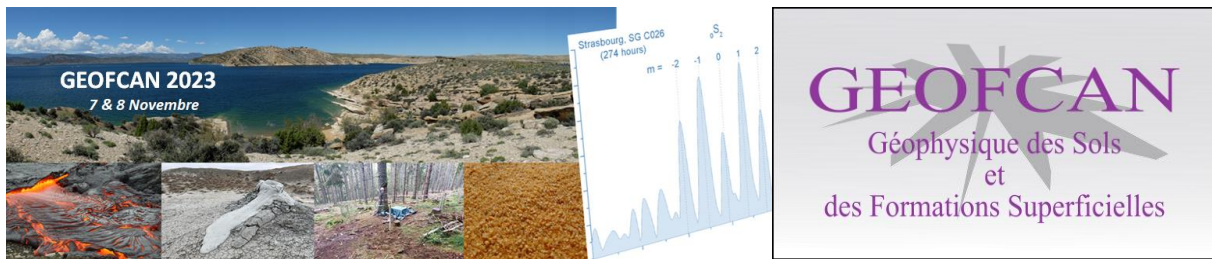


Table des matières

Remerciements	i
Comité d'organisation	ii
Comité scientifique	iii
Avant-propos	iv
Bilan du colloque	v
Prix Geofcan	vi
Programme	1
Évaluer les risques naturels et anthropiques	9
De l'intérêt des mesures de polarisation provoquée en compléments des mesures électriques pour l'étude des glissements de terrain, cas d'études dans les alpes françaises., Carrier Aurore [et al.]	9
Relation entre paléo-chenaux et processus d'érosion interne autour des digues de protection contre les inondations, Girolami Laurence [et al.]	14
Utilisation des fibres optiques télécom pour la caractérisation géotechnique à haut rendement du sous-sol urbain à partir des ondes de surface, Leroy Matéo [et al.]	18
Évaluation géophysique de la géométrie et de la vulnérabilité d'un système dunaire anthropisé : cas de Soliman (Bassin Méditerranée), Ayari Sana [et al.]	22
Evolution de la saturation en eau d'une paroi calcaire soumise à un feu, Verdet Cécile [et al.]	26
Numerical study of the pressure disturbances due to well injections, Vallier Bérénice [et al.]	30
Utilisation des méthodes diffusives pour la détection de cavité, Dubois Frédéric [et al.] . .	34

Imager des structures cachées par le temps (archéogéophysique, sites industriels)	39
Détection et caractérisation d'anciennes décharges cotières : étude de cas en côte Normande avec les méthodes électrique et électromagnétique, Nouveau Marie [et al.]	39
Utilisation du géoradar pour la détection de vestiges archéologiques en ville : deux cas d'étude suivis de tranchées de diagnostic, Fores Benjamin [et al.]	44
La polarisation provoquée des particules métalliques : retours d'expériences de terrain et en laboratoire, Kessouri Pauline [et al.]	48
Enseigner le traitement de données radar de sol par feuilles de calcul Jupyter: applications en archéologie, Saintenoy Albane [et al.]	52
Mesures magnétiques multi-échelles au sol et en drone pour l'exploration de la proche-surface, Gavazzi Bruno [et al.]	56
Comprendre les processus de la zone critique	61
Influence de l'abattage d'arbres sur le comportement hydrique du massif de Lascaux, Larcanché Marie [et al.]	61
Caractérisation géophysique multi-méthodes et multi-échelles de la zns des calcaires hétérogènes de Beauce, Ryckebusch Clémence [et al.]	66
Géophysique périglaciaire pour identifier les compartiments hydrogéologiques et leurs connexions, Valois Rémi [et al.]	70
Suivi pluriannuel par tomographie Électrique d'une parcelle forestière (Forêt de Barbeau, Seine-et-marne, France), Pessel Marc [et al.]	74
Utilisation de la géophysique de proche-surface pour étudier les écosystèmes forestiers, Loiseau Bertille [et al.]	78
Déterminer les flux d'eau en proche surface grâce aux chroniques de température à différentes profondeurs sur deux sites d'études, Harrouet Titouan [et al.]	82
Propriétés du régolite à l'observatoire de la zone critique de Berambadi (Inde) par combinaison de tomographie de résistivité électrique (ERT) et audio-magnéto-tellurique (AMT), Sailhac Pascal [et al.]	86
Calibration d'un modèle hydrologique à l'aide de mesures de résonance magnétique protonique, Gru Guillaume [et al.]	90
Apport des méthodes RMP et TDEM à l'évaluation des ressources en eau disponibles pour l'irrigation en climat semi-aride – cas de Birni N'Konni, Nouhou Chaweye Yacouba [et al.]	94
Prédiction de la profondeur des eaux souterraines pour l'optimisation des ouvrages d'hydraulique pastorale dans le Sahel : application des méthodes géophysiques RMP et TDEM, Issoufou Ousmane Boukari [et al.]	98

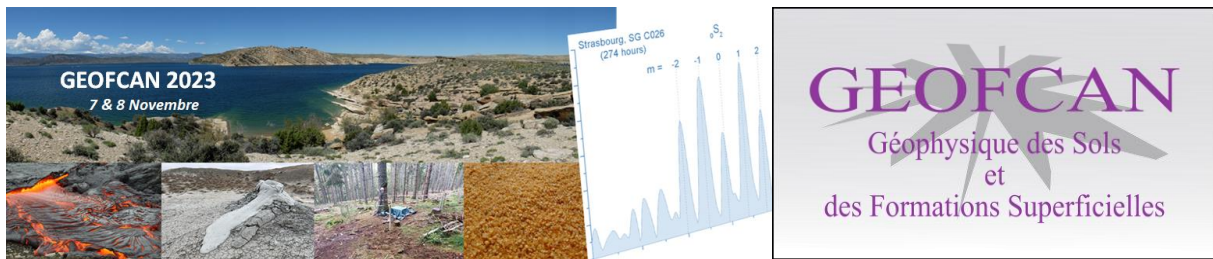
Évaluation préliminaire par tomographie électrique de la continuité des bancs de grès et du potentiel hydrogéologique associé au niveau du bassin versant de Kamech (Tunisie), Hamrouni Montassar [et al.]	102
Mesurer le potentiel spontané électrique en milieu forestier pour observer les échanges hydriques dans le continuum subsurface-végétation-atmosphère, Lesparre Nolwenn [et al.]	106
Profondeur de l'interface eau douce – eau salée à partir du Time-Domain Électro-Magnétisme (TDEM) et de l'approche hydrostatique de Ghyben-Herzberg au sud du plateau de Sakete et de sa plaine littorale (Bénin), N'Tcha Tchantipé [et al.]	110
Relier les propriétés géophysiques aux paramètres physico-chimiques	115
Modélisation pétrophysique des processus de biodégradation, Zohoré Urie [et al.]	115
Le prospecteur doit-il prendre en compte la polarisation électrique dans la gamme de fréquence 10 khz–100 khz ?, Tabbagh Alain [et al.]	120
Contribution des sondages par résonance magnétique protonique (RMP) à l'identification des sites de forages productifs pour un développement de l'irrigation dans la basse terrasse du fleuve Niger, Abdou Mahaman Rabilou [et al.]	124
Identification des aquifères par imagerie géophysique en zone de montagne : cas des aquifères fracturés de Danane, ouest de la Côte d'Ivoire, Ouedraogo Moussa [et al.]	128
Caractérisation géophysique des zones cibles à une minéralisation aurifère a Douépleu (Danane, ouest de la Côte d'Ivoire), Ouedraogo Moussa [et al.]	132
Utilisation des méthodes géophysiques pour la caractérisation et le suivi de l'effet du biochar sur les propriétés de sols urbains, Pasquet Sylvain [et al.]	136
Développer les outils d'analyse (modélisations, inversions, apprentissage machine...)141	
Le monitoring sismique pour la détermination de propriétés mécaniques de la proche surface le long de lignes à grande vitesse, Cunha Teixeira José [et al.]	141
OhmPi v2024, résistivimètre open-source : derniers développements et monitoring hydrogéophysique, Watlet Arnaud [et al.]	146
Caractérisation de défauts le long de la plateforme ferroviaire par inversion de la dispersion des ondes de surface : cas d'étude le long de la LGV sud-est, Burzawa Audrey [et al.] . .	150
Inversion combinées de données électromagnétiques et électriques, Mohand-Saïd Ali [et al.]	154
PyRefra – traitement et inversion de données de sismique réfraction, Zeyen Hermann [et al.]	158
Validation des anomalies magnétiques des filons de pegmatite sur des sections de tomographie électrique dans la commune de Ouesse (centre – Bénin), Yalo Nicaise [et al.]	162
Liste des auteurs	167



REMERCIEMENTS

Le réseau GEOFCAN tient à remercier chaleureusement :

- les Observatoires de la Zone Critique : Application et Recherche (OZCAR), le projet TERRA FORMA, l'Observatoire des Sciences de l'Univers Ecce Terra Paris Centre (OSU Ecce Terra), l'Université de Strasbourg, le CNRS, le laboratoire Institut Terre & Environnement (ITES) de l'Université de Strasbourg et l'école et observatoire des sciences de la Terre (EOST) de l'Université de Strasbourg qui ont financé ce colloque,
- l'IRD qui a financé la venue d'étudiantes et étudiants des pays du Sud
- l'entreprise MDS qui a financé les prix pour gratifier les jeunes scientifiques,
- les membres du comité d'organisation (page ii) qui ont animé le colloque (des pré-inscriptions à la clôture), qui ont réalisé des relectures et qui ont modéré les différentes sessions
- les membres du comité scientifique (page iii) qui ont relayé les informations auprès de leurs collègues, et de leurs étudiantes et étudiants, qui ont réalisé des relectures en peu de temps,
- les auteurs et autrices pour leur participation,
- Bruno GAVAZZI (ENEREX) ainsi que Marine STOLL et Andrea INGUSCI de l'université de Strasbourg représentant l'initiative pépite Etena (<https://etena.u-strasbg.fr/>) structure d'accompagnement et de sensibilisation à l'entrepreneuriat sur le territoire alsacien, pour leur participation à la table ronde sur les partenariats publics-privés,
- les associations et sociétés savantes qui ont relayés l'annonce du colloque : l'AGAP Qualité, l'Association Française pour l'Étude du Sol (AFES), le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement (CFGI), le Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR), le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS), le Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie (GMPCA), la Société Géologique de France (SGF).

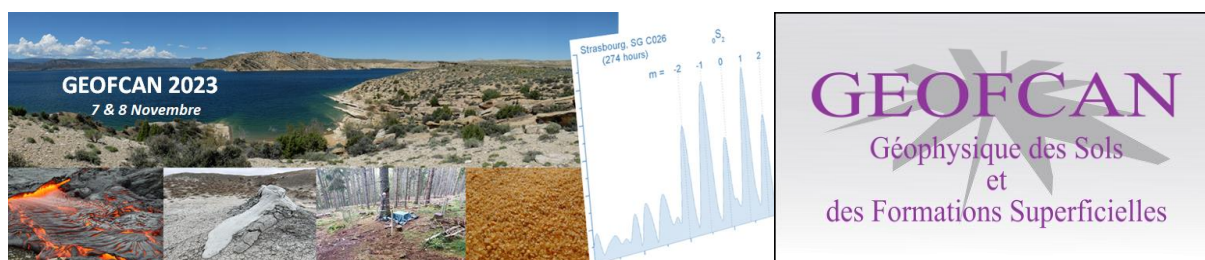


COMITE D'ORGANISATION

Nolwenn LEPARRE	Université de Strasbourg, ITES, Strasbourg
Jean-François GIRARD	Université de Strasbourg, ITES, Strasbourg
Yves ARMANDO	Université de Strasbourg, ITES, Strasbourg
Roger GUÉRIN	Sorbonne Université, METIS, Paris
Fawzia ASFIRANE	BRGM, Orléans
Henri ROBAIN	IRD, iEES, Paris
Marc PESSEL	Université Paris Saclay, GEOPS, Orsay
Marie BOUCHER	IRD, IGE, Niamey, Niger
Maud SEGER	INRAE, Science du Sol, Orléans
Rémi CLEMENT	INRAE, REVERSAAL, Lyon

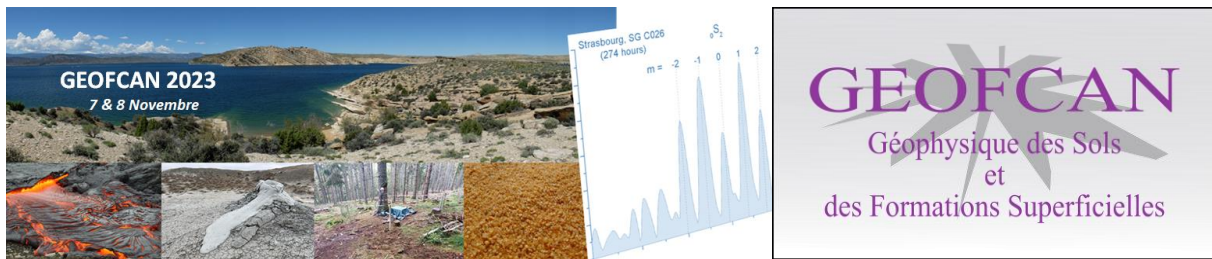
REFERENCE EDITORIALE

Lesparre N., Guérin R., 2024. Géophysique appliquée aux formations superficielles. 13^{ème} colloque GEOFCAN, Novembre 2023, à Strasbourg et à distance, France.
DOI : 10.5281/zenodo.10473671



COMITE SCIENTIFIQUE

Agnès RIVIERE	Mines ParisTech, Centre de Géosciences, Fontainebleau
Albane SANTENOY	Université Paris Saclay, GEOPS, Orsay
Anatoly LEGTCHENKO	IRD, IGE, Grenoble
Aurélien THAVEAU	UXOMAP, Paris
Catherine TRUFFERT	IRIS Instruments, Orléans
Claude DOUSSAN	INRAE, EMMAH, Avignon
Colette SIRIEIX	Université de Bordeaux, I2M, Bordeaux
Coline MOLLARET	Université de Fribourg, Fribourg, Suisse
Cyril SCHAMPER	Sorbonne Université, METIS, Paris
Cyrille FAUCHARD	CEREMA, Rouen
Donatienne LEPAROUX	IFSTTAR, GeoEND Nantes
Erwan GLOAGUEN	INRS, Québec, Canada
Fayçal REJIBA	Sorbonne Université, METIS, Paris
Frédéric NGUYEN	Université de Liège, Liège, Belgique
Hakim GABTNI	CERTE, Tunis, Tunisie
Joséphine BOISSON	SNCF, Paris Saint Denis
Konstantinos CHALIKAKIS	Avignon Université, EMMAH, Avignon
Laurence JOUNIAUX	Université de Strasbourg, ITES, Strasbourg
Laurent GOURDOL	Université du Luxembourg, Luxembourg
Mahamadou KOITA	2iE, Ouagadougou, Burkina Faso
Marie NOUVEAU	Envisol, La Tour du Pin
Mathieu DARNET	BRGM, Orléans
Mathilde ADELINET	IFP School, Rueil-Malmaison
Muriel GASC	CEREMA, Aix-en-Provence
Nicaise YALO	Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin
Pauline LE MAIRE	Cardem, Strasbourg
Sara BAZIN	Université Bretagne Occidentale, IUEM, Brest
Yannick FARGIER	Université Gustave Eiffel, Bron



AVANT-PROPOS

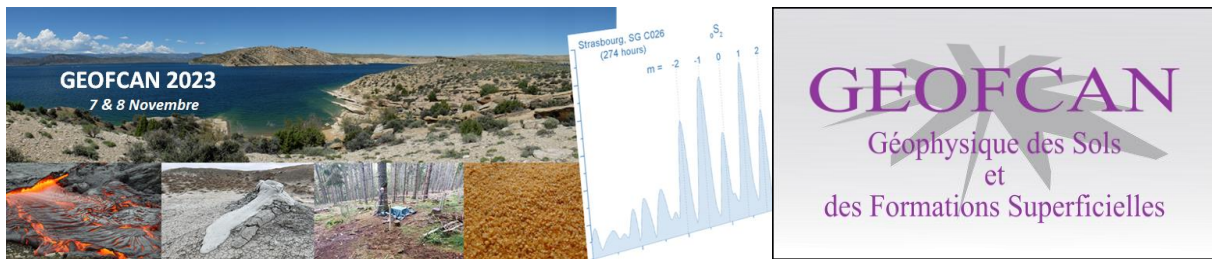
Le réseau GEOF CAN (approche GEOFysique et structurale de l'organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisés et Naturelles) est coordonné par cinq institutions suivantes : le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Sorbonne Université, et l'Université Paris-Saclay.

Les membres du réseau rassemblent leurs compétences scientifiques et leurs moyens techniques pour : (i) une meilleure connaissance des relations entre la constitution des matériaux (nature et mode d'assemblage des constituants, espace poral) et leurs propriétés physiques élémentaires, notamment celles qui entrent dans la constitution du signal donné, par diverses méthodes géophysiques ; (ii) l'adaptation et au développement d'outils géophysiques qui soient notamment adaptés à l'étude de la zone critique, des structures de couvertures pédologiques et des transferts dont elles sont le siège, dans une large gamme de contextes pédoclimatiques ; (iii) un renouvellement des méthodes d'étude du fonctionnement des couvertures pédologiques autour d'un objectif général de spatialisation.

Les objectifs du réseau sont de : (i) organiser tous les 2 ans un colloque rassemblant la communauté internationale francophone de géophysique de proche surface et/ou environnementale, (ii) motiver/aider les jeunes géophysiciennes et géophysiciens (notamment les étudiantes et étudiants en master, les doctorantes et doctorants et les post-doctorantes et post-doctorants), (iii) fédérer la communauté internationale francophone de la géophysique de proche surface, (iv) soutenir des projets innovants.

Ce 13^{ème} colloque fait notamment suite au 1^{er} qui avait eu lieu à Bondy en 1997, et au 12^{ème} initialement prévu à Grenoble et qui a eu finalement lieu en ligne en 2021. Après le succès en nombre de personnes suivant du dernier colloque en ligne, et en raison de la bonne situation sanitaire actuelle, ce 13^{ème} colloque est organisé en hybride pour combiner la possibilité d'accès à distance pour les personnes éloignées, et l'occasion de se retrouver pour les personnes pouvant venir à Strasbourg. Le choix de Strasbourg, capitale européenne, est lié au pôle ancien et très actif en recherche et en formation en géophysique.

Roger GUÉRIN
Coordinateur de GEOF CAN



BILAN DU COLLOQUE

Lors de la 13^{ème} édition du colloque GEOFCAN, 25 présentations orales ont eu lieu, 32% d'entre elles ont été effectuées par des femmes et 44% par des étudiant·es. 11 posters ont été exposés, 45% ont été présentés par des femmes et 3% par des étudiant·es.

Ce colloque a rassemblé 78 personnes avec une proportion de 36% de femmes, cette proportion étant hétérogène en termes de catégories, en effet étaient présent·es sur place lors de cette édition :

- 10 étudiant·es de Master ou en école d'ingénieur dont 50% de femmes,
- 11 doctorant·es dont 54% de femmes,
- 38 personnes du monde académique dont 29% de femmes,
- 7 personnes travaillant en entreprise dont 57% de femmes,
- 1 homme retraité.

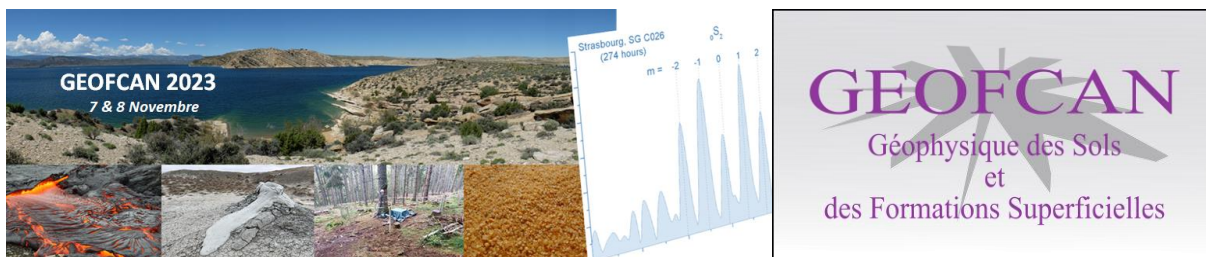
Cette édition s'est réalisée au format hybride et 8 personnes du monde académique et 5 étudiant·es ont assisté en ligne au colloque. Parmi les personnes connectées en ligne, 2 femmes travaillant dans le monde académique étaient présentes et connectées depuis la France. Ces connexions à distances ont permis à 6 personnes de se connecter depuis la France, 1 depuis le Bénin, 2 depuis la Côte d'Ivoire, 3 depuis le Niger et 1 depuis la Tunisie.

Les institutions académiques françaises suivantes présentes au colloque sont : BRGM, CNRS, IFPSCHOOL, INRAE, INRAP, IRD, Institut polytechnique UniLaSalle, Université d'Avignon Université de Bordeaux, Université Gustave Eiffel, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, Université de Strasbourg.

Les entreprises présentes sont : ENEREX, IRIS Instruments, Georeva, SAGE, ENVISOL, UXOMAP

Enfin, la dimension internationale du colloque est reflétée par la présence de représentant·es venant de :

- Université de Mons (Belgique)
- Luxembourg Institute of Science and Technology (Luxembourg)
- Université de Fribourg (Suisse)
- Centre des Recherche et Technologies des Eaux (Tunisie)
- Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
- Université de Man (Côte d'Ivoire)
- Université Abdou Moumouni (Niger)



PRIX JEUNE SCIENTIFIQUE MDS - Le Matériel de Sondage

Christophe NORGEOT, Président de
MDS - Le Matériel de Sondage



Le prix GEOFCAN a été décerné à Clémence RYCKEBUSCH, doctorante à l'Université d'Orléans, affiliée au Bureau de Recherches Géologiques et Minières, et à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.

Programme

GEOFCAN 2023 - Programme détaillé - en italique, présentations à distance

Mardi 7 Novembre			
Horaire	Titre	Auteurs et autrices	Affiliations
08:30	Accueil		
Évaluer les risques naturels et anthropiques (Asfirane Fawzia)			
09:00	Utilisation Des Fibres Optiques Telecom Pour La Caractérisation Geotechnique A Haut Rendement Du Sous-Sol Urbain A Partir Des Ondes De Surface	Leroy Matéo (1), Gaudot Janis(1), Bitri Adhand (1), Bretaudeau François(1)	1 - BRGM (France)
09:18	Utilisation des methodes diffusives pour la detection de cavités	Dubois Frederic (1), Bourgeois Bernard, Darnet Mathieu	1 - BRGM (France)
09:36	Relation Entre Paléo-Chenaux Et Processus D'érosion Interne Autour Des Dignes De Protection Contre Les Inondations	Girolami Laurence (1) (2), Barde-Cabusson Stephanie(3), Ghorbani Ahmad(3), Vaudelet Pierre(3), Revil Andre(4), Valois Remi(5), Vella Claude(6), Carozza Jean-Michel(7), Burgat Jules(8), Chaouch Naim(8), Nicoleanu Frederic(9), Bonelli Stephane(8)	1 - RECOVER (France) ; 2 - GéoHydrosystèmes Continentaux ; 3 - NAGA Geophysics ; 4 CNRS ; 5 - EMMAH ; 6 - CEREGE ; 7 - LIENSs ; 8 - RECOVER ; 9 - Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly
09:54	Evolution De La Saturation En Eau D'une Paroi Calcaire Soumise A Un Feu	Verdet Cecile (1), Salmon Fabien (1), Colette Sirieix (1), Sylvain Matteo (1), Lacanette Delphine (1)	1 - Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Metiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M (France)
10:12	Numerical study of the pressure disturbances due to well injections	Vallier Berenice (1), Toussaint Renaud (1) (2), Fahs Marwan (1), Baujard Clement (3), Genter Alber (3), Flekkøy Eirik Grude (2), Måløy Knut Jørgen (2)	1 - Institut Terre Environnement Strasbourg (France), 2 - PoreLab, University of Oslo (Norvège), 3 - ES Géothermie (France)
10:30	Pause café		
Imager des structures cachées par le temps (archéogéophysique, sites industriels) (Guérin Roger)			
11:00	Mesures Magnétiques Multi-Échelles Au Sol Et En Drone Pour L'exploration De La Proche-Surface	Gavazzi Bruno (1), Bertrand Lionel (1), Goupil Margaux (1)	1 - ENEREX (France)
11:18	Enseigner Le Traitement De Données Radar De Sol Par Feuilles De Calcul Jupyter: Applications En Archéologie	Saintenoy Albane (1), Leger Emmanuel (1), Lambert Remi (1), Carrive Pierre (1)	1 - Géosciences Paris Saclay (France)
11:36	Utilisation Du Georadar Pour La Detection De Vestiges Archeologiques En Ville : Deux Cas D'etude Suivis De Tranchees De Diagnostic	Fores Benjamin (1), Hulin Guillaume (1) (2), Devevey Frederic (1), Paez-Rezende Laurent (1)	1 - Institut National de Recherches Archeologiques Preventives (France), 2 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols
11:54	La Polarisation Provoquee Des Particules Metalliques : Retours D'experiences De Terrain Et En Laboratoire	Kessouri Pauline (1), Ryckebusch Clemence (1), Rahamani Mohammed (1)	1 - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (France)
12:30	Déjeuner		

Mardi 7 Novembre			
Horaire	Titre	Auteurs et autrices	Affiliations
13:30	Posters		
13:30	De l'interet des mesures de polarisation provoquee en complements des mesures electriques pour l'etude des glissements de terrain, cas d'etudes dans les alpes françaises.	<u>Carrier Aurore</u> (1) (2), Meric Ombeline, Bottelin Pierre	1 - Société Alpine de Géotechnique [Gières] (France), 2 - Association Développement recherche Glissements de Terrain (France)
13:30	Évaluation géophysique de la géométrie et de la vulnérabilité d'un système dunaire anthropisé : cas de soliman (bassin méditerranéen)	<u>Ayari Sana</u> (1), Gabtni Hakim (1)	1 - Laboratoire Géoressource, LR15CERTE01, Centre de Recherches et des Technologies des Eaux de Borj Cédria, CERTE, 8020, Soliman, Tunisie (Tunisie)
13:30	Détection et caractérisation d'anciennes décharges cotières : étude de cas en côte normande avec les méthodes électrique et électromagnétique	<u>Nouveau Marie</u> (1), Cavalcante Fraga Luis Henrique (2)	1 - ENVISOL (France), 2 - UMR CNRS 6143 M2C (France)
13:30	Propriétés du regolite à l'observatoire de la zone critique de berambadi (Inde) par combinaison de tomographie de résistivité électrique (ERT) et audio-magnéto-tellurique (AMT)	<u>Sailhac Pascal</u> (1), Harrouet Titouan (1), Robain Henri (2), Camerlynck Christian (3), Baud Benjamin (4), Amelin Julien (5), Ruiz Laurent (6), Sekhar Muddu (7), Anbazhagan Panjamani (5), Riotte Jean (8)	1 - Géosciences Paris Saclay (France), 2 - Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (France), 3 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (France), 4 - Hydrosiences Montpellier (France), 5 - Indian Institute of Science [Bangalore] (Inde), 6 - Sol Agro et hydrosystème Spatialisation (France), 7 - Indo-French Cell for Water Sciences (Inde), 8 - Géosciences Environnement Toulouse (France)
13:30	Calibration d'un modèle hydrologique à l'aide de mesures de résonance magnétique protonique	<u>Gru Guillaume</u> (1), Lesparre Nolwenn (1), Ackerer Philippe (1), Belfort Benjamin (1), Girard Jean-Francois (1)	1 - Institut Terre Environnement Strasbourg (France)

Mardi 7 Novembre			
Horaire	Titre	Auteurs et autrices	Affiliations
13:30	Posters		
13:30	Mesurer le potentiel spontane electrique en milieu forestier pour observer les echanges hydriques dans le continuum subsurface-vegetation-atmosphere	<u>Lesparre Nolwenn</u> (1), <u>Matthey Pierre-Daniel</u> (1), <u>Hernandez Alain</u> (1), <u>Bonal Damien</u> (2), <u>Carriere Simon</u> (3), <u>Koffi Haldan, Elie, Bertrand</u> (1), <u>Ackerer Philippe</u> (1), <u>Marquis Guy</u> (1), <u>Jouiniaux Laurence</u> (1), <u>Jougnot Damien</u> (3), <u>Belfort Benjamin</u> (1)	1 - Institut Terre Environnement Strasbourg (France), 2 - SILVA (France), 3 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystemes et les Sols (France)
13:30	Profondeur de l'interface eau douce – eau salee a partir du time domain electromagnetism (tdem) et de l'approche hydrostatique de ghyben-herzberg au sud du plateau de sakete et de sa plaine littorale (benin)	<u>N'tcha T.</u> (1), <u>Yalo Nicaise</u> (1), <u>Alassane A.</u> (1), <u>Boucher Marie</u> (2), <u>Alle C.</u> (3), <u>Elegbede B.</u> (3)	1 - Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2 - IRD Représentation du Niger (Niger), 3 - Institut National de l'Eau (Bénin)
13:30	Le prospecteur doit-il prendre en compte la polarisation electrique dans la gamme de frequence 10 khz– 100 khz ?	<u>Tabbagh Alain</u> (1), <u>Simon François-Xavier</u> (2), <u>Vitale Quentin</u> (3)	1 - Métis (France), 2 - INRAP, 3 - EVEHA
13:30	Utilisation des méthodes géophysiques pour la caractérisation et le suivi de l'effet du biochar sur les propriétés de sols urbains	<u>Pasquet Sylvain</u> (1) (2), <u>Thiesson Julien</u> (1), <u>Bodet Ludovic</u> (1), <u>Jougnot Damien</u> (1), <u>Vasconez Marco</u> (1), <u>Laden Alicia</u> (1), <u>Guerin Roger</u> (1), <u>Querea Katell</u> (1), <u>Delarue Frederic</u> (1)	1 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystemes et les Sols (France), 2 - Observatoire des sciences de l'univers Ecce Terra [Paris] (France)
13:30	Ohmpi v2024, résistivimètre open-source : derniers développements et monitoring hydrogéophysique	<u>Watlet Arnaud</u> (1), <u>Clement Remi</u> , <u>Blanchy Guillaume</u> , <u>Camus François</u> , <u>Dubois Vivien</u> , <u>Fargier Yannick</u> , <u>Forquet Nicolas</u> , <u>Guyard Helene</u> , <u>Imig Arnold-Fred</u> , <u>Quatela Valerie</u> , <u>Kaufmann Olivier</u>	1 - Université de Mons (20, place du Parc, B7000 Mons Belgique)
13:30	Pyrefra – traitement et inversion de donnees de sismique refraction	<u>Zeyen Hermann</u> (1), <u>Leger Emmanuel</u> (1)	1 - Géosciences Paris Saclay (France)
15:00	Table ronde : Partenariats publics-privé (J.F. Girard)		
	Andrea Ingusci réseaux Fablab		
	Marine Stoll Pépîte Etena.		
	1/ Les relations recherche / entreprise pendant la thèse:		
	- les projets collaboratifs, thèses Cifre		
	- de la thèse à la start-up, Bruno Gavazzi de chez Enerex		
	- opportunité jeunes chercheurs / international		
	2/ Les opportunités avant et pendant la thèse :		
	- le dispositif fablab à l'université de Strasbourg		
	Conclusions : création du fablab de l'EOST en 2023-2024 donnant accès aux plateformes instrumentales et analytiques de l'EOST/ITES.		
16:30	Pause café		
17:00	Visite des musées de l'EOST		
19:30	Dîner de Gala Pavillon Joséphine Parc de l'orangerie		

Mercredi 8 novembre			
Horaire	Titre	Auteurs et autrices	Affiliations
8:30	Comprendre les processus de la zone critique (Seger Maud)		
8:30	Caractérisation géophysique multi-méthodes et multi-échelles de la zone des calcaires hétérogènes de Beauce	Ryckebusch Clemence (1) (2), Baltassat Jean-Michel (1), Deparis Jacques (1), Kessouri Pauline (1), Legchenko Anatoly (3), Amraoui Nadia (1), Abbas Mohamad (2), Azaroual Mohamed (1) (2)	1 - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (France), 2 - Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (France), 3 - Institut des Géosciences de l'Environnement (France)
8:48	Déterminer les flux d'eau en proche surface grâce aux chroniques de température à différentes profondeurs sur deux sites d'études	Harrouet Titouan (1), Leger Emmanuel (1), Sailhac Pascal (1), Zeyen Hermann <Hermann.Zeyen@U-Psud.Fr> (1), Lambert Remi (1), Maugis Pascal (2), Riviere Agnes (3)	1 - Géosciences Paris Saclay (France), 2 - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (France), 3 - Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris) (France)
9:06	Géophysique périglaciaire pour identifier les compartiments hydrogéologiques et leurs connexions	Valois Rémi (1), Navarro Gonzalo (2) (3), Buvat Solene (4), Bresciani Etienne (2)	1 - Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (France), 2 - Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (Chili), 3 - Universidad de La Serena (Chili), 4 - Université Clermont Auvergne (France)
9:24	Évaluation préliminaire par tomographie électrique de la continuité des bancs de grès et du potentiel hydrogéologique associé au niveau du bassin versant de kamech (tunisie)	Hamrouni Montassar (1), Hamrouni Mohamed, Gabtni Hakim, Coulouma Guillaume, Azaiez Hajer, Raclet Damien, Kortas Oussama, Hamdi Radhouane	1 - Centre de Recherche et Technologies des Eaux (Tunisie)
9:42	Prédiction de la profondeur des eaux souterraines pour l'optimisation des ouvrages d'hydraulique pastorale dans le sahel : application des méthodes géophysiques rmp et tden	Issoufou Ousmane Boukari (1), Abdou Mahaman Rabilou (1), Nouhou Chaweye Yacouba (1), Nazoumou Yahaya (1), Favreau Guillaume (2), Boucher Marie (2), Lechenko Anatoly (2), Abdou Babaye Maman Sani (3)	1 - Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger (Niger), 2 - Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France (France), 3 - Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, UMR SERMUG, Université Dan Dicko Dan Koulodo, Maradi, Niger (Niger)
10:00	Pause café		

Mercredi 8 novembre			
Horaire	Titre	Auteurs et autrices	Affiliations
10:30	Comprendre les processus de la zone critique (Robain Henri)		
10:30	Influence de l'abattage d'arbres sur le comportement hydrique du massif de lascaux	Larcanché Marie (1), Sirieux Colette (1), Domec Jean-Christophe (2), Salmon Fabien (1), Mateo Sylvain (1), Riss Joëlle (1), Perrin Stephane, Verdet Cecile (1)	1 - Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France), 2 - Interactions Sol Plante Atmosphère (France)
10:48	Suivi pluriannuel par tomographie électrique d'une parcelle forestière (forêt de barbeau, seine-et-marne, france)	Pessel Marc (1), Delpierre Nicolas (1), Berveiller Daniel (1), Lambert Rémi (1), Léger Emmanuel (1), Morfin Alexandre (1), Vincent Gaëlle (1), Courtin Alexandra (1)	1 - Laboratoire Géosciences Paris-Sud (Université Paris-Sud, Laboratoire Géosciences Paris-Sud, Bâtiment 504, 91405 Orsay Cedex, FRANCE France)
11:06	Utilisation de la géophysique de proche-surface pour étudier les écosystèmes forestiers	Loiseau Bertille (1), Carriere Simon (1), Jougnot Damien (1), Singha Kamini (2), Mary Benjamin (3), Delpierre Nicolas (4), Guerin Roger (1), Martin-St Paul Nicolas (5)	1 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Solis (France), 2 - Colorado School of Mines (États-Unis), 3 - Geoscience Department (Italie), 4 - Ecologie Systématique et Evolution (France), 5 - Ecologie des Forêts Méditerranéennes (France)
11:24	Apport des méthodes RMP et TDEM à l'évaluation des ressources en eau disponibles pour l'irrigation en climat semi-aride – cas de Birni N'Konni	Nouhou Chaweye Yacouba (1), Boucher Marie (2), Nazoumou Yahaya (1), Favreau Guillaume (2), Abdou Mahaman Rabilou (1), Issoufou Ousmane Boukari (1), Legchenko Anatoly (2)	1 - Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger (Niger), 2 - Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, INRAE, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France (France)
11:42	Geometric characterization of freshwater–saltwater interface in a poorly piezometered area. A case study of the upper aquifers of the agoènyivé plateau in the sedimentary coastal basin of togo	Yomo Mawulola (1) (2), Yalo Nicaise (3) (4), Gnazou M.T. (5) (6), Bleza A. (5) (6), Gnazou M.E. (5) (6), Siliman S. (7)	1 - West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land use (WASCAL) (Bénin), 2 - Applied Hydrology and Environment Laboratory (Bénin), 3 - University of Abomey-Calavi (Bénin), 4 - Applied Hydrology Laboratory/National Water Institute (Bénin), 5 - Applied Hydrology and Environment Laboratory (Bénin), 6 - University of Lomé (Togo), 7 - Trevecca Nazarene University (Etats-Unis)
12:00	Déjeuner		

Mercredi 8 novembre			
Horaire	Titre	Auteurs et autrices	Affiliations
13:00	Relier les propriétés géophysiques aux paramètres physico-chimiques (Pessel Marc)		
13:00	Modélisation pétrophysique des processus de biodégradation	<u>Zohore Urie</u> (1) (2), Jougnot Damien (1), Guérin Roger (1), Kessouri Pauline (2), Deparis Jacques (2)	1 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (France), 2 - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (France)
13:18	Caractérisation géophysique des zones cibles à une minéralisation aurifère à souèpleu (danane, ouest de la cote d'Ivoire)	<u>Ouedraogo Moussa</u> (1), Ouattara Zie (1), <u>Sylla Ismaël</u> (1), Diaby Abou Junior, Pessel Marc (2), Kamagate Bamory (3)	1 - Université de Man (Côte d'Ivoire), 2 - Université Paris Saclay (France), 3 - Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire)
13:36	Contribution des sondages par résonance magnétique protonique (RMP) à l'identification des sites de forages productifs pour un développement de l'irrigation dans la basse terrasse du fleuve niger	<u>Rabilou Abdou Mahaman</u> (1), Issoufou Ousmane Boukari, Nazoumou Yahaya, Boucher Marie, Favreau Guillaume Legchenko Anatoly	1 - Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)
13:54	Identification des aquifères par imagerie géophysique en zone de montagne : cas des aquifères fracturés de Danane, ouest de la cote d'Ivoire	<u>Ouedraogo Moussa</u> (1), <u>Sylla Ismaël</u> (1), Ouattara Zie (1), Diaby Abou Junior (1), Pessel Marc (2), Kamagate Bamory (3)	1 - Université de Man (Côte d'Ivoire), 2 - Université Paris-Saclay (France), 3 - Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire)
14:15	Développer les outils d'analyse (modélisations, inversions, apprentissage machine...) (Lesparre Nolwenn)		
14:15	Caractérisation de défauts le long de la plateforme ferroviaire par inversion de la dispersion des ondes de surface : cas d'étude le long de la lgv sud-est	<u>Burzawa Audrey</u> (1) (2), Bodet Ludovic (1), Dangeard Marine (2), Cunha Teixeira Jose (1) (2), Cardenas Julio (1), Sanchez Gonzalez Ramon (1) (3), Fonda Marie (2), Dhemaied Amine (2)	1 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (France), 2 - SNCF Réseau [La Plaine st Denis] (France), 3 - Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris) (France)
14:33	Le monitoring sismique pour la détermination de propriétés mécaniques de la proche surface le long de lignes à grande vitesse	<u>Cunha Teixeira Jose</u> (1) (2) (3), Bodet Ludovic (1), Hallier Amelie (2), Burzawa Audrey (1) (2), Dangeard Marine (2), Fonda Marie (2), Cardenas Julio (1), Sanchez Gonzalez Ramon (3), Gesret Alexandrine (3), Riviere Agnes (3), Dheamied Amine (2), Boisson Gaboriau Josephine (2)	1 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (France), 2 - SNCF Réseau [La Plaine st Denis] (France), 3 - Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris) (France)
14:51	Inversion combinées de données électromagnétiques et électriques	<u>Mohand-Saïd Ali</u> (1), Marquis Guy (1), Girard J.F. (1)	1 - Institut Terre Environnement Strasbourg (France)
15:09	Validation des anomalies magnétiques des filons de pegmatite sur des sections de tomographie électrique dans la commune de ouesse (centre – benin)	<u>Yalo Nicaïse</u> (1), Kounika E. (1), Tchokpon K.G. (2), Goncalves T. (2), Zannou M. (2)	1 - Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (Bénin), 2 - Office Béninois des Recherches Géologiques et Minières (Bénin)
15:30	Pause café		

Évaluer les risques naturels et anthropiques

DE L'INTERET DES MESURES DE POLARISATION PROVOQUEE EN COMPLEMENTES DES MESURES ELECTRIQUES POUR L'ETUDE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN, CAS D'ETUDES DANS LES ALPES FRANÇAISES.

CARRIER AURORE¹, MERIC OMBELINE², BOTTELIN PIERRE¹

¹ SAGE Ingénierie, Grenoble, FRANCE, a.carrier@sage-ingenierie.com

² ADRGT, Grenoble, FRANCE, o.meric@adrgt.org

RESUME

La dynamique des glissements de terrain est étroitement liée à la distribution spatiale de la pression dans les pores, de la perméabilité et à la teneur en éléments argileux. Les matériaux non-argileux saturés et les argiles étant tout deux de très bons conducteurs, les méthodes électriques échouent souvent à les discriminer. Cet article présente des cas d'études pour lesquels la méthode de polarisation provoquée a permis d'identifier des zones imperméables/perméables sur des glissements de terrain. Une variable complémentaire pour discriminer les différents terrains est obtenue par la distribution des temps de relaxation via une acquisition en domaine temporel sur des temps suffisamment long. La méthode répétée dans le temps permet d'évaluer l'évolution de l'état hydrique des sols.

Mots clés : Géophysique, méthodes électriques, polarisation provoquée, classification automatique

ABSTRACT

Landslides dynamic is related to the spatial distribution of pore pressure, hydraulic conductivity and clay content. Fully saturated clay-free materials and clays are both able to conduct the electrical current efficiently. As a consequence, standard direct current methods fail at distinguish between them. This study presents case studies for which induced polarization has proven to be an efficient tool to identity impermeable/permeable materials within different types of landslides. The addition of the mean relaxation time variable, thanks to an acquisition performed on long enough duration time, enables to get a complementary useful information to discriminate the different materials. Time-lapse acquisitions provide information about the evolution of the hydrological state of the soils.

Key words: Geophysics, electrical methods, induced polarization, clustering

INTRODUCTION

Les glissements de terrain représentent un des risques majeurs pour les infrastructures de montagne (Malet 2007). Leur surveillance, l'identification et la quantification des volumes instables ainsi que la compréhension des processus à l'origine de leur déstabilisation est donc un enjeu humain, politique et économique majeur.

Les fortes pluies et la fonte rapide de la neige au printemps amplifient fortement l'activité des glissements de terrain. Ce qui souligne l'importance des variations de teneur en eau et de pression d'eau dans les pores dans le déclenchement des glissements de terrain (Malet 2005). La distribution spatiale des zones perméables/imperméables (i.e. la distribution spatiale des zones argileuses/silteuses/limoneuses) au sein des glissements est par ailleurs un élément fondamental de compréhension de la dynamique évolutive de ces objets du fait de l'information apportée quant aux circulations de fluides.

Jusqu'à présent, les méthodes géophysiques et en particulier les méthodes électriques sont des outils efficaces dans la caractérisation des glissements de terrain (Gance 2016, Hellman 2017, Holmes 2020). Cependant, peu d'études se sont attachées à discriminer les zones imperméables des zones perméables (Marescot 2008, Revil 2020, Orozco 2022). Pour cela, les méthodes de polarisation provoquée (PP) s'avèrent être des outils prometteurs. A partir d'un modèle pétrophysique et de

données de laboratoire, Revil 2020 a déterminé la teneur en eau et la perméabilité dans un glissement de terrain argileux dans les alpes françaises. Orozco 2022 a quant à lui déterminé les propriétés hydrauliques des matériaux au sein d'un glissement de terrain à partir de mesures de polarisation provoquée dans le domaine temporel et fréquentiel. Il a notamment souligné l'importance de la prise en compte du contenu spectral des données de polarisation provoquée déjà mis en évidence par Gazoty 2012, Doetsch 2015 et Martin 2020.

Notre étude propose la réalisation de campagnes de polarisation provoquée (PP) en domaine temporel complémentaires aux campagnes des mesures de résistivité électrique sur des glissements de terrain affectant des infrastructures de montagnes pour différents contextes géologiques. Cette étude propose de tester la pertinence des informations complémentaires apportées par la PP, même sans connaissance préalable des mécanismes de polarisation à l'œuvre au sein des matériaux, par rapport à des mesures de résistivité classiques. Ces informations sont-elles utiles pour identifier des zones clés dans la dynamique des glissements de terrain ?

METHODOLOGIE

Les données de polarisation provoquée sont acquises dans le cadre d'études réalisées par la SAGE ou l'ADRGT pour la sécurisation d'infrastructures de montagne menacées par des glissements de terrain.

Le protocole d'acquisition en domaine temporel utilise deux câbles séparés (un pour l'injection du courant et un pour la mesure de différences de potentiels) et un protocole d'acquisition en gradient multiple ou full range gradient (Zou 2020). Les protocoles sont optimisés pour être utilisés sur un terrameter LS2 (ABEM) à 8 canaux. Un contrôle qualité est réalisé sur les courbes de décroissances et les formes d'ondes sont enregistrées afin d'être vérifiées (Martin 2020). Les données négatives ou qui ne présentent pas une exponentielle décroissante sont systématiquement filtrées.

Les données obtenues sont inversées à l'aide des outils BERT et PyGIMLI (Rucker 2017, Martin 2020). Afin d'optimiser l'exploitation et l'interprétation des résultats, l'extraction de la constance de temps de relaxation peut être réalisée selon un modèle Cole Cole ou une décomposition de Debye (Gazoty 2012, Doetsch 2015, Nordsiek and Weller 2008, Tarasov et titov 2007). Une classification automatique (Gaussian Mixture Model) des résultats permet de mettre en évidence des groupes aux propriétés physiques similaires et de faciliter la lecture et l'interprétation des résultats.

CAS D'ETUDES

Etude de la structure de glissement de terrain

Plusieurs cas d'études anonymisés ont été réalisés sur des glissements de terrain affectant notamment des dépôts glaciaires de types moraines et limons sur divers substratums (fig 1). Pour ces cas d'études, la PP permet de mettre en évidence des cheneaux perméables dans les dépôts de surface qui n'étaient pas identifiés par l'utilisation des méthodes de résistivité électrique seules.

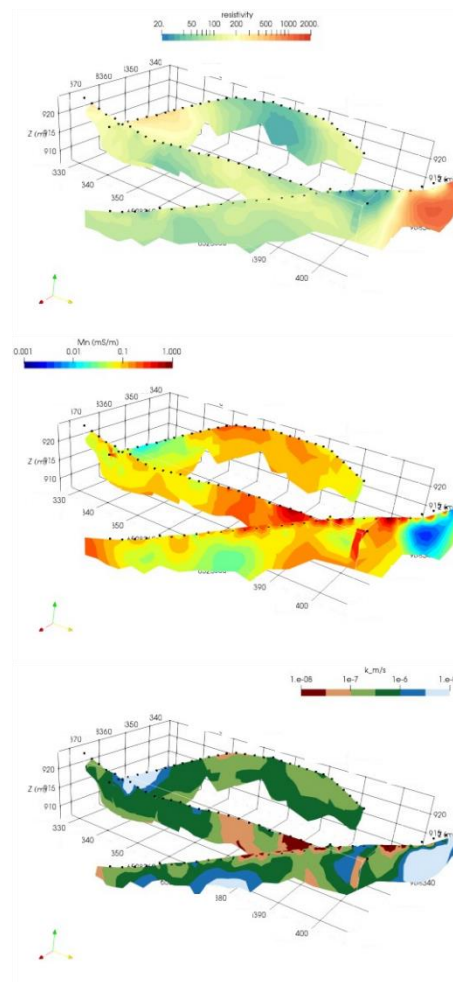


Fig 1 : Modèles de résistivité, chargeabilité normalisée et perméabilité (selon relation de Weller 2015) sur un cas d'étude de glissement de terrain dans des limons sur un substratum calcaire.

Etude des circulations de fluides dans les glissements de terrain en time lapse

Plusieurs campagnes de mesures de PP ont été réalisées à différentes saisons sur le site de MontGombert (73) dans le cadre du projet européen POIA-MIROIR. Le glissement de terrain est constitué de schistes altérées et fracturés (fauchage des bancs subverticaux) reposant sur un substratum de schistes plus compact. Sur ce site, la comparaison des modèles obtenus par l'inversion time-lapse des mesures réalisées au printemps et à la fin de l'été permet de mettre en évidence des zones d'accumulation de fluides (fig 2). Dans ce cas, on note que les variations les plus importantes et significatives sont observées sur les variables de polarisation provoquée (chargeabilité normalisée et constante de temps de relaxation). Ces zones sont en accord avec les mesures de déformation obtenues par la méthode TSM basée sur la comparaison d'images optiques prises au cours du temps. Une classification automatique réalisée sur les variations des différents paramètres permet d'évaluer les volumes sensibles en jeu.

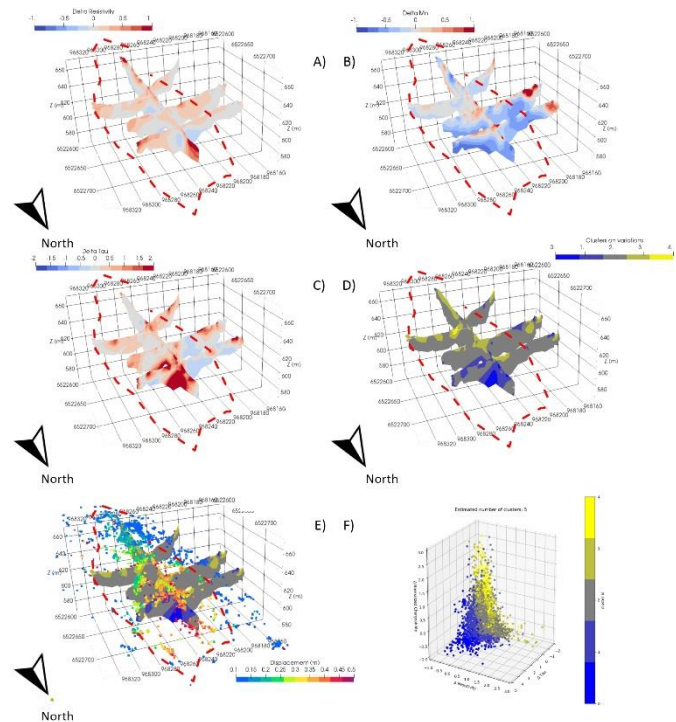


Fig 2 : Variations des modèles de résistivité (A), chargeabilité normalisée (B), constante de temps de relaxation (C) entre Mai et Septembre 2022 et résultats de la classification automatique des variations (D, F) des différentes variables en regard des déplacements de surface obtenus par la méthode TSM (Desrues 2022) (E). (Carrier et al. 2023 accepté Landslides)

CONCLUSIONS

Les études réalisées sur différents sites de glissements de terrain dans les Alpes ont permis de mettre en évidence l'intérêt de la méthode de polarisation provoquée (PP) comme complément des méthodes géophysiques classiques pour la caractérisation des glissements de terrain. La méthode permet notamment d'identifier des volumes imperméables au sein des masses glissées et de mieux comprendre la dynamique des écoulements au sein des glissements de terrain.

La réalisation de mesures PP à différentes dates permet aussi de mieux mettre en évidence les zones de circulation et d'accumulation de fluides et ainsi d'évaluer les volumes concernés. Cela apporte notamment des informations complémentaires afin de dimensionner les systèmes de protection des infrastructures.

L'apport de la méthode est particulièrement significatif pour identifier des éléments imperméables dans des contextes de matériaux saturés. Cependant, il faut noter que l'obtention d'un signal utilisable dans le cas de la PP en domaine temporel demande des précautions d'acquisition importantes (dédoublage des câbles et/ou protocoles adaptés, temps d'injection longs, bons contacts électriques ...) et des protocoles adaptés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Carrier, A., Meric, O., & Bottelin, P. (2023).** Characterizing landslide dynamics from time-lapse time domain induced polarization and ground based imaging, case study of the MontGombert landslide (French, Alps). *Landslides*, *accepted*.
- Doetsch, J., Ingeman-Nielsen, T., Christiansen, A. V., Fiandaca, G., Auken, E., & Elberling, B. (2015).** Direct current (DC) resistivity and induced polarization (IP) monitoring of active layer dynamics at high temporal resolution. *Cold Regions Science and Technology*, *119*, 16-28.
- Gance, J., Malet, J. P., Supper, R., Sailhac, P., Ottowitz, D., & Jochum, B. (2016).** Permanent electrical resistivity measurements for monitoring water circulation in clayey landslides. *Journal of Applied Geophysics*, *126*, 98-115.
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2012).** Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, *10*(6), 575-586.
- Hellman, K., Ronczka, M., Günther, T., Wennermark, M., Rücker, C., & Dahlin, T. (2017).** Structurally coupled inversion of ERT and refraction seismic data combined with cluster-based model integration. *Journal of Applied Geophysics*, *143*, 169-181.
- Holmes, J., Chambers, J., Meldrum, P., Wilkinson, P., Boyd, J., Williamson, P., Donohue, S. (2020).** Four-dimensional electrical resistivity tomography for continuous, near-real-time monitoring of a landslide affecting transport infrastructure in British Columbia, Canada. *Near Surface Geophysics*, *18*(4), 337-351.
- Malet, J. P., Durand, Y., Remaître, A., Maquaire, O., Etchevers, P., Guyomarc'h, G., ... & Van Beek, L. P. H. (2007).** Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley. In *Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change—Challenges and Solutions*, edited by: McInnes, R., Jakeways, J., Fairbank, H., and Mathie, E., Taylor & Francis, London (pp. 195-205).
- Malet, J. P., Laigle, D., Remaître, A., & Maquaire, O. (2005).** Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. *Geomorphology*, *66*(1-4), 215-235.
- Marescot, L., Monnet, R., & Chapellier, D. (2008).** Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology*, *98*(1-2), 18-28.
- Martin, T., Günther, T., Orozco, A. F., & Dahlin, T. (2020).** Evaluation of spectral induced polarization field measurements in time and frequency domain. *Journal of Applied Geophysics*, *180*, 104141.
- Nordsiek, S., & Weller, A. (2008).** A new approach to fitting induced-polarization spectra. *Geophysics*, *73*(6), F235-F245.
- Orozco, A. F., Steiner, M., Katona, T., Roser, N., Moser, C., Stumvoll, M. J., & Glade, T. (2022).** Application of induced polarization imaging across different scales to understand surface and groundwater flow at the Hofermuehle landslide. *CATENA*, *219*, 106612.
- Revil, A., Ahmed, A. S., Coperey, A., Ravel, L., Sharma, R., & Panwar, N. (2020).** Induced polarization as a tool to characterize shallow landslides. *Journal of Hydrology*, *589*, 125369.
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. M. (2017).** pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, *109*, 106-123.
- Tarasov, A., & Titov, K. (2007).** Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements. *Geophysical Journal International*, *170*(1), 31-43.
- Zhou, B., Bouzidi, Y., Ullah, S., & Asim, M. (2020).** A full-range gradient survey for 2D electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, *18*(6), 609-626.

RELATION ENTRE PALÉO-CHENAUX ET PROCESSUS D'ÉROSION INTERNE AUTOUR DES DIGUES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

GIROLAMI L.¹, BARDE-CABUSSON S.², GHORBANI A.², VAUDELET P.², REVIL A.³,
VALOIS R.⁴, VELLA C.⁵, CAROZZA J.-M.⁶, BURGAT J.¹, CHAOUCH N.¹, NICOLEAU F.⁷,
BONELLI S.¹

¹INRAE, Aix-Marseille Université, RECOVER, Aix-en-Provence, laurence.girolami@inrae.fr

²R&D Naga Geophysics, Chambéry, pierre.vaudelet@naga-geophysics.com

³CNRS, Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont-Blanc, EDYTEM, Le Bourget du Lac, andre.revil@univ-smb.fr

⁴INRAE, Avignon Université, EMMAH, Avignon, remi.valois@univ-avignon.fr

⁵Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Collège de France, CEREGE, Aix-en-Provence, vella@cerege.fr

⁶La Rochelle Université, LIENSs, La Rochelle, jean-michel.carozza@univ-lr.fr

⁷Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (SMBVA), Saint-Paul de Fenouillet, digues.agly@gmail.com

RÉSUMÉ

Parmi les processus d'érosion interne qui affectent les digues de protection, l'érosion des sols de fondation se manifeste en surface par l'apparition de sand-boils et de fontis, en bordure des digues, pendant les périodes de crue et de décrue, laissant présumer de mouvements de sol en profondeur en réponse aux écoulements internes initiés dans la fondation. Dans cet exposé, nous présenterons le résultat d'un travail pluridisciplinaire, basé sur l'observation géophysique, qui nous a permis de faire le lien entre l'histoire de la rivière (morphologie et détection de paléochenaux à quelques mètres de profondeur) et les processus d'érosion interne qui affectent les sols de fondation sur lesquels reposent les digues de protection.

Mots clés : *Observation, érosion interne, polarisation provoquée, paléo-chenaux, imagerie géophysique,*

ABSTRACT

Among the internal erosion processes that affect the flooding protection dykes, the erosion of the underlying soils can be described as the appearance of sand-boils and sinkholes, at the vicinity of the dyke, during and following the flooding events, assuming that hydromorphodynamical processes are developed in response to internal flows initiated within the foundation. In this presentation, we present the result of a multidisciplinary work, based on geophysical observations, which allowed us to make the link between the history of the river (morphology and detection of paleochannels in few meters depth) and the internal erosion processes that affect the soils above which stand the flooding protection dikes.

Key words: *Observation, internal erosion, induced polarization, paleochannels, geophysical imaging,*

INTRODUCTION

Dans ce travail, nous nous intéressons aux processus d'érosion interne qui affectent les sols de fondation sur lesquels reposent les digues de protection contre les inondations. Pendant les épisodes de crues et de décrues, de nombreuses signatures de surface sont répertoriées à proximité des digues (sand-boils, fontis, instabilités gravitaires; Figure 1), laissant présumer du développement de certains phénomènes physiques (fluidisation, liquéfaction, compaction, décompaction, colmatage) à faible profondeur dans les sols généralement constitués de dépôts fluviaux grossiers très perméables. Contrairement aux ouvrages hydrauliques continuellement en charge, comme les barrages pour lesquels l'auscultation organisée et réglementée depuis plusieurs années permet le suivi continu des grandeurs physiques mesurables, les digues fluviales de protection (et leur fondation) souffrent d'un manque de système de surveillance adapté et établi. L'une des principales raisons de cette lacune est attribuée à la fréquence aléatoire des sollicitations hydrauliques, de courte durée, qui ne surviennent qu'en périodes de crue. Cette spécificité induit alors des verrous scientifiques et techniques qui limite l'organisation d'un système d'observation pertinent [1], à l'origine d'un manque de compréhension et de description physique des processus mis en jeu [2-4].



Fig.1- Exemples de signatures d'érosion observées en 2012, 2013, 2014 à proximité des digues de l'Agly en période de crue et de décrue : sand-boils (a), fontis (b,c), effondrements (d) (Photos INRAe).

En géomécanique, la description de ces processus d'érosion de sols repose principalement sur un ensemble de modèles conceptuels qui a permis l'émergence d'expériences de laboratoire et le développement de simulations numériques [2;3;5-9]. Ces travaux manquent cependant d'observations in situ qui permettraient de retracer l'évolution spatio-temporelle des différents processus mis en jeu aux différentes échelles. Identifier leurs origines, en termes de précurseurs et de signatures, devient alors une priorité. C'est en nous plaçant à l'interface entre les communautés de géomécanique, de géophysique, et de géomorphologie, que nous avons déployé une démarche d'observation et d'analyse, initiée par l'acquisition de mesures électriques in-situ (EM31, Polarisation Provoquée), dans l'objectif de surmonter les verrous persistant de la littérature. Ces observations ont été réalisées sur les sols de fondation des digues de l'Agly (Pyrénées-Orientales). Construites dans les années 1970 pour protéger les populations de Clair, de Pia, et de Saint-Laurent de la Salanque des risques d'inondations, elles constituent un véritable laboratoire naturel, sur lequel deux cas de rupture par brèche ont déjà été enregistrés en 1999 et 2013 (Figure 2) [10]. Malgré les nombreuses expertises réalisées depuis 20 ans, ces phénomènes demeurent toujours inexplicables.

DÉMARCHE EMPLOYÉE

Observation multi-échelle des phénomènes

Afin d'acquérir une vision globale des phénomènes, nous cherchons à les étudier sur 3 échelles de temps et d'espace (Figure 2). Aux grandes échelles, c-à-d à l'échelle du système d'endiguement et à l'échelle du Siècle, nous cherchons à cartographier les paléo-chenaux, localisés à quelques mètres de profondeur, pouvant constituer des zones d'érosion préférentielle. A l'échelle du tronçon de digue et à l'échelle de la crue, nous cherchons à localiser les anomalies pour étudier les processus hydromorphodynamiques internes dans les zones principalement affectées pendant les crues.

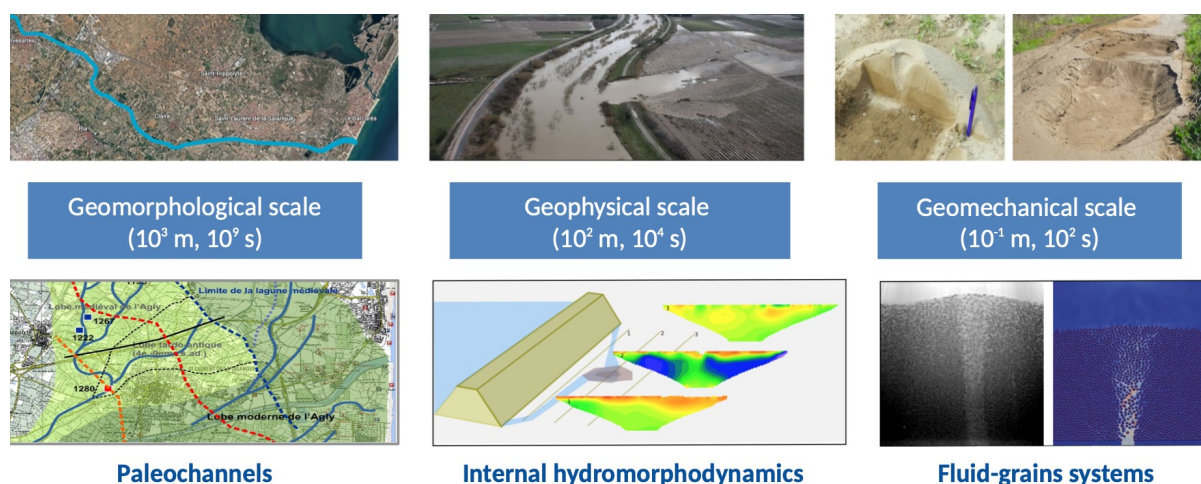


Fig. 2- Observation et description multi-échelles des processus d'érosion interne affectant les sols de fondation des digues de protection contre les inondations.

À l'échelle de la signature d'érosion et aux échelles de temps courtes, nous cherchons à reproduire ces processus en laboratoire, sous conditions maîtrisées, afin d'identifier les mécanismes physiques qui contrôlent ces phénomènes.

Couplage des méthodes électriques sur notre zone d'intérêt

Dans ce travail, nous nous sommes principalement concentrés sur l'observation d'un tronçon de digue, autour duquel de nombreuses signatures d'érosion apparaissent en période de crues, et basée sur l'acquisition d'une cartographie surfacique de mesures de conductivité électrique (moyennées sur les 6 premiers mètres de profondeur) et de profils verticaux de polarisation provoquée (mesures combinées de conductivité électrique et de chargeabilité) sur 25 mètres de profondeur, suffisamment resserrés pour permettre la réalisation d'une reconstruction tri-dimensionnelle au droit des signatures. La combinaison de ces mesures nous permettent d'obtenir des informations sur les propriétés hydromécaniques du sol, enrichies de carottes sédimentaires réalisées sur 6 mètres de profondeur en pied de digue. Les mesures de chargeabilité, pilotées par la capacité d'échange cationique donnée par les 4 cations basiques présents dans l'argile et absents dans l'eau et le sable, nous permettent également de distinguer si le milieu est saturé en argile ou saturé en eau, dans les cas où les mesures de conductivité associées sont très proches. Ces informations s'avèrent particulièrement pertinentes dans le présent contexte d'une ancienne rivière en tresse récemment endiguée.

RÉSULTATS

La cartographie surfacique obtenue à partir de mesures de conductivité électrique du sol, réalisées autour de la digue (entre 0 et 6m de profondeur) à l'aide d'un EM31, nous permettent de détecter la présence de zones perméables très épaisses (supérieures à 6m) en bordure de digue. L'analyse des carottes sédimentaires réalisées en pied de digue indiquent une matrice sableuse fine à grossière avec la présence de graviers, et dont la granulométrie augmente avec la profondeur. Les calculs de teneur en eau, réalisés à partir des profils verticaux de conductivité et de chargeabilité normalisée, réalisées perpendiculairement à la digue : depuis la rivière jusqu'au val protégé, illustrent quant-à-eux la présence d'anciens méandres de rivières comblés par des dépôts fluviaux sablo-graveleux au-dessus d'un encaissant argileux. Ces paléo-chenaux constituent les sols de fondation de la digue qui s'étendent sur environ 60 mètres de large (dont 25 à 35 mètres sont situés au niveau du val protégé) et sur 8 à 16 mètres de profondeur. La morphologie du système fluvial permet alors la circulation des écoulements internes, initiés en période de crues, le long du paléo-chenal délimité par son socle argileux, et justifie la présence de résurgences et de zones d'effondrement observées en pied de digue et sur une trentaine de mètres au large du val protégé.

CONCLUSIONS

Ces premiers résultats obtenus au droit des signatures de surface (fontis, sand-boils) réalisées sur les sols de fondation des digues de l'Agly (Pyrénées-Orientales) nous montrent que ces processus d'érosion répétés sont contrôlés par l'interface séparant les matériaux imperméables (limons argileux, argiles) formant le noyau de la digue et le socle des dépôts fluviaux plus grossiers (sables moyen à graviers) qui s'étendent sur une trentaine de mètres de part et d'autres de l'ouvrage et une douzaine de mètres de profondeur. Ces dépôts, associés à la présence d'anciens méandres de rivières, permettent le drainage des écoulements internes en période de crue, le long de l'interface, et leur résurgence sur le val protégé, pouvant expliquer la présence de désordres et d'anomalies fréquemment observées le long de l'ouvrage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **MÉRIAUX P., MONIER T., TOURMENT R., MALLET T., PALMA-LOPES S., MAURIN J., PINHAS M., 2013**, L'auscultation des digues de protection contre les inondations: un concept encore à inventer, in *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions*, Royet et Bonelli (edt).
- [2] **BONELLI S., 2012**, Erosion des géomatériaux, *Traité MIM, Série Risques Naturels, Hermes*, pp. 416.
- [3] **BONELLI S., 2013**, Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees, *Wiley/ISTE*, pp. 388.
- [4] **VAN M.A., ROSENBRAND E., TOURMENT R., SMITH P., ZWANENBURG C., 2022**, Failure paths for levees, *International. Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. (ISSMGE)*, TC201.
- [5] **VAN BEEK V. M., KNOEFF H., SELMEIJER H., 2011**, Observations on the process of backward erosion piping in small-medium-and full-scale experiments, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8), 1115-113, DOI: 10.1080/19648189.2011.9714844.
- [6] **TAKAHASHI A., HORIKOSHI K., MARUYAMA T., 2017**, Physical modelling of backward erosion piping in levee foundation subjected to repeated flooding, *25th Meeting European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams & their Foundations*, Delft, Netherlands, 4-7.
- [7] **ROBBINS, B. A., SHARP M. K., CORCORAN M. K., 2015**, Laboratory tests for backward erosion piping, *Geotechnical Safety and Risk*, IOS Press, 849-854.
- [8] **ROBBINS, B. A. & GRIFFITHS D. V., 2021**, A two-dimensional, adaptive finite element approach for simulation of backward erosion piping, *Computers and Geotechnics*, 129, 103820.
- [9] **WEWER M. J., AGUILAR-LOPEZ P., KOK M., BOGAARD T., 2021**, A transient backward erosion piping model based on laminar flow transport equations, *Computers and Geotechnics*, 132, 103992.
- [10] **TOURMENT R., BENAHMED N., NICAISE S., MÉRIAUX P., SALMI A., ROUGÉ M., 2018**, Lessons learned on the damaged on the levees of the Agly River, analysis of the sand-boils phenomena, *Processing of the 26th ICOLD Congress*, Q.103 R.21, Vienna, 2018.

UTILISATION DES FIBRES OPTIQUES TELECOM POUR LA CARACTERISATION GEOTECHNIQUE A HAUT RENDEMENT DU SOUS-SOL URBAIN A PARTIR DES ONDES DE SURFACE

LEROY M.¹, GAUDOT I.¹, BITRI A.¹, BRETAUDEAU F.¹

¹ BRGM DRP/IGT, Orleans, France, m.leroy@brgm.fr, i.gaudot@brgm.fr

RESUME

Les mesures sismiques en ondes de surface sur des fibres optiques telecom existantes est une approche nouvelle et prometteuse pour la caractérisation du sous-sol urbain à haut rendement, mais son application aux échelles de la géotechnique reste à évaluer. Nos résultats en environnement contrôlé montrent que cette approche possède des performances similaires à d'autres techniques conventionnelles basées sur des géophones, à la fois pour la caractérisation et le suivi temporel.

Mots clés : géotechnique, géophysique urbaine, fibre optique telecom, DAS, MASW

ABSTRACT

Surface waves seismic measurement on existing telecom fiber optic is a promising approach for efficient subsurface characterization in cities. However, its application to engineering scales is an active topic of research. Our results in a controlled experiment show similar performance between telecom fiber optic data and conventional approach based on geophones, for both imaging and monitoring.

Key words: near surface urban geophysics, telecom optical fiber, DAS, MASW

INTRODUCTION

La connaissance des propriétés géotechniques du sous-sol (0-50 m) est cruciale pour prévenir les risques d'effondrement (fontis) en milieu urbain le long des infrastructures de transport (routes, voie ferrées, digues, etc...). Les méthodes d'investigations sismiques en ondes de surface (MASW, **Park et al., 1999**) sont bien adaptées pour retrouver les propriétés géotechniques du proche sous-sol le long d'un linéaire. Les méthodes actives utilisent des sources sismiques contrôlées tandis que les méthodes passives utilisent les vibrations ambiantes permanentes (voiture, train, ...), ouvrant la voie au suivi temporel. L'efficacité des méthodes MASW dépend de la capacité à obtenir des mesures sur de nombreux capteurs sismiques couplés au sol à intervalle régulier (i) sur de longs linéaires, (ii) de longues périodes de temps, et (iii) à bas coût. Les méthodes conventionnelles reposent sur le déploiement de plusieurs dizaines de capteurs sismiques (géophones) plantés dans le sol à intervalle régulier (entre 0.5 et 5 m) le long d'une ligne, et reliés par un câble. En environnement urbain, ces méthodes sont peu adaptées (obstacles, couplage au sol difficile lié aux revêtement, maintenance sur le long terme, etc.). La *sismique tractée* et la *sismique nodale* sont deux méthodes alternatives qui ont été proposées pour pallier ces limitations. Inspirée des systèmes d'acquisition en mer, la sismique tractée repose sur un dispositif mobile tractant une ligne de géophones simplement posés au sol. La sismique nodale repose sur le déploiement de géophones reliés à des unités d'acquisition autonome (nodes). Tandis que la sismique tractée permet de couvrir de grand linéaire (jusqu'à 3 km/jour en conditions favorables) avec peu de géophones, elle n'est pas adaptée ni au suivi temporel, ni aux terrain avec obstacle. A l'inverse, la sismique nodale nécessite un grand nombre de capteurs pour couvrir de grand linéaire, mais elle est adaptée à tout type de terrain ainsi qu'au suivi temporel. Plus récemment, il a été montré qu'il était possible d'utiliser les fibres optiques telecom (FO TELECOM) déjà installées de manière pérenne dans les réseaux urbains pour mesurer le champ d'onde sismique sur de longs linéaires (jusqu'à 50 km) avec une très haute résolution spatiale (typiquement ~ 5-10 m) et temporelle (jusqu'à 2 kHz), en ne branchant qu'un seul appareil de mesure (interrogateur DAS, Distributed Acoustic Sensing) à une seule extrémité de la fibre (**Hartog, 2017**). Cette approche est donc adaptée pour des mesures sur des périodes de temps longues. A la différence des géophones qui

mesurent des vitesses particulières en un point de l'espace, la technologie DAS mesure les déformations distribuées le long de la FO entre des paires de points séparés par une distance, appelée la longueur de jauge (GL), définissant la résolution spatiale. Le rapport signal sur bruit mesuré augmente avec la GL. Il a déjà été montré que cette approche peut être utilisée pour mesurer des phénomènes grandes échelles (> 1 km, applications sismologiques), aux échelles intermédiaires (100 m, application réservoir), mais leur utilisation aux échelles de la géotechnique (1-50 m) reste beaucoup moins explorée même si les premiers résultats sont très prometteurs (Martin et al. 2017, Leroy et al., 2023). Notamment, plusieurs interrogations subsistent : la technologie DAS sur FO TELECOM peut-elle atteindre la résolution spatiale requise pour les applications géotechniques ? Quelle est l'influence du couplage de la FO dans le câble et du couplage du câble avec le sol ? Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions, ce travail présente les résultats obtenus sur une plateforme expérimentale couplant des mesures sismiques en ondes de surface sur des FO TELECOM avec plusieurs couplages, des nodes sismiques et des capteurs tractés. Cette étude comparative se base sur des mesures sismiques actives (marteau) et passives (trafic routier).

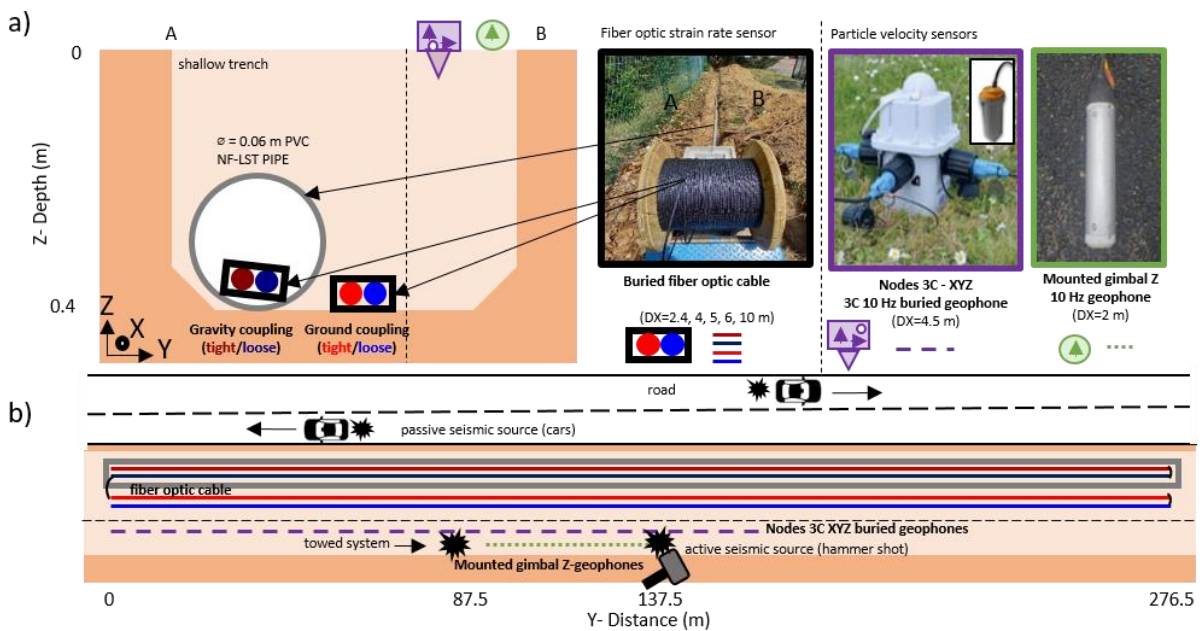


Fig. 1 –Représentation schématique de la plateforme fibre optique telecom expérimentale. a) Vue en coupe et présentation des différents types de capteur sismique. b) Vue de haut.

ACQUISITION

Un câble à FO TELECOM a été déployé dans une tranchée de 276.5 m de longueur en bord de route (Fig. 1). Le câble est déployé en A/R tel que la portion aller est enterrée en terre (couplage terre) et la portion retour est posée dans un tube PVC (couplage gravitaire). Deux FO sont présentes dans le câbles et connectées entre elles : une FO non couplée au câble ('loose') et une FO couplée au câble ('tight'). Pour comparaison avec les signaux mesurés par la FO, 38 géophones trois-composantes 10 Hz reliés à des nodes autonomes ont été plantés tous les 4.5 m le long de la tranchée. Egalement, 12 géophones verticaux 10 Hz tractés montés sur cardan ('gimbal') espacés tous les 4 m ont été déplacés par intervalle de 4 m le long de la ligne pour réaliser une acquisition de sismique tractée. Des coups de marteau (8 Kg) ont été réalisés tous les 3.5 m le long de la ligne et les vibrations ambiantes pendant 10 jours ont été enregistrées par la FO et les nodes sismiques.

TRAITEMENT

Les heures d'impact des coups de marteau ont permis le découpage de fenêtres de données sismiques de 0.5 s de durée sur la FO, les nodes sismiques, et le dispositif tracté. Pour la FO, les taux de déformation le long de la FO ont été extraits pour 4 GL (2.4, 4, 6 et 10 m) avec un échantillonnage

spatial (DX) de 4.5 m (après décimation). Les géophones horizontaux ont été convertis en taux de déformation (GL = 4.5 m) avec DX= 4.5 m pour comparaison avec la FO. Les données des géophones tractés ont été conservée en vitesse particulière verticale avec DX= 4 m. Pour les données passives, des fenêtres de 2 s contiguës en temps pendant 10 jours ont été extraites sur la FO et les nodes. Pour la FO, le taux de déformation à une GL unique de 5 m a été enregistré, avec DX=4.3 m (après décimation). Un algorithme d'interférométrie sismique passive a été développé pour reconstruire des tirs virtuels pour chaque 5 min de données. Une analyse F-K a en ensuite permis de calculer les diagrammes de dispersion pour chaque tir (actif et virtuel) en considérant les traces situées entre 10 et 50 m de la source et des fréquences entre 1 et 100 Hz.

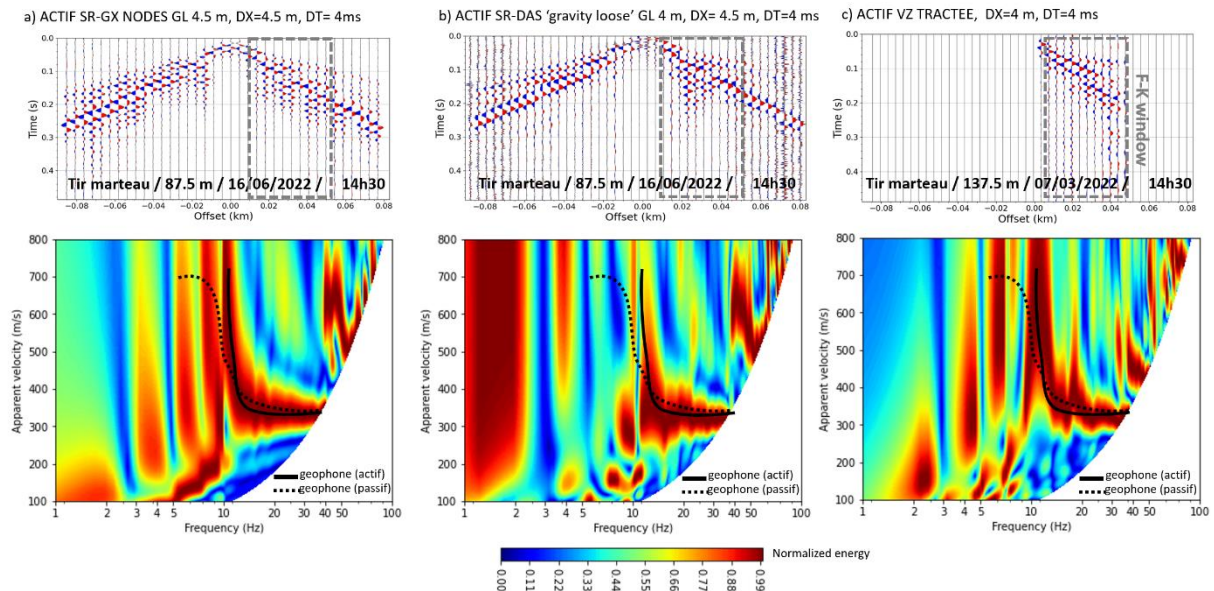


Fig. 2 –Formes d’ondes mesurées suite à un tir marteau sur la plateforme (haut) et diagramme de dispersion associé via analyse F-K (bas). Résultats obtenu sur (a) les géophones horizontaux sur nodes convertis en taux de déformation avec GL=4.5 m, (b) FO telecom couplage gravitaire et ‘loose’ (GL= 4 m) et (c) les géophones verticaux tractés (gimbal). Sur les formes d’onde, l’encadré en ligne pointillée indique la fenêtre spatiale utilisée pour l’analyse F-K. La courbe de dispersion pointée avec les géophones horizontaux sur nodes suite au tir marteau (actif) est indiquée par une ligne noire continue tandis que celle obtenue avec les géophones horizontaux sur nodes en utilisant 5 min de données continues avec analyse interférométrique (passif, voir **Fig. 3**) est indiquée par la ligne noire pointillée.

RESULTATS

Une portion de 50 m entre les distances 87.5 et 137.m (voir Fig. 1) a été utilisée pour réaliser une étude comparative sur les diagrammes de dispersion actifs/passifs obtenus entre la FO avec le couplage le plus dégradé (gravitaire ‘loose’) et une GL=4 m, ainsi que les nodes et les capteurs tractés (actif seulement). Les pas d’échantillonnage temporel et spatiaux sont très proches pour tous les capteurs pour permettre la comparaison. Les formes d’ondes obtenues sur les données actives (Fig. 2, haut) sont similaires pour tous les types de capteurs, avec la présence d’onde de volumes et d’ondes de surface. On observe que les résultats sur la FO sont plus bruités que pour les géophones sur nodes, notamment lorsqu’on s’éloigne de la source (> 50 m) ou un bruit plutôt haute fréquence masque les ondes de volume pourtant encore clairement visible sur les données issues des géophones sur nodes. Les diagrammes de dispersions (Fig. 2, bas) sont interprétables entre 15 et 40 Hz pour les trois types de capteurs, même si les résultats issus des géophones sont les moins bruités. Les données FO semblent également avoir moins de signal < 15 Hz par rapport aux géophones. Les formes d’ondes obtenues sur les données passives (Fig. 3, haut) sont proches pour les géophones et la FO. Les données sont plus basses fréquences que pour les données actives (Fig.2, haut) et dominées par les ondes de surface. Les diagrammes de dispersion (Fig. 2, bas) sont interprétables entre 5 et 40 Hz pour les deux

types de capteurs, même si les résultats issus des géophones sont moins bruités que la FO, notamment en dessous de 7 Hz et au-delà de 35 Hz. Les vitesses sont proches de celles mesurées avec les données actives entre 15 et 35 Hz. Des différences sont observées < 15 Hz là où les données actives avaient peu d'énergie contrairement aux données passives. Pour les géophones, l'interprétation < 10 Hz reste cependant sujette à caution puisque ces capteurs ont une fréquence de résonance de 10 Hz. Des statistiques réalisées sur les données passives (Fig. 3, c) montrent qu'entre 15 et 30 Hz, (i) un écart de 5% maximum est observé entre les vitesses moyennes pointées sur les deux types de capteurs, et (ii) que la FO est entre 2 à 10 fois plus bruitée que les géophones quel que soit le couplage de la FO, mais que les valeurs d'incertitude sur les vitesses mesurées par la FO restent très faibles (< 0.24 m/s).

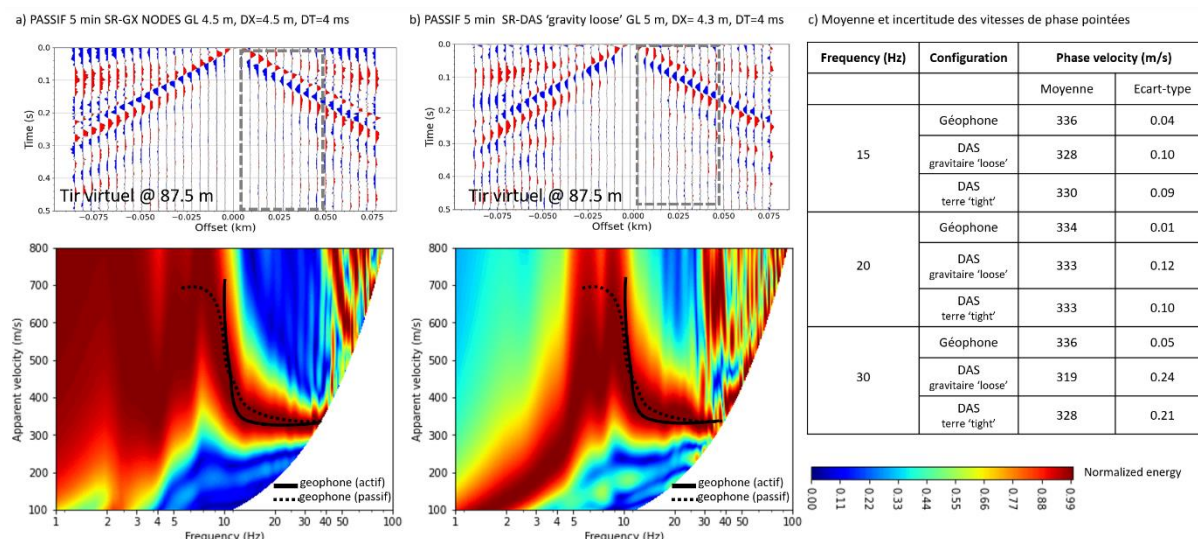


Fig. 3 – Formes d'onde d'un tir virtuel calculé par l'analyse interférométrique de 5 min de données continues (passif) sur la plateforme (haut), et diagramme de dispersion associé via analyse F-K (bas). Résultat obtenu sur (a) les géophones horizontaux sur nodes convertis en taux de déformation avec GL=4.5 m, (b) FO telecom couplage gravitaire et 'loose' (GL= 5 m). c) Moyenne et incertitude des vitesses de phase pointées sur différentes configurations en considérant ~3 jours d'enregistrement passif.

CONCLUSIONS

En comparaison avec des mesures sur des géophones nodaux plantés au sol et tractés, cette étude montre que les mesures sismiques actives et passives sur une FO TELECOM enterrée le long d'une route sont de suffisamment bonne qualité pour réaliser une analyse MASW entre 12 et 35 Hz, quel que soit le couplage de la FO au câble ('loose' ou ('tight') et du câble au sol ('terre' ou 'gravitaire'). L'utilisation des FO TELECOM déjà déployées en ville pour la caractérisation et le suivi temporel du sous-sol aux échelles de la géotechnique semble donc être une option très intéressante. D'autres résultats (non montrés) suggèrent que l'influence du couplage le long de la FO est majeure pour les mesures au-delà de 35 Hz, avec une nette amélioration des résultats pour la FO enterrée en terre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- PARK C. ET AL., 1999**, Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 10.1190/1.1444590
- HARTOG A., 2017**, An introduction to distributed optical sensors, *CRC Press*, 472 pages, 1st edition
- MARTIN E. ET AL, 2017**, Seismic monitoring leveraging existing telecom infrastructure at the SDASA: Active, passive, and ambient-noise analysis, The Leadind Edge, <https://doi.org/10.1190/tle36121025.1>
- LEROY M. ET AL., 2023**, Comparison of DAS surface waves records at geotechnical scales using telecom fiber optic with different cable and ground coupling, *Abstract EGU, Vienna*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1884>

ÉVALUATION GEOPHYSIQUE DE LA GEOMETRIE ET DE LA VULNERABILITE D'UN SYSTEME DUNAIRE ANTHROPISE : CAS DE SOLIMAN (BASSIN MEDITERRANEE)

Sana AYARI^{1&2}, Hakim GABTNI¹

1 : Laboratoire Géoressource, LR15CERTE01, Centre de Recherches et des Technologies des Eaux de Borj Cédria, CERTE, 8020, Soliman, Tunisie,

ayari.sana1994@gmail.com

2 : Faculté des Sciences de Tunis, Université Tunis El Manar, Tunisie

RESUME

La côte de Soliman, en Tunisie, fait face à une anthropisation intense qui entraîne une érosion et un déséquilibre de son cordon dunaire. Une étude géophysique utilisant la méthode électromagnétique dans le domaine temporel et la méthode de tomographie de résistivité électrique a été réalisée pour délimiter l'épaisseur des dunes non consolidées du Quaternaire et pour évaluer le degré de vulnérabilité de l'interface dune côtière/substrat. Les premiers résultats révèlent une variabilité dans l'épaisseur des dunes et des voies particulières de salinisation.

Mots clés : Géophysique, Cordon dunaire, Tunisie, Interface, Salinisation

GEOPHYSICAL ASSESSMENT OF THE GEOMETRY AND VULNERABILITY OF A AN ANTHROPIZED DUNE SYSTEM: CASE OF SOLIMAN (MEDITERRANEAN BASIN)

ABSTRACT

The Soliman coast (Tunisia), is characterized by an intense anthropization associated to an active erosion and dune cord instabilities. A geophysical study using time-domain electromagnetic and geoelectrical methods was carried out to delineate the thickness of unconsolidated Quaternary dunes and to assess the degree of vulnerability of the coastal dune/substrate interface. The first results reveal a variability in the thickness of the dune and specific salinization pathways.

Key words: Geophysics, Dune cord, Tunisia, Interface, Salinization

INTRODUCTION

La forte anthropisation et l'intense exploitation des nappes côtières ont toujours été considérées comme les deux principales causes de la dégradation des zones dunaires. La zone côtière de Soliman (Golfe de Tunis) (Fig.1) est sujette à un intense déséquilibre suite à l'extension de l'urbanisation entre 1986 et 2023 (Fig. 1 b. c et d). Cette zone présente des signes d'un recul du rivage relevés depuis les années 80 jusqu'à présent (Nouri et Paskoff, 1980., Bouhafa, 1985., Paskoff, 1985., Marzougui et Oueslati, 2017) faisant suite à un notable changement de la dynamique sédimentaire. Le déficit sédimentaire engendré par l'anthropisation a favorisé l'érosion des dunes et le recul du trait de rivage.

Bien que l'érosion côtière ait été appréhendée par différentes approches classiques au niveau de plusieurs études dans le bassin méditerranéen et particulièrement en Tunisie (Amrouni et al, 2019, 2022, Hzami et al, 2021), en Espagne (Pio Costa et al., 2023), en France (Crapoulet et al. 2016) etc., cette étude aborde l'apport de la géophysique, afin d'évaluer le degré de vulnérabilité de la tranche dunaire et du substratum à l'érosion et à la salinisation.

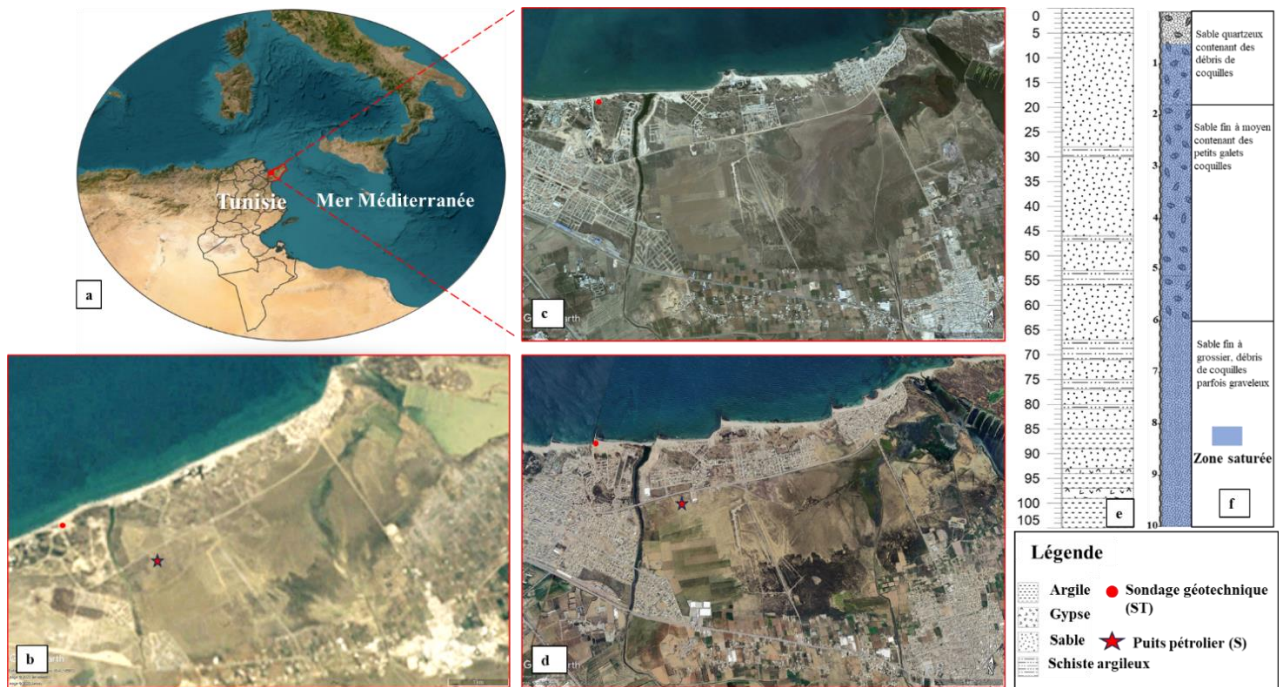


Fig. 1 – a) Localisation géographique de la zone d'étude b) Carte de la zone d'étude en 1986 c) carte de la zone d'étude en 2004 d) carte de la zone d'étude en 2023 e) log du forage profond S f) log du sondage géotechnique (ST)



Fig. 2 – a) Photo d'acquisition TDEM avec équipements ABEM WALKTEM sur la côte de Soliman b) Carte de localisation de la zone d'étude et position des profils ERT et du sondage Géotechnique (ST)

MATERIELS ET METHODES

Une prospection préliminaire en utilisant la méthode électromagnétique dans le domaine temporel TDEM (Fig. 2. a) avec une boucle émettrice 20 m*20 m et une boucle réceptrice 0.5 m*0.5 m a été établie afin de distinguer le substratum dunaire et quantifier l'épaisseur des dunes. Les données obtenues ont été traitées et inversées au moyen des logiciels ZondTem1D et ZondTem2D. Ensuite, une focalisation sur une zone témoin a été effectuée avec à la clé une acquisition d'un ensemble de profils de tomographie de résistivité électrique ERT (Fig. 2 b) en utilisant un équipement de type ABEM SAS4000. Plusieurs tests d'acquisition ont été effectués à l'aide de différents protocoles, et le choix s'est porté sur le protocole Wenner-Schlumberger (WS). Les données obtenues ont été filtrées et inversées moyennant le logiciel ZondRES2D. Les résultats obtenus ont été calibrés par les données d'un sondage géotechnique carotté à terre de 10 m de profondeur dans les dunes récentes et d'un forage profond au voisinage de la zone côtière dunaire.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les sondages TDEM ont été réalisés le long de la côte de Soliman parallèlement au trait de rivage. Un traitement 1 D a été établi, puis les données ont été exportées sous forme de pseudo-section pour appliquer une inversion en 2D. Les résultats obtenus montrent la saturation en eau de mer le long de la côte. Après discussion nous avons choisi 2 zones témoins intéressantes à étudier.

Au niveau de la zone qui présente un fort recul du trait de côte en surface, quatre longs profils ERT (Fig.2.b) ont été acquis (310 m de long, 65 m en termes de profondeur de pénétration, 10 m d'espacement inter-électrode). Le protocole choisi (WS) assure un échantillonnage adéquat avec une bonne répartition des mesures. Les résistances de contact ont été automatiquement vérifiées par séquence de mesure (résistance en moyenne inférieure à 500 Ohm). L'erreur RMS ne dépasse pas les 10 % au niveau des modèles obtenus à la suite de l'inversion. Utilisant ce jeu de profils ERT 2D, un modèle 3D de résistivité a été élaboré (Fig. 3). Le profil P1 parallèle à la côte (Fig.3), a été calibré par le sondage géotechnique ST. Les Profils P2, P3 et P4 sont perpendiculaires à la ligne de rivage. Les principaux résultats tirés de l'interprétation de ces profils sont :

-Le Modèle inversé P1 présente des résistivités élevées en surface qui varie entre 10 et 24 Ohm.m correspondant aux sables coquilliers de la plage actuelle. Cette constatation est vérifiée par les données du log du sondage géotechnique (Fig.1 f). La présence des faibles résistivités de moins 2 Ohm.m en profondeur a été attribuée aux sables fins à grossiers à débris de coquilles saturés en eau salée.

-Les Modèles inversés P2, P3 et P4 présentent des résistivités élevées entre 30 et 160 Ohm.m correspondant aux dunes actuelles en surface alors qu'en profondeur, elles sont attribuées au substratum sableux comme annoncé au niveau du log du forage profond limitrophe. On note aussi la présence de résistivités relativement prononcées entre 3 et 10 Ohm.m et qui sont attribuées au milieu poreux non saturé en eau. Pour les résistivités faibles inférieurs à 3 Ohm.m, elles correspondaient à un milieu poreux fortement saturé en eau salée.

CONCLUSIONS

Ce travail intégrant TDEM, ERT et sondage géotechnique, a permis d'imager en subsurface le système dunaire d'une côte anthropisée en Tunisie (bassin méditerranéen). La prospection ERT a pu déterminer la géométrie des dunes ainsi que leur épaisseur. On a pu distinguer la lithologie du substratum dunaire. On a détecté également la zone non saturée et la zone saturée en eau saumâtre et les voies de l'invasion de l'eau de mer. Cette étude est d'une importance capitale pour la gestion durable de cette région côtière dont elle a pour objectif d'évaluer le degré de vulnérabilité pour faciliter au gestionnaire la mise en place des aménagements adéquate.

REMERCIEMENTS

Ce travail rentre dans le cadre du projet « Water Task Force WTF, Milieux Poreux, Transferts des Fluides et Changements Globaux pour une Meilleure Gestion des Ressources, CERTÉ/MERES, Tunisie, 2019- 2022). Les auteurs remercient l'Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral « APAL » pour les données fournies.

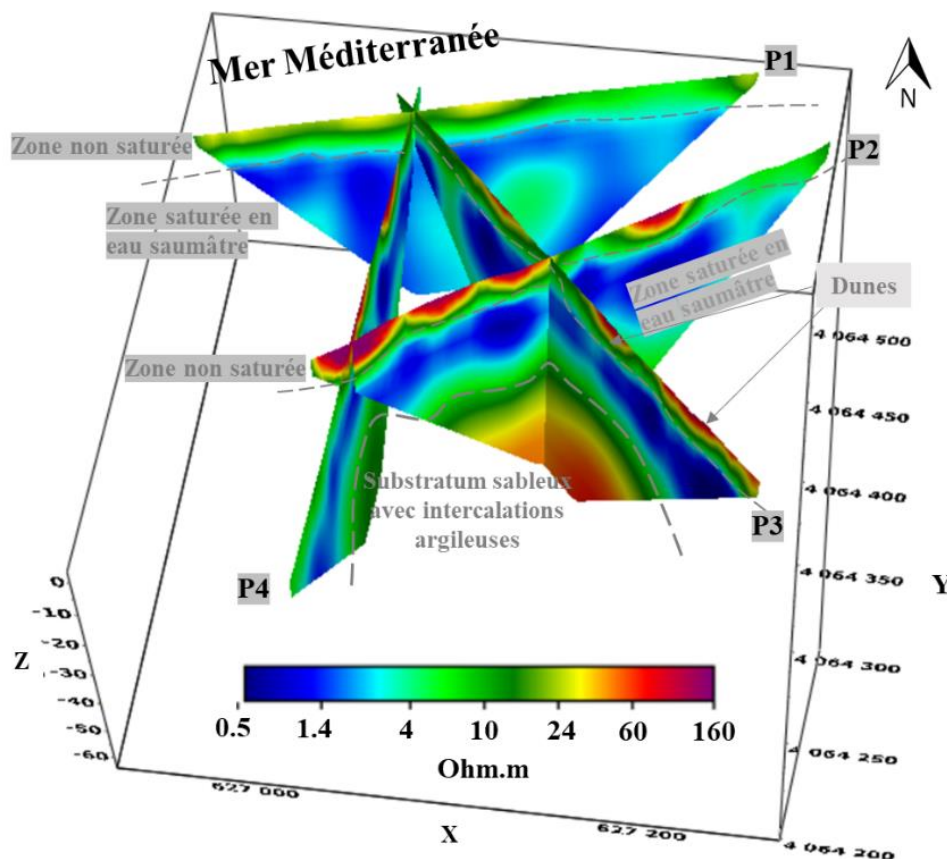


Fig. 3 - Vue en 3D des profils ERT (P1, P2, P3 et P4) inversés (Position, Fig. 2.b)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMROUNI O., HZAMI A., HEGGY E., 2019 – photogrammetric assessment of shoreline retreat in north Africa: anthropogenic and natural drivers. *isprs journal of photogrammetry and remote sensing*, 157(), 73–92. DOI: [10.1016/J.ISPRSJPRS.2019.09.001](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.001)

AMROUNI O, HEGGY E, HZAMI A 2022 –Deconvolving the effects of coastal erosion and sea-level rise in assessing shoreline retreat along semi-arid urban coasts. [\[HTTPS://DOI.ORG/10.21203/RS.3.RS-1192251/V1\]](https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-1192251/V1)

BOUHAFI T., 1985 – Érosion et protection des plages du golfe de Tunis. *Mémoire de CAR, Université de Tunis*, 100 p.

HZAMI A., HEGGY E., AMROUNI O. 2021– Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa. *Sci Rep* 11, 2320. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77926-x>

MARZOUGUI W ET OUESLATI A., 2017 – les plages de la côte d'ejjemhi-soliman (golfe de Tunis, Tunisie) : exemple d'accélération de l'érosion marine dans une cellule sédimentaire artificiellement tronçonnée », *PHYSIO-GEO* [EN LIGNE], VOLUME 11. DOI : [HTTPS://DOI.ORG/10.4000/PHYSIO-GEO.5152](https://doi.org/10.4000/PHYSIO-GEO.5152)

NOURI Y. ET PASKOFF R. (1980) – remarques sur le comportement actuel des plages dans le fond du golfe de Tunis. *Revue Tunisienne De Géographie*, VOL. 6, P. 145-150.

PASKOFF R. 1985 – Les plages de la Tunisie. ÉDIT. EDITEC, CAEN, 198 P.

COSTA G P., MUSUMECI R., CÁCERES, I., 2023 –Coastal dunes: a nature-based solution to face coastal hazards. 615-626. DOI: [10.1142/9789811275135_0058](https://doi.org/10.1142/9789811275135_0058).

CRAPOULET A., HÉQUETTE A., LEVOY F., BRETEL P., 2016 –Using lidar topographic data for identifying coastal areas of northern France vulnerable to sea-level rise. *journal of coastal research*, 75(sp1), 1067–1071. DOI:[10.2112/si75-214.1](https://doi.org/10.2112/si75-214.1)

EVOLUTION DE LA SATURATION EN EAU D'UNE PAROI CALCAIRE SOUMISE A UN FEU

VERDET C.¹, SALMON F.¹, SIRIEIX C.¹, MATEO S.¹, LACANETTE D.¹

¹ Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France. cecile.verdet@u-bordeaux.fr

RESUME

Des mesures haute résolution de tomographie de résistivité électrique sont réalisées à une échelle centimétrique sur une paroi calcaire pendant un feu afin de suivre les mouvements d'eau à la paroi. La résistivité est corrigée de manière dynamique de l'effet de températures élevées variant rapidement. Les mouvements d'eau dans la paroi suivent trois phases : de l'allumage du feu à 36 min, la surface de la paroi s'assèche et de l'eau s'accumule au-delà de 10 cm ; de 36 min à 46 min (arrêt de l'alimentation), l'ensemble s'assèche et de l'eau arrive de plus grande profondeur (>20 cm) ; enfin après l'arrêt du feu, on observe une phase de réajustement jusqu'au retour à l'état initial.

Mots clés : feu, tomographie de résistivité électrique (TRE), paroi calcaire, endommagement, variation temporelle rapide, flux de chaleur

ABSTRACT

High-resolution electrical resistivity tomography are done at a centimetric scale on a limestone wall during fire to monitor water saturation within the rock mass. The resistivity is dynamically corrected from high temperature effect with rapid variation. Water movements follow three phases: for fire start to 36 min, the surface of the wall dries out while a moisture clog appears above 10 cm; from 36 min to 46 min (fire supply stops), the rock dries out and water migrates from deeper parts (>20 cm); finally, after the fire supply stops, a readjustment phase is observed until it returns to its initial state.

Key words: fire, electrical resistivity tomography (ERT), limestone wall, damage, rapid time variation, heat flow

INTRODUCTION

Une paroi calcaire soumise à un feu ou un incendie subira des endommagements de plusieurs natures : écaillage, changement de couleur, changement de porosité, fracturation. On se propose ici d'étudier l'impact des changements de saturation en eau à la surface d'une paroi calcaire d'une carrière souterraine par tomographie de résistivité électrique (TRE).

La température pendant le feu augmente très rapidement jusqu'à des valeurs élevées dans la paroi (86,6 °C). Il est alors nécessaire de corriger la résistivité de l'effet de la température en prenant en compte (i) les valeurs élevées, et (ii) les variations de température durant la mesure de TRE. Nous proposons ici une correction dynamique de la température, permettant le suivi de la saturation en eau pendant les feux.

Matériel et méthode

Localisation et instrumentation

La carrière calcaire dans laquelle l'expérimentation a eu lieu se situe dans le sud-ouest de la France, près de Bordeaux (**Fig. 1.a**). Le massif est constitué de calcaires du Rupélien qui présentent une variation lithologique verticale et horizontale importante. Il s'agit d'un calcaire bioclastique facilement friable, avec une cimentation lâche et une porosité mesurée jusqu'à 41%.

Le profil de TRE est composé de 24 électrodes espacées de 4 cm, pour un total de 92 cm. Les électrodes sont de 0,4 cm de diamètre et enfoncées de 1,5 cm. Les mesures ont été réalisées avec un résistivimètre Syscal Pro (Iris Instruments), en dispositif dipôle-dipôle. Les câbles de mesures ont été protégés des fortes températures par un matériau isolant (Isofrax® **Fig. 1.b**). Le profil se situe à 1,2 m du centre du foyer (80 cm de diamètre).

Les températures ont été mesurées au moyen de 8 thermocouples répartis le long du profil de TRE, à des profondeurs allant de 0,5 cm à 4,5 cm (cf. Fig. 1.c) (Salmon et al., 2020; Verdet et al., 2018).

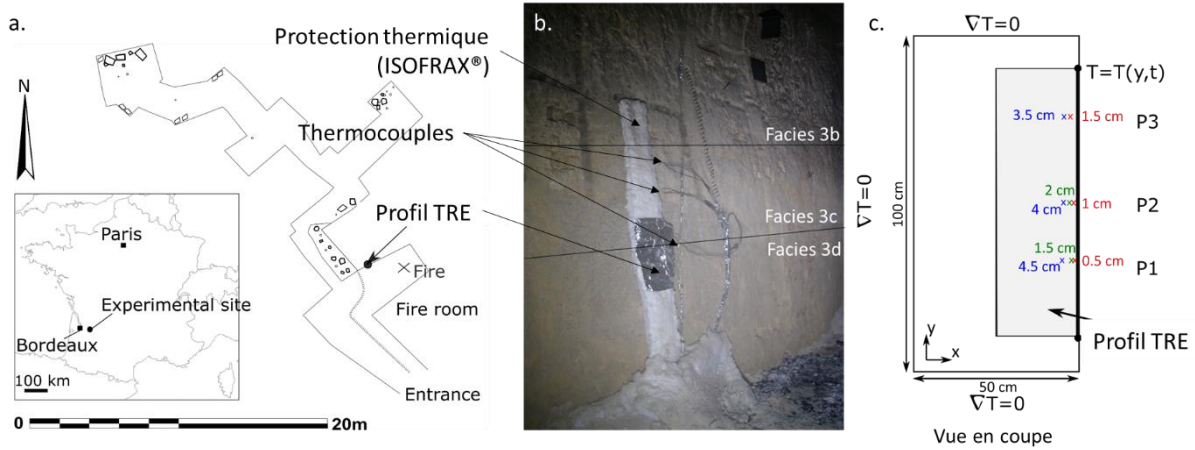


Fig. 1 – (a) localisation du site et plan de la carrière. (b) installation du profil sous protection thermique et des thermocouples, faciès géologique recoupé par le profil de TRE, (c) schéma représentant la profondeur des thermocouples et les conditions aux limites pour le modèle de température ; l’emprise du profil de TRE est indiquée en grisé.

Les inversions ont été réalisées selon la méthode développée par Verdet et al. (2018) dans le cas où le rapport entre enfoncement et espacement des électrodes est supérieur à 20% (induisant un effet d’électrode) : l’électrode est modélisée pour l’inversion par une électrode équivalente ponctuelle à 73% de l’enfoncement de l’électrode. Les inversions ont été réalisées avec le code BERT 2.1 (Günther et al., 2006), selon la norme L1, avec la méthode de Gauss-Newton et un paramètre de régularisation de 20.

Correction dynamique de l’effet des températures élevées

Une correction des mesures de TRE de l’effet de la température doit être réalisée : lors des feux, la dynamique du feu est telle qu’elle impose des variations rapides de température jusqu’à des températures élevées (passant de 11°C à 86,6°C à 1 cm de profondeur au cours des 46 min de feu). La température est modélisée par résolution de l’équation de la chaleur (équation 1) sur un maillage exponentiel :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{Equation 1}$$

avec T la température et D la diffusivité thermique. Ce modèle est réalisé sur un domaine 2D rectangulaire (Fig. 1.c) avec une condition aux limites de Dirichlet pour la surface exposée à la chaleur et une condition aux limites de Neumann nulle ($\nabla T = 0$) appliquée aux trois autres limites. L’erreur moyenne entre les températures modélisées et les températures mesurées est inférieure à 5% pour tous les thermocouples.

Le champ de température ainsi calculé au cours du temps est ensuite utilisé pour corriger la résistivité de l’effet de la température. Usuellement, les équations de correction sont valides pour un intervalle compris entre 3 et 47°C. Karato and Wang (2013) ont montré que la conductivité électrique croît de manière exponentielle avec la température. Nous choisissons donc d’utiliser le modèle exponentiel de Corwin and Lesch (2005) pour corriger la résistivité de l’effet de la température (équation 2), avec une température de référence de 25°C :

$$\rho_{T_{ref}} = \frac{1}{f_T} * \rho_T \quad \text{Equation 2}$$

avec $\rho_{T_{ref}}$ la résistivité à la température de référence, ρ_T la résistivité mesurée à la température T et $f_T = 0,4470 + 1,4034 * e^{\frac{-T}{26,815}}$ le facteur de correction, ici celui de Corwin and Lesch (2005) avec T la température au moment de la mesure.

La durée d'acquisition pour chaque profil de TRE est d'environ 5 min pour 349 points de mesures. Il est nécessaire de corriger chaque point de mesure de l'effet de la température en prenant en compte la température au point et au temps de la mesure. La méthode de correction comprend 3 étapes (Verdet et al., 2021, p. 202) :

- 1- L'heure de la mesure et la position de chacun des quadripôles sont enregistrées. Le nombre de points de mesure étant inférieur au nombre de mailles de l'inversion, nous appliquons pour chaque cellule le temps du point de mesure le plus proche du barycentre de la cellule. Une matrice des temps est créée, reliant chaque cellule de l'inversion à un temps.
- 2- La matrice des températures est créée à partir des températures modélisées précédemment et la matrice des temps. La matrice finale donne la température au temps et à la position de chaque cellule de l'inversion (Fig. 2.c).
- 3- La résistivité après inversion (Fig. 2.a) est corrigée (Fig. 2.b) de l'effet de la température avec l'équation 2, en tenant compte de la température au temps de mesure donné pour chaque point par la matrice des températures.

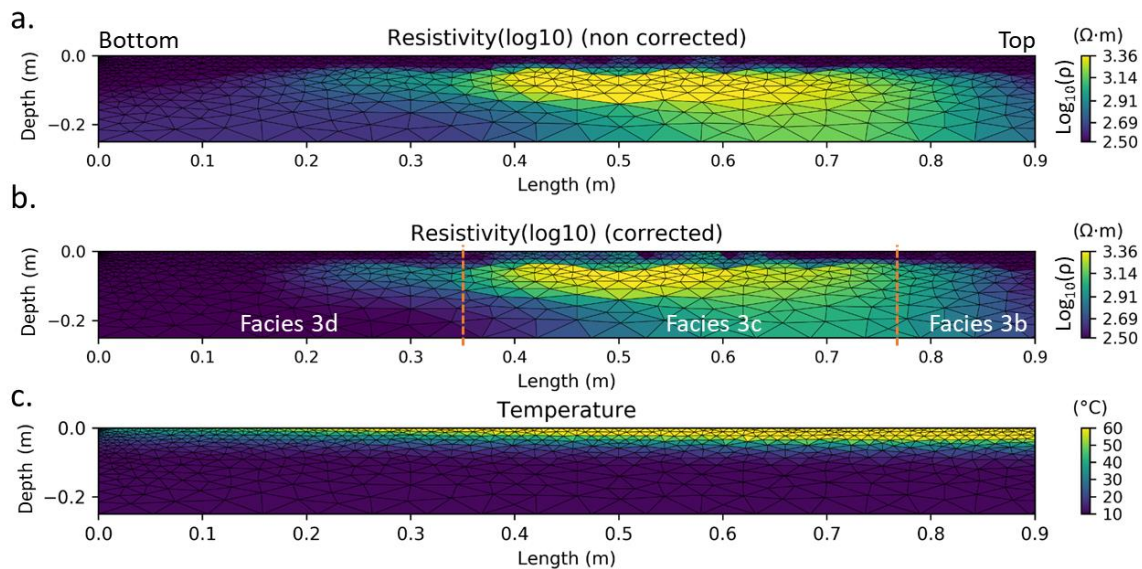


Fig. 2 : Résistivité inversée pour l'acquisition à 46 min après allumage du feu. (a) avant correction (RRMS 7.3%) ; (b) après correction ($T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$), les trois faciès géologiques sont indiqués ; (c) température modélisée, tenant compte de l'évolution pendant les 5 min de mesure.

Résultats

Les mesures réalisées pendant les feux comprennent 27 images de TRE. La résistivité médiane est calculée pour 9 intervalles de 2 cm d'épaisseur (faciès 3c, cf Fig. 2.b). Le suivi a commencé 25h (-1534,7 min) avant l'allumage du feu et a duré jusqu'à 21h (1290,3 min) après l'allumage.

Les variations de résistivité au cours du temps sont visibles sur la fig. 3. Quelle que soit la profondeur, la résistivité médiane entre avant et après les feux est en partie revenue à son état initial, sauf à 3 cm. A 36,7 min, la résistivité a augmenté proche de la surface et diminuée en profondeur. A 46,8 min et 52,5 min (arrêt de l'alimentation du feu), la résistivité proche de la surface est la même qu'à 36,7 min, tandis qu'elle augmente en profondeur.

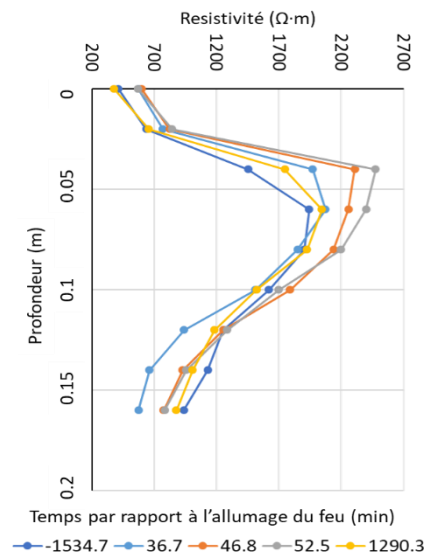


Fig. 4 : Variation de la résistivité en fonction de la profondeur à 5 temps choisis.

Les changements de porosité observés au cours des feux ne peuvent pas expliquer les changements de résistivité à eux seuls (Verdet et al., 2021). Ces variations de résistivité sont donc liées au changement de degrés de saturation au cours des feux. Entre 0 et 16 min, la surface s'assèche jusqu'à 3 cm, le degré de saturation reste le même entre 3 et 11 cm alors qu'il diminue au-delà. Cela peut s'expliquer par la venue d'eau depuis de plus grandes profondeurs. Entre 16 et 46 min, l'onde thermique atteint de plus grandes profondeurs ; combinée à une forte porosité et connectivité, la pression de vapeur d'eau peut être libérée après 36 min et l'eau va donc migrer de la profondeur vers la surface, où elle sera évaporée. Après l'arrêt de l'alimentation du feu, la température décroît doucement et l'eau migre de l'air vers la roche et de la profondeur du massif vers la surface, augmentant la saturation proche de la surface. Après 114 min, une phase de rééquilibrage est observée jusqu'au retour à l'état initial.

CONCLUSIONS

La méthode présentée est actuellement la seule qui permette de visualiser les variations de saturation en eau dans une paroi chauffée. Ces variations sont très importantes et rapides et peuvent expliquer certains phénomènes à l'origine de l'endommagement de la paroi : la formation d'une barrière de pression (« moisture clog ») différentielle peut être à l'origine de micro-fracturations et donc du changement de porosité et de l'écaillage de la paroi. Par ailleurs, on observe des circulations d'eau provenant d'au-delà de la fenêtre d'observation de 20 cm de profondeur prévue initialement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Corwin, D.L., Lesch, S.M., 2005.** Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 11–43.
- Günther, T., Rücker, C., Spitzer, K., 2006.** Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. *Geophysical Journal International* 166, 506–
- Karato, S., Wang, D., 2013.** Electrical conductivity of minerals and rocks, in: *Physics and Chemistry of the Deep Earth*. pp. 145–182.
- Salmon, F., Lacanette, D., Mindeguia, J.-C., Sirieix, C., Bellivier, A., Leblanc, J.-C., Ferrier, C., 2020.** Development of a Fluid–Structure Coupling Validated with a Confined Fire: Application to Painted Caves. *Fire Technol* 56, 1197–1227.
- Verdet, C., Anguy, Y., Sirieix, C., Clément, R., Gaborieau, C., 2018.** On the effect of electrode finiteness in small-scale electrical resistivity imaging. *Geophysics* 83, 39–52.
- Verdet, C., Salmon, F., Sirieix, C., Lacanette, D., 2021.** Water saturation variation in a fire-heated limestone gallery monitored by ERT. *Geophysical Journal International* 227, 660–668.

ETUDE NUMERIQUE DES PERTURBATIONS EN PRESSION DUES AUX INJECTIONS EN PUIITS

VALLIER B.¹, TOUSSAINT R.^{1,3}, FAHS M.¹, BAUJARD C.², GENTER A.², FLEKKØY E. G.³, MÅLØY K. J.³

¹ ITES, Université de Strasbourg / CNRS, FRANCE

² ES Géothermie, FRANCE

³ SFF Porelab, Université d'Oslo, NORWAY

RESUME

Durant les exploitations de réservoir, il est nécessaire d'analyser l'évolution d'aléa sismique induit. L'étude de la diffusion des perturbations de pression dans un domaine poroélastique permettra de comprendre l'évolution de la contrainte effective et de quantifier la sismicité induite. Nous étudions numériquement la distribution de la pression dans un milieu poreux homogène à grande échelle. Nos solutions analytiques sont comparées à des solutions numériques pour valider notre modèle. L'étude d'une stratégie d'exploitation minimisant les perturbations de la pression est ensuite menée.

Mots clés : diffusion de la pression, activité sismique anthropogénique, injection/production de fluides, milieu poreux fracturé

ABSTRACT

During reservoir exploitations, there is the need for a careful analysis of the evolution of the induced seismic hazard. Studying the diffusion of pressure disturbances in a poro-elastic domain will allow to understand the evolution of the effective stress and to quantify the induced seismicity. In this work, pressure distribution in a large-scale homogenous porous medium is numerically investigated. Analytical solutions are developed and compared to numerical solutions for validating the model. The study of alternative pumping strategy minimizing the pressure disturbances is then conducted.

Key words: pressure diffusion, anthropogenic seismic activity, fluid injection/production, fractured porous medium

INTRODUCTION

Dans le contexte de l'exploitation de réservoir en profondeur (stockage de CO₂/H₂, géothermie profonde ou exploitation gaz/pétrolière), il est nécessaire d'améliorer au préalable la perméabilité du réservoir. Pour améliorer la perméabilité, l'une des méthodes consiste à réaliser des stimulations par injection de fluide qui augmentent la pression de pore. Toutefois, cette méthode peut entraîner une augmentation du risque sismique sur des failles éloignées. En effet, la surpression provoque une diminution de la contrainte normale effective, entraînant une rupture potentielle des failles distantes proches du seuil critique, connue sous le nom de sismicité induite. La sismicité induite potentiellement liée à l'exploitation des puits a été observée dans les zones de production de pétrole et de gaz, d'exploitation minière, de séquestration des fluides ou dans les réservoirs géothermiques profonds. L'objectif principal de ce travail est de prévenir la sismicité induite par des failles distantes proches du seuil critique en minimisant les perturbations de pression à distance du puits tout en maintenant une pression de pore importante à proximité du puits. Nous étudions numériquement la diffusion des perturbations de pression dues à l'injection en puits.

METHODOLOGIE

Un modèle numérique basé sur la méthode des différences finies est développé pour résoudre l'équation de diffusion de la pression. La variation du champ de pression dans un milieu perméable homogène suit l'équation de diffusion résultant de l'équation de conservation de masse, de la loi de Darcy et de l'équation d'état pour un fluide compressible. L'équation de diffusion est résolue par la méthode des différences finies avec un schéma explicite de temps et d'espace centré. La perturbation de la pression est initialement nulle et les conditions aux limites sont imperméables.

Le domaine est supposé isotrope et homogène comme l'illustre la Figure 1 pour différentes dimensions. Le domaine 2D représente le plan de faille et la zone endommagée perméable encadrée dans une roche moins perméable en 2D. Nous effectuons également des simulations dans le réservoir sédimentaire homogène à l'aide d'une modélisation en 3D.

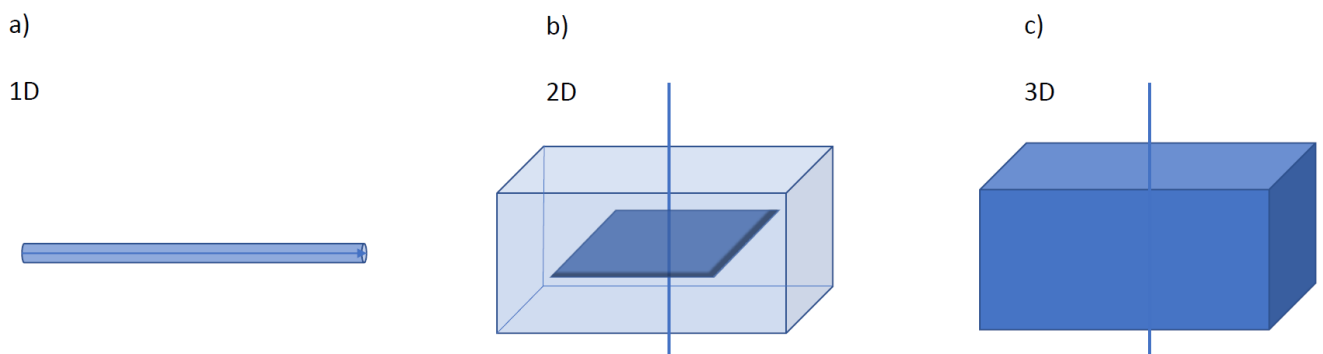


Fig. 1 – Géométries conceptuelles du modèle numérique : a) en 1D comme un courant d'écoulement ; b) en 2D comme un plan de faille encadré dans une roche moins perméable et c) en 3D comme un réservoir sédimentaire homogénéisé.

Les paramètres de la roche et du fluide sont constants dans le modèle numérique. Aucune dépendance de la pression du fluide, du déplacement mécanique ou de la température n'est prise en compte.

RESULTATS DE LA VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE ET PERSPECTIVES

Le modèle numérique est validé en comparant les perturbations numériques de la pression à distance (à 5 km des puits d'injection/production) aux solutions analytiques développées à partir de la fonction de Green de l'équation de diffusion. La solution analytique est définie à partir de la fonction de Green de l'équation de diffusion. Les développements mathématiques ne sont pas décrits ici.

Les solutions analytiques ne sont disponibles que sous certaines hypothèses qui peuvent être résumées comme suit : (i) le moment où la perturbation de la pression est estimée doit être significativement plus élevée que la durée de l'injection/production ; (ii) la distance de la zone d'injection dépasse significativement la taille du puits d'injection et la profondeur de peau.

Quatre cas différents sont considérés pour la comparaison : (i) le monopôle, c'est-à-dire une seule injection dans le domaine 2D en tant que plan de faille ; (ii) l'injection/production en dipôle dans le domaine 2D ; (iii) le monopôle dans le domaine 3D en tant que réservoir homogénéisé ; (iv) l'injection/production dipolaire dans le domaine 3D. Bon accord entre les solutions analytiques et

numériques en 2D et 3D pour le monopôle et le dipôle. La Figure 2 illustre pour le profil spatial de perturbations en pression pour le monopôle et la Figure 3 pour son évolution temporelle en 2D.

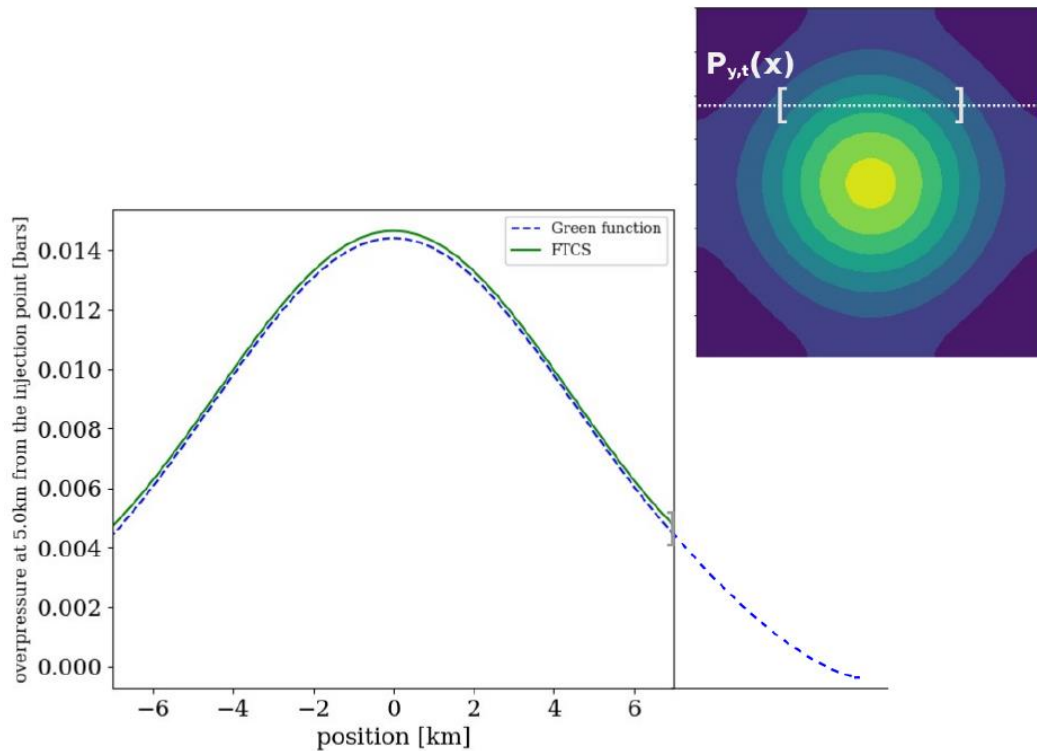


Fig. 2 – Profil spatial le long de l'axe x des perturbations de pression en champ lointain de pression $P_{y,t}(x)$ en champ lointain pour le monopôle 2D à partir du modèle numérique (en ligne verte) et de la fonction de Green de l'équation de diffusion (en ligne bleue en pointillée) six jours après l'injection et une coordonnée y à environ 5 km de l'injection. La carte des perturbations de pression en haut à droite illustre l'emplacement du profil spatial (en ligne blanche en pointillés). Les parenthèses sur la carte et le graphique représentent les limites du profil pour éviter le bruit dû aux effets de bord.

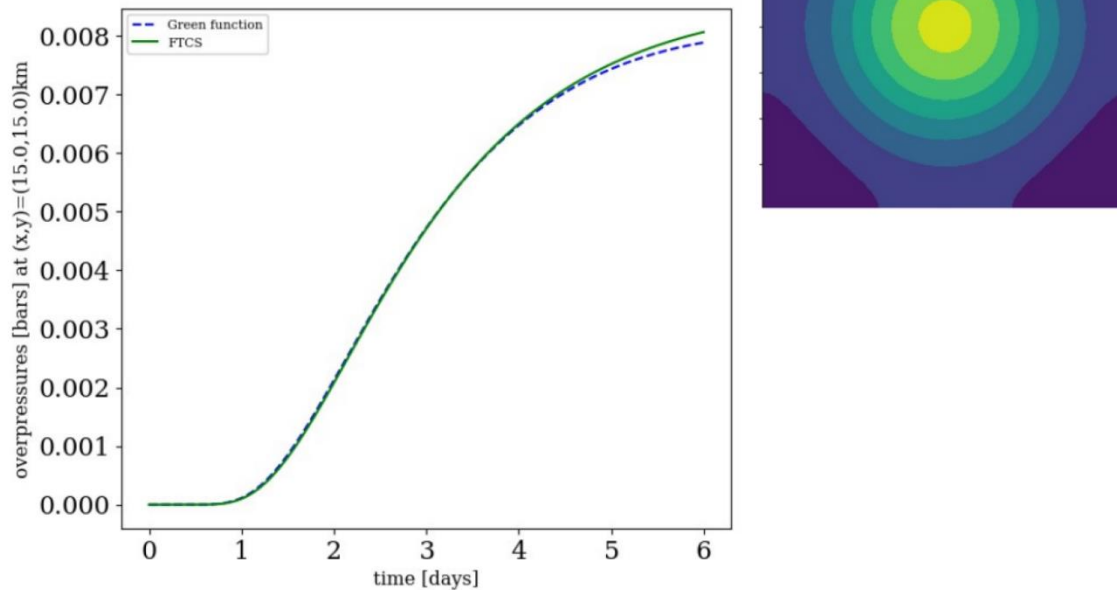


Fig. 3 – Evolution temporelle des perturbations de pression en champ lointain $P_{x,y}(t)$ pour le monopôle 2D à partir du modèle numérique (en ligne verte) et de la fonction de Green de l'équation de diffusion (en ligne bleue en pointillés) à un endroit donné à environ 5 km de l'injection. La carte des perturbations de la pression en haut à droite illustre l'emplacement (comme un triangle orange).

Le modèle numérique est ensuite utilisé pour étudier l'influence d'une stratégie différente d'injection/production de fluide (injection en fonction du temps) sur les perturbations de la pression à proximité du puits et à distance. Les performances de différentes stratégies de pompage sont comparées à un niveau de pression équivalent à proximité du puits dans la région ciblée par la simulation. L'étude est toujours en cours et les résultats préliminaires semblent montrer que la stratégie de pompage oscillante a un potentiel significatif dans la réduction de la sismicité induite sur les failles distantes.

CONCLUSIONS

La validation de notre approche numérique a été effectuée : les perturbations de pression en champ lointain numériques et analytiques sont en bon accord en monopôle, dipôle en 2D en termes de profil spatial et d'évolution temporelle. La stratégie de pompage avec injection oscillante semble montrer une minimisation des perturbations de pression en champ lointain dans des résultats préliminaires. D'autres travaux incluant des modèles de complexité croissante avec des géométries de failles et des conditions opérationnelles plus réalistes seront menés pour des stratégies d'atténuation prévenant la sismicité induite par des failles distantes proches du seuil critique.

USE OF DIFFUSIVE ELECTROMAGNETIC METHODS FOR CAVITY DETECTION

DUBOIS F.¹, BOURGEOIS B., DARNET M.

¹ BRGM, Orléans, France, f.dubois@brgm.fr

RESUME

L'usage des méthodes électromagnétiques (EM) diffusives dans la détection des cavités reste limitée. Nous proposons dans ce travail de revoir les réponses des différentes méthodes diffusives face à une cavité de type carrière. On retrouvera la réponse basse fréquence des méthodes EM communément visualisée lors des acquisitions ERT. L'acquisition de données de terrain a permis de remettre en cause nos modèles et a souligné l'importance de données pétrophysiques lors de l'interprétation des données géophysiques.

Mots clés : électromagnétismes, cavités, méthodes diffusives, analyse de sensibilité

ABSTRACT

The use of diffusive electromagnetic (EM) methods are still uncommon for cavity detection. In this work, we review the basic responses of diffusive methods in order to detect cavities (quarries). During this work, we retrieve the well-known low frequency response often seen with ERT soundings. Data acquisition on the field question our synthetic models and underlined the need of acquiring petrophysical data while interpreting geophysical data.

Key words: electromagnetism, cavity, diffusive methods, sensibility analysis

INTRODUCTION

Dans le cadre de la détection géophysiques des cavités et carrières souterraines, une étude de faisabilité via les méthodes électromagnétiques a été menée. L'étude effectuée concerne des cavités/carrières localisées à une profondeur de 1 à 30m, c'est-à-dire celles ayant potentiellement un impact sur la stabilité des bâtiments et la sécurité des personnes. La méthode électromagnétique est introduite et les différentes formes d'acquisitions, pertinentes à la détection de cavités, sont présentées. Une partie modélisation numérique présente les différents résultats auxquelles on peut s'attendre lors d'une prospection électromagnétique ainsi qu'à l'amplitude de l'anomalie pour une certaine forme et profondeur de cavité. Dans une dernière partie, on présente la mise en œuvre sur le terrain de ces méthodes électromagnétiques appliquées au site de Savonnières-en-Perthois où une ancienne carrière de calcaire a été largement exploitée dès l'époque gallo-romaine. Cette carrière s'étend sous l'intégralité du village et pourrait présenter un aléa pour ces habitants. Une conclusion générale permet de remettre en évidence les points clés et les limites de la méthode à garder en tête lors de l'étude de ces cavités.

Méthodes

La variété des méthodes EM permet de différencier deux types d'émetteurs : des émetteurs de type galvanique ou de type inductif. Les émetteurs galvaniques génèrent un courant électrique dans le sol à partir d'un câble relié au sol par deux électrodes. Les émetteurs inductifs génèrent un courant électrique dans une boucle fermée sans contact direct avec le sol.

Une carrière correspond à un vide rempli d'air possédant une résistivité électrique très supérieure à son encaissant (10^8 Ohm.m pour l'air vs moins de 10^5 Ohm.m pour la majorité des sols). Au premier ordre, la cible recherchée correspond donc à une anomalie résistante électriquement.

Modélisations 1D

Dans un premier temps, nous considérons un milieu 1D constitué d'un demi-espace homogène puis d'un milieu tabulaire contenant une couche d'« air » symbolisant la cavité. Nous utiliserons comme milieu de référence un demi-espace homogène de résistivité électrique 100 Ohm.m et de permittivité diélectrique (relative) égale à 10 (correspondant à la moyenne des terrains rencontrés en milieu tempéré). La cavité est ici modélisée sous la forme d'une couche d'air à différentes profondeurs (5m,10m,15m et 20m) d'une hauteur de 2m, d'une résistivité électrique de 10^7 Ohm.m et d'une permittivité diélectrique relative de 1. Excepté pour les tests de profondeurs, la cavité sera positionnée à 15m de profondeur comme valeur nominale. Dans les exemples ci-dessous, nous essayons aussi souvent que possible de se rapprocher de fréquences et d'offsets disponibles sur des équipements commerciaux.

Une source inductive symbolisée par un dipôle magnétique vertical (représentation simpliste d'une boucle de courant à grande distance d'observation) est disposée à 1m du sol. Le récepteur est déplacé à différentes positions afin d'obtenir un écartement source-récepteur de 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50m et des fréquences d'émission de 100 à 10^7 Hz. Dans le cas d'une source inductive, une configuration d'acquisition de type Slimgram (appareils : PROMIS (IRIS) ou MAX-MIN) et dans un environnement géologique typique d'un climat tempéré ($\rho=100$ ohm.m et $\epsilon_r=10$) une couche d'air de 2m d'épaisseur peut facilement être détectée à une profondeur inférieure ou égale à 10m. Dès 15m, une analyse plus fine des paramètres du modèle géologique est nécessaire (Figure 1). Notamment, une cavité de plus grande épaisseur sera plus facile à détecter qu'une cavité fine à une même profondeur. Une attention particulière devra également être apportée à la résistivité électrique du milieu encaissant. En effet, une couche plus conductrice impliquera l'utilisation de fréquences plus basses pour la détection de cette cavité et un milieu encaissant plus résistant nécessitera des fréquences plus élevées. Ces considérations seront fondamentales et devront être prises en compte sur le terrain, puisque les appareils de mesures géophysiques ne sont pas capables d'utiliser toutes les fréquences du spectre ainsi que tous les offsets.

Dans le cas d'une source galvanique avec un dispositif broadside. Le maximum de réponse apparaît pour les basses fréquences et augmente lorsque l'offset entre TX et RX augmente (figure 2). Cette configuration correspond donc à une méthodologie de type TRE (tomographie de résistivité électrique) largement pratiquée en géophysique. On observe un très bon seuil de détection dans cette configuration (>100%). Cependant, du fait de la nature 1D de la modélisation on ne voit aucune sensibilité à l'épaisseur de la couche d'air.

Dans le cas d'une source galvanique avec un dispositif in-line. Le maximum de réponse apparaît pour les hautes fréquences via l'apparition d'un pic de haute amplitude. Ce maximum augmente lorsque l'offset entre TX-RX augmente. La réponse basse fréquences reste néanmoins présente jusqu'à la partie DC. On observe encore une fois un très bon seuil de détection dans cette configuration (>100%). Cependant, du fait de la nature 1D de la modélisation on ne voit aucune ou peu de sensibilité à l'épaisseur de la couche d'air.

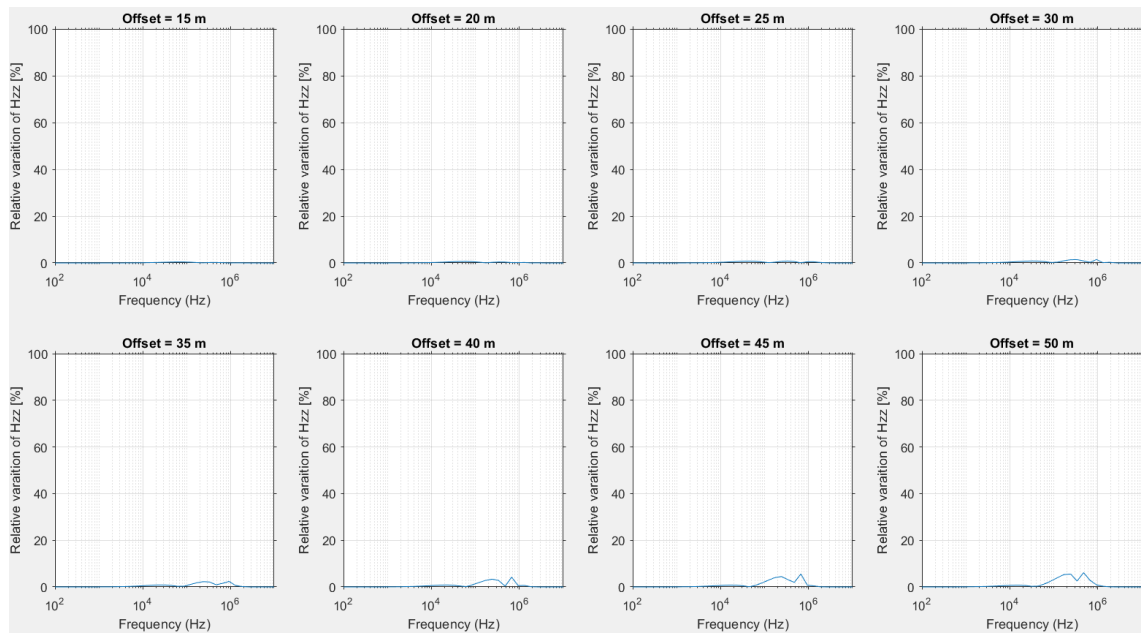


Fig. 1 – Différence relative sur la composante verticale avec et sans couche d'air de 2m d'épaisseur située à 15m de profondeur. La plus grande différence se situe à la fréquence 666kHz et correspond à un maximum de 6.9% pour un offset TX-RX de 45m.

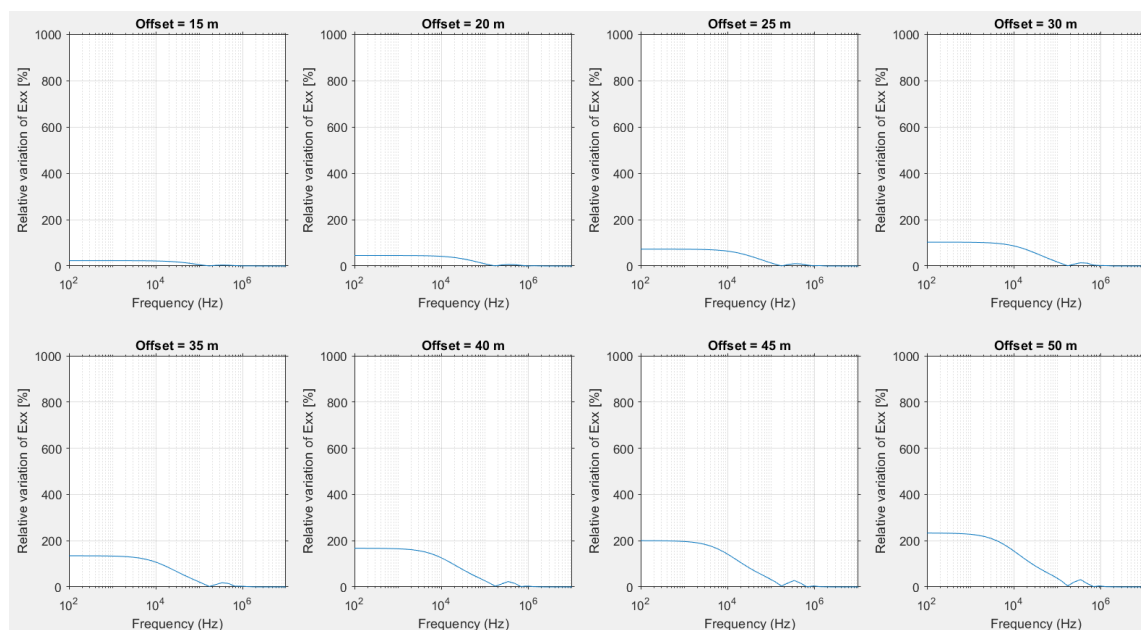


Fig. 2 – Différence relative sur la composante horizontale (en broadside) avec et sans couche d'air de 2m d'épaisseur située à 15m de profondeur. La plus grande différence se situe à la fréquence 1kHz et correspond à un maximum de 232% pour un offset de 50m.

Modélisations 3D

Bien que très utile pour simplifier les phénomènes en électromagnétisme, les modélisations 1D ne permettent pas de comprendre l'intégralité des phénomènes se produisant sur des objets complexes tels que des cavités. Dans cette partie nous explorons les phénomènes non modélisés en 1D tels que les accumulations de charges sur les parois de la cavité ainsi que l'étendue spatiale limitée de celle-ci. Cependant une très faible proportion surfacique de piliers rocheux (moins de 10% de la surface

totale de la carrière) suffit à abaisser la résistivité apparente de l'ensemble de 5 ordres de grandeur pour atteindre une résistivité apparente de 1000 Ohm.m. Or, la réponse d'une cavité de résistivité 1000 Ohm.m (10% de piliers) est bien plus faible (environ 5 fois) que celle d'une cavité de résistivité

Données observées

Dans le but de comparer les réponses observées et synthétiques des champs électromagnétiques, une acquisition sur le terrain a été effectuée sur une ancienne carrière de Savonnières-en-Perthois. Une acquisition ERT et CSEM ont été effectuées. Cette carrière d'une épaisseur comprise entre 2-4m d'épaisseur est composée de chambres et piliers. L'évaluation des données de TRE et CSEM n'a pas permis de détecter la présence d'une carrière à 15m de profondeur. Une des raisons avancées pourrait être la présence de piliers au sein de cette cavité provoquant une chute de la résistivité électrique. De plus, ces piliers peuvent avoir subis de l'altération diminuant encore plus la résistivité apparente de la carrière (Figure 3).

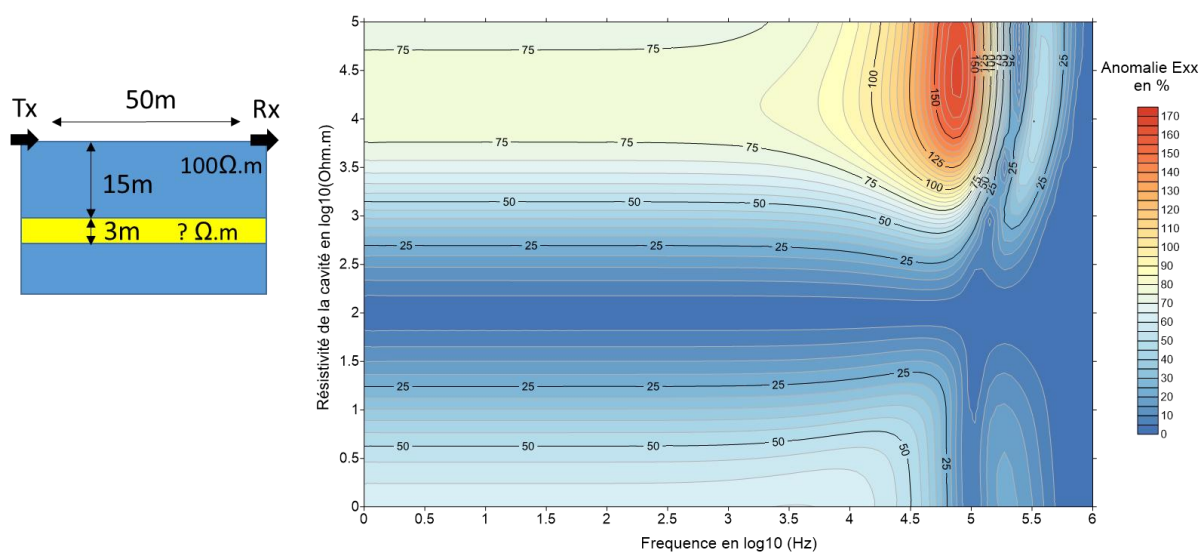


Fig. 3 – Influence de la résistivité électrique sur les champs électriques mesurés.

CONCLUSIONS

Du point de vue géophysique, ce type d'application revient dans la grande majorité des cas à détecter et caractériser un corps électriquement résistant (l'air) dans un milieu encaissant conducteur (les roches). En fonction de la fréquence exploitée et du type d'excitation électromagnétique. Les modélisations numériques montrent que ces méthodes ont des sensibilités et résolutions très différentes mais également une logistique de déploiement très variable. D'une manière générale, les méthodes galvaniques (TRE ou CSEM) sont à privilégier pour leur bonne sensibilité à la présence de corps électriquement résistants. Toutefois, leur inconvénient est la logistique pour pouvoir déployer des lignes d'électrodes de mesure et d'injection dans le sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bourgeois B., Penz S. & Asfirane F. (2016).** *Approche multifréquentielle en méthodes EM à source galvanique - Nouveau concept de résistivité apparente incluant le cas particulier de la longue électrode d'injection. Rapport final.* Orléans: BRGM.
- Chouteau M. & Giroux B. (2005).** *Géophysique appliquée II 7.449: Méthodes électromagnétiques.* Montréal: Ecole Polytechnique.

Imager des structures cachées par le
temps (archéogéophysique, sites
industriels)

DÉTECTION ET CARACTÉRISATION D'ANCIENNES DÉCHARGES CÔTIÈRES : ÉTUDE DE CAS EN CÔTE NORMANDE AVEC LES MÉTHODES ÉLECTRIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTIQUE

NOUVEAU MARIE¹, CAVALCANTE FRAGA LUIS HENRIQUE²

¹ ENVISOL, 2 rue Hector Berlioz 38110 La Tour-du-Pin, France, mc.nouveau@envisol.fr

² Université de Rouen Normandie - UMR CNRS 6143 M2C, Bâtiment Sciences et Techniques, place Emile Blondel, 76821 Mont Saint Aignan, luishcfraga@gmail.com

RÉSUMÉ

L'inversion 1-D de conductivités électriques apparentes mesurées par induction électromagnétique couplée à des tomographies de résistivité électrique a été réalisée afin de caractériser la géométrie de deux anciennes décharges côtières en Normandie. Les résultats sont probants sur l'une des décharges, notamment pour la détermination de ses limites latérales. Néanmoins, la définition du fond de la décharge demeure complexe malgré l'étalonnage des données électromagnétiques.

Mots clés : Décharges côtières, induction électromagnétique, tomographie de résistivité électrique, modélisation, inversion

ABSTRACT

1-D inversion of apparent electrical conductivities measured by electromagnetic induction coupled with electrical resistivity tomography were carried out to characterize the geometry of two former coastal landfills in Normandy. The results were conclusive for one of the landfills, in particular for the determination of its lateral limits. However, defining the 'bottom' of the landfill remains complex despite the calibration of the electromagnetic data.

Key words: Coastal landfills, EMI mapping, electrical resistivity tomography, modelling, inversion

INTRODUCTION

La détection et caractérisation de décharges côtières représentent un enjeu environnemental majeur vis-à-vis du recul du trait de côte qui risque d'engendrer la mobilisation des déchets enfouis. De plus, la réalisation de sondages intrusifs représente un risque de percement de dispositifs de protection. Et dans ce contexte, des techniques non destructives comme les méthodes géophysiques de proche surface, peuvent fournir des informations nécessaires pour la gestion du massif de déchets. Le couplage de la méthode électromagnétique à induction (EMI – *electromagnetic induction*) et de la méthode de tomographie électrique (ERT – *electrical resistivity tomography*) a déjà fait l'objet de travaux scientifiques aux résultats prometteurs. La méthode EMI sert notamment à la délimitation latérale des décharges et l'ERT à leur délimitation en profondeur (Cavalcante Fraga *et al.* 2019).

En zone côtière, plusieurs sources anthropiques de bruit, et notamment la forte salinité environnante (faible résistivité électrique), peuvent rendre difficile la détection des décharges. Ce résumé présente les résultats obtenus lors de la caractérisation géométrique (i.e. la délimitation latérale et en profondeur) de deux décharges situées sur la côte normande.

Le Site 1 a fait l'objet d'un confinement d'urgence : la zone de déchets - déjà en cours de mobilisation et de relargage dans la mer - a été recouverte d'un géotextile et d'enrochements. Le Site 2, correspond à une ancienne décharge sauvage dont la localisation est basée sur la mémoire des riverains. Une petite digue d'environ 1 m de hauteur sépare la plage de l'emprise approximative de la décharge.

MÉTHODOLOGIE

Pour chaque site, le même protocole a été mis en œuvre : 1) La réalisation d'une cartographie EMI avec un CMD-Explorer (Gf Instruments s.r.o, République Tchèque) en configuration VCP (Dipôles Horizontaux, ou *Vertical Co-Planar*). Cet instrument possède trois bobines réceptrices écartées de

1,48 m (C1), 2,82 m (C2) et 4,49 m (C3) de la bobine émettrice (fréquence d'émission : 15 kHz). Il était porté à une hauteur d'environ 1 m. 2) l'acquisition de deux sections ERT à l'aide d'un Syscal Pro (Iris Instruments, France) utilisant un dispositif Wenner-Schlumberger réciproque et un espacement d'électrodes de 1,5 m. Ces profils ont été implantés de manière à croiser les anomalies mises en évidence par la cartographie EMI.

Les conductivités électriques apparentes EMI ont été étalonnées avec l'ensemble des deux profils ERT (Lavoué *et al.* 2010). L'étalonnage a été établi sur la base de la corrélation linéaire entre les réponses EMI théoriques, à partir de modèles 1-D extraits des sections ERT inversées, et les mesures EMI de terrain.

Les conductivités électriques apparentes étalonnées ont ensuite été inversées en utilisant un modèle 1-D (Schamper *et al.* 2012). Le modèle de départ contenait environ 20 couches afin d'obtenir un modèle inversé lisse. Des résidus d'inversion égaux ou inférieurs à 1 indiquent que les modèles inversés expliquent les données dans la marge d'erreur considérée (ici 5% ou 1mS/m).

RÉSULTATS

SITE 1 : Décharge n°1 (absence de digue)

Aucune des cartes de conductivité électrique apparente issues des 3 écartements ne permet de distinguer de façon claire la décharge bien que celle-ci soit visible en surface (Fig. 1a). On observe en revanche clairement un gradient de conductivité électrique augmentant vers la mer et en profondeur (de 15 mS/m à 100 mS/m). Les sections ERT montrent une anomalie légèrement plus conductrice (de 4 Ω .m à 20 Ω .m) au croisement des deux profils.

L'inversion des conductivités électriques apparentes donne un modèle de terrain avec une couche hétérogène en surface et de plus en plus conductrice en profondeur, avec une gamme de résistivités allant de 1 Ω .m à 300 Ω .m (Fig. 1b et 1c).

SITE 2 : Décharge n°2 (en retrait d'une digue)

Les cartes de conductivité électrique apparente montrent une zone plus conductrice (de 50 mS/m à 100 mS/m) au centre de l'emprise (Fig. 2a). Cette anomalie est moins visible en profondeur, mais reste discernable sur la carte du plus grand écartement (carte C3 Fig. 2a). Les sections ERT montrent elles aussi une zone plus conductrice et plus hétérogène au centre des profils (de 60 Ω .m à 120 Ω .m).

L'inversion des conductivités électriques apparentes a permis la reconstruction de l'anomalie centrale (Fig. 2b). Elle présente une couche superficielle hétérogène (de 3 Ω .m à 650 Ω .m) et de plus en plus conductrice en profondeur (de 3 Ω .m à 35 Ω .m). Les résidus d'inversion indiquent que les données sont mal résolues par les modèles les plus proches de la mer (Fig. 2c)

DISCUSSION

La décharge n°2, ancrée dans la couche superficielle, est identifiable par son caractère plus conducteur (présence d'éléments métalliques) que la formation sableuse encaissante (Fig. 2). En revanche, la décharge n°1, malgré son affleurement en surface, n'a pas été ni détectée ni caractérisée sur les prospections géophysiques. Ceci est possiblement dû à la nature différente des déchets enfouis et à la plus grande proximité de la mer à ce niveau de la côte (Fig. 2).

La discrimination du fond de la décharge n'est pas aisée. En supposant que la fond de la décharge ne dépasse pas le niveau de saturation du biseau salé (dépôt des déchets dans un environnement sec, avant d'atteindre la saturation en eau salée), la profondeur maximale de la décharge est alors marquée par la zone de saturation du biseau salé. La transition saturée/non saturée n'est pas franche, mais graduelle, et se traduit par un gradient de résistivité électrique. Ainsi, à partir des données EMI, ERT et

du niveau actuel de la mer, la profondeur du fond de la décharge n°2 a été estimée entre 3 m et 4 m. Des sondages de sol à la pelle mécanique ont bien mis en évidence des déchets dans la zone délimitée, mais seulement jusqu'à environ 1,5 m de profondeur (c.à.d. du même ordre de grandeur que l'écartement inter-électrode utilisé).

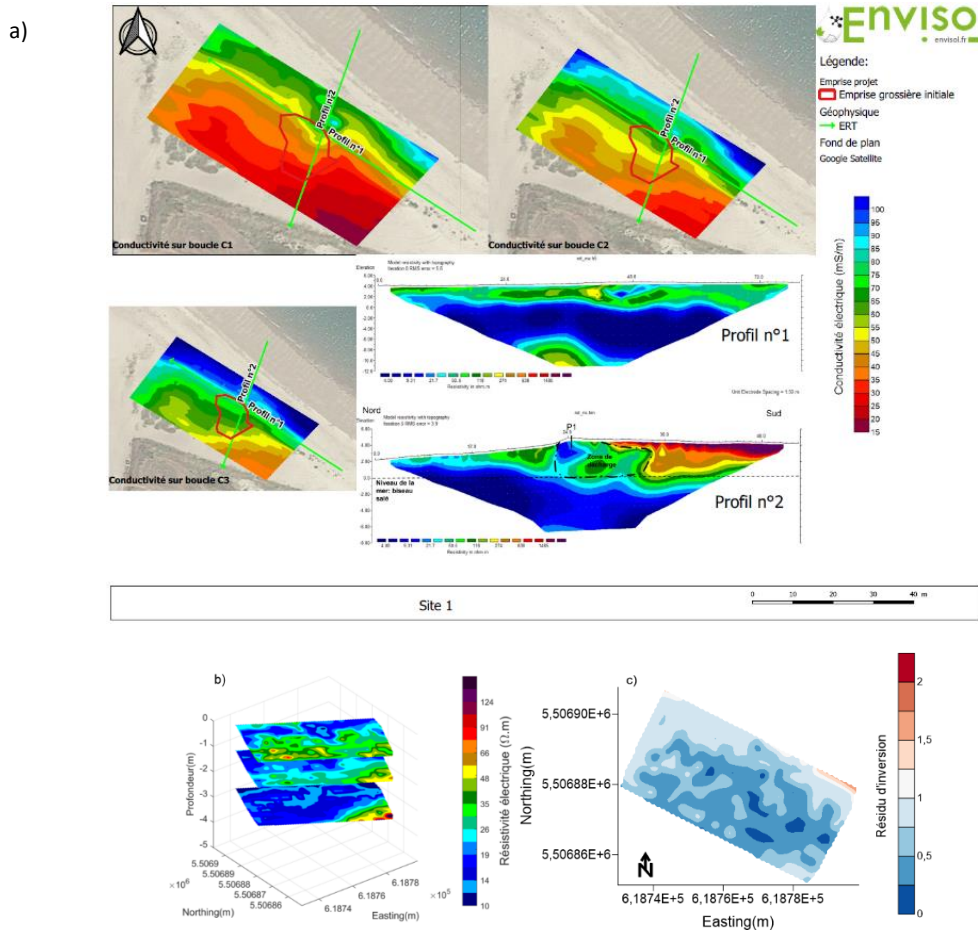


Fig. 1 –Résultats des prospections géophysiques sur le site 1 : a) Cartes des conductivités électriques apparentes brutes et sections de résistivité électrique inversée. b) Coupes de conductivité électrique en profondeur résultant des inversions des conductivités électriques apparentes étalonnées (0,5 m ; 1,5 m et 3 m de profondeur). c) Résidus d'inversion EMI.

CONCLUSIONS

L'utilisation de l'EMI et de l'ERT a permis de mettre en évidence une décharge sur les deux cas étudiés, à travers la démarcation de ses limites latérales. Malgré ses limitations, l'étalonnage des conductivités apparentes EMI est recommandé car 1) très peu de fournisseurs rendent publics leur protocole d'étalonnage ou la façon dont les appareils restituent les mesures et 2) elle permet une amélioration de résultats d'inversion. En revanche, dans notre étude de cas, l'inversion EMI n'a pas apporté plus d'informations que les données brutes. De plus, la présence ou l'absence d'une digue semble influencer les résultats par le biseau salé.

La détermination de la limite verticale de la décharge demeure encore difficile d'autant plus que dans le cas du site 2) elle est du même ordre de grandeur que l'écartement inter-électrode utilisé. Elle dépend également du contexte du site et la décharge peut facilement être masquée par un niveau aquifère salé. D'autres méthodes pourraient être testées (géoradar, magnétisme), afin de compléter la méthodologie proposée pour la caractérisation des décharges. Néanmoins, la gamme de techniques appliquées sera toujours contrainte par le budget et le planning des projets d'aménagement côtiers.

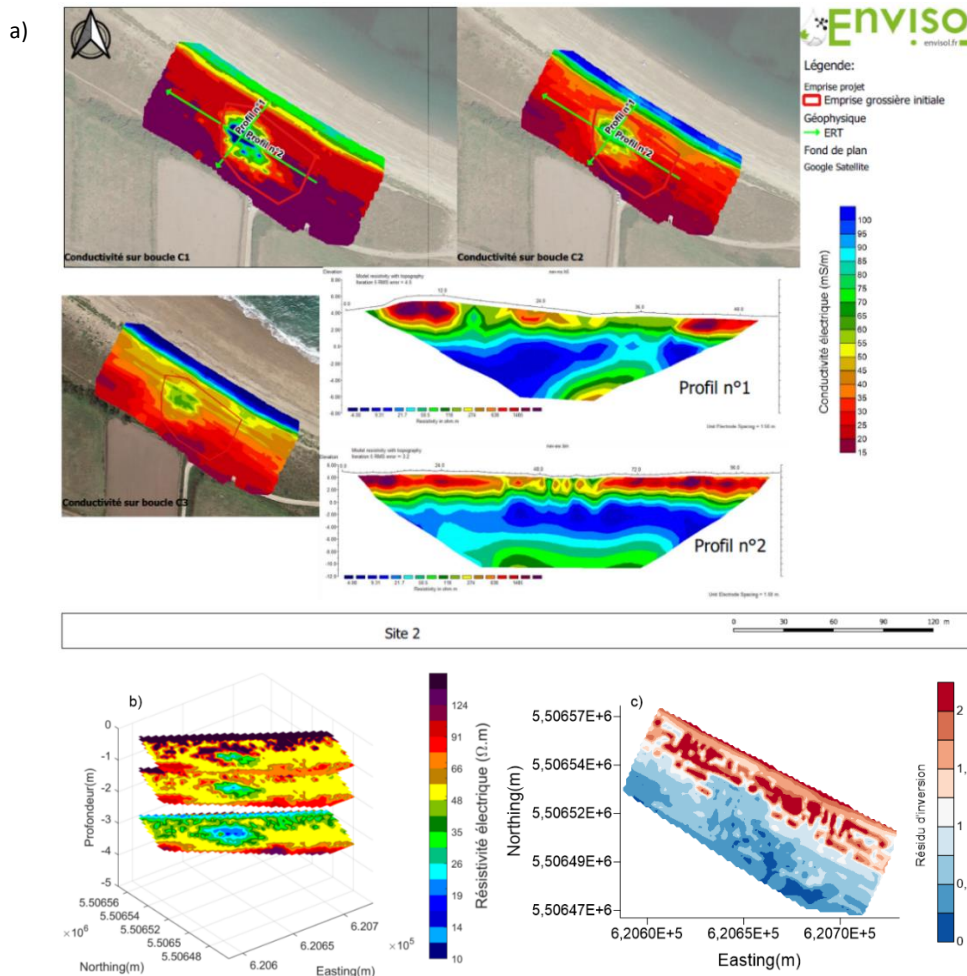


Fig. 2 –Résultats des prospections géophysiques sur le site 2 : a) Cartes des conductivités électriques apparentes brutes et sections de résistivité électrique inversée. b) Coupes de conductivité électrique en profondeur résultants des inversions des conductivités électriques apparentes étalonnées (0,5 m, 1,5 m et 3 m de profondeur). c) Résidus d'inversion EMI.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAVALCANTE FRAGA L. H., SCHAMPER C., NOËL C., GUÉRIN R., REJIBA F., 2019 – Geometrical characterization of urban fill by integrating the multi-receiver electromagnetic induction method and electrical resistivity tomography: A case study in Poitiers, France. *European Journal of Soil Science*, 70(5), 1012-1024.

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

DEGROOT-HEDLIN, C., & CONSTABLE, S., 1990 – Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613-1624.

LAVOUÉ F., VAN DER KRUK J., RINGS J., ANDRÉ F., MOGHADAS D., HUISMAN J. A., LAMBOT S., WEIHERRNÜLLER L., VANDERBORGH J., VERECKEN H., 2010 – Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography. *Near surface geophysics*, 8(6), 553-561.

SCHAMPER C., REJIBA F., GUERIN R., 2012 – 1D single-site and laterally constrained inversion of multifrequency and multicomponent ground-based electromagnetic induction data—Application to the investigation of a near-surface clayey overburden. *Geophysics*, 77(4), WB19-WB35.

UTILISATION DU GEORADAR POUR LA DETECTION DE VESTIGES ARCHEOLOGIQUES EN VILLE : DEUX CAS D'ETUDE SUIVIS DE TRANCHEES DE DIAGNOSTIC

FORES B.¹, HULIN G.^{1,2}, PAEZ-REZENDE L.¹, DEVEVEY F.¹

¹ Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, Paris, France

² UMR 7619 Metis, Paris, France

RESUME

Le géoradar est de plus en plus prescrit en amont des diagnostics archéologiques en milieu urbain que ce soit sur de larges surfaces ou sur la voirie. Dans ce cas, la présence de nombreux réseaux urbains et l'étroitesse de la bande investiguée pose la question de la pertinence de ces opérations. Basé sur les exemples de géoradar sur voirie à Limoges et Cherbourg, des résultats très intéressants peuvent être attendus mais l'expérience a montré qu'une connaissance a priori des vestiges recherchés, de leur profondeur attendue ainsi que du plan des réseaux en activité est fortement recommandée.

Mots clés : géoradar, archéologie, milieu urbain, cas d'étude

ABSTRACT

Ground penetrating radar is being increasingly used in urban areas to evaluate presence of archaeological remains, on large areas such as place and park but also on road. However, the urban context has some limitations, as for examples the numerous and the narrowness of the streets and hence the geophysical map obtained. Here we present a collection of GPR survey carried out in two French cities, followed by trial trenching observations. In such a context, very informative results can be expected, but a priori information on the remains and utilities are highly recommended.

Key words: Archaeological prospection; urban areas, utilities, GPR

INTRODUCTION

Le géoradar est utilisé depuis plusieurs décennies en ville pour la détection des réseaux enterrés (Gabrys et al. 2019). En France, il est dorénavant de plus en plus demandé afin d'évaluer la présence de vestiges en amont ou en complément d'un diagnostic archéologique préventif (Paez-Rezende and Hulin 2021) que ce soit sur de large zone telles que des places ou des parcs mais également sur les voiries qui constituent des linéaires souvent étroits. Cette approche non destructrice, dont l'intérêt pour la détection de vestiges enfouis est indéniable (e.g. Goodman 2008), peut sembler idéale en contexte urbain où la réalisation de tranchées est délicate (circulation, ouverture de l'enrobée, présence de réseaux). Cela est particulièrement le cas avec les nouveaux radars multi-antennes présents sur le marché et pouvant être tractés sur la route sans interruption du trafic. Malgré tout, de nombreuses limitations existent en milieu urbain (Trinks et al. 2009 ; Masini et al. 2020). L'entretien des routes en fait un milieu très hétérogène ; les routes sont également le passage privilégié de nombreux réseaux enterrés (y compris désaffectés ou inconnus), et leurs tranchées d'installation peuvent avoir détruit tout ou partie des vestiges. Enfin, l'étroitesse des rues offre une vision limitée du sous-sol ce qui est un inconvénient majeur lorsque l'on ne recoupe qu'une portion réduite d'un vestige. Nous présentons ici les résultats géoradar obtenus sur la voirie de deux villes, Cherbourg et Limoges, suivis de tranchées de diagnostic et nous discutons de la pertinence (ou non) de réaliser une cartographie radar sur la voirie selon les contextes.

METHODE

Pour ces deux études, un Radar multi-antenne *Impulse Radar Raptor* a été utilisé. Il se compose d'antennes 450 MHz espacées de 8 cm avec 8 voies de mesures simultanées dans sa version manuelle et 18 voies dans sa version tractée (**Fig.1**). Le positionnement centimétrique a été réalisé soit à l'aide d'un GNSS *Trimble R4S* avec correction RTK du réseau *Teria*, soit à l'aide d'une station totale robotisée *Trimble S5*. Les logiciels *Condor* et *GPRSlice* ont été utilisés pour le traitement des données (correction du temps zéro, filtrage, gain, interpolation, migration 3D, stacking) ainsi que la création des radargrammes et des tranches horizontales. Les vitesses de propagation estimées varient autour de 10 à 11 cm.ns⁻¹ sur la plupart des routes étudiées. Les prospections ont essentiellement eu lieu au printemps 2022. Au total, plus de 6,5 km de routes ont été prospectées à Limoges et environ 1 km à Cherbourg. Dans les deux cas, l'acquisition s'est faite sans interruption du trafic routier.



Fig. 1 – Raptor 18-canaux avec positionnement GNSS dans la ville de Cherbourg.

RESULTATS

Sur le kilomètre de route cartographié à Cherbourg, quatre zones ont été identifiées comme ayant un fort potentiel archéologique. Dans la zone la plus convaincante, une tour médiévale et ses remparts avec contreforts sont clairement visibles sur les tranches à partir de 40 cm de profondeur. De multiples réflexions plus profondes ont également pu être reliées à des sépultures grâce à la tranchée de diagnostic réalisée à la pelle mécanique par la suite (**Fig.2**).

A Limoges, le géoradar a révélé des vestiges gallo-romains dans certaines rues les plus proches du centre-ville et du centre antique. Dans la rue du Pont St-Martial par exemple, des vestiges ont été repérés sous un grand nombre de réseaux (**Fig.3**). La présence de ces vestiges étaient attendus basé sur les résultats d'une fouille des années 70. Plus loin du centre antique, très peu d'anomalies ont été repérées avec un bon degré de confiance, l'une d'entre elles ayant été confirmée récemment dans les tranchées de diagnostic, toujours en cours, et dont les résultats seront certainement très instructifs. De manière générale, les tests réalisés à Limoges ont montré une très forte atténuation du signal radar en périphérie du centre-ville du fait d'un sol plus argileux. De fait son utilisation ici est à pondérer du fait d'un sol inégalement favorable selon les secteurs de la ville considérés.



Fig. 2 – Cherbourg – Quai de Caligny : La « tour de l'église » et le cimetière vu par le géoradar et les résultats de la tranchée de diagnostic (photographie drone J-L. Lamache). Fond BD Ortho IGN.



Fig. 3 – Limoges – Rue du Pont Saint Martial : vestiges de la « maison des Nones de Mars » observés au géoradar et report des résultats de la fouille des années 1970. Fond BD Ortho IGN.

CONCLUSIONS

Les résultats énoncés ici sont à mettre en balance avec la totalité de la surface prospectée. Les réseaux urbains se densifient fortement à l'approche des centres-villes et compliquent très fortement la lecture. A Cherbourg, sur les quatre zones identifiées, trois sont hors du centre et bien moins impactées par les réseaux. De plus, certains des vestiges observés en tranchées, peu profonds, ne sont pas visibles sur les données radar. A Limoges, le fait d'observer des vestiges sous un grand nombre de réseaux est une exception. Sur la majeure partie du tracé prospecté, la densité de réseaux est telle que très peu d'anomalies archéologiques ont pu être observées.

Les informations *a priori* sur les vestiges ont une grande importance. Dans les deux villes étudiées, la majorité des vestiges avérés ont été observés dans des zones dont le potentiel archéologique était fort et en partie connu. Une simple indication de l'orientation des vestiges facilite grandement la distinction entre un mur et un réseau. Au vu du signal bruité et souvent faible sous les réseaux, la distinction n'est pas toujours possible sur les radargrammes.

Le radar multi-antennes offre donc un fort potentiel pour l'archéologie en contexte urbain, y compris sur la voirie même si son utilisation doit être raisonnée. Il est probable que le résultat soit une simple cartographie des réseaux souterrains, bien qu'elle présente tout de même un intérêt pour positionner les tranchées dans le cadre d'un diagnostic archéologique. Le radar doit être préféré sur des routes larges ou le nombre de réseaux est modéré. Les anomalies difficiles à interpréter pourront toujours être réinterprétées en fonction des résultats des tranchées de diagnostic et fournir l'extension des faits mis au jour.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GABRYS, M., KRYSZYN, K., ORTYL, Ł., 2019 – GPR surveying method as a tool for geodetic verification of GESUT database of utilities in the light of BSI PAS128. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 107(1) ; 49-59. <https://doi.org/10.2478/rgg-2019-0006>

GOODMAN, D., 2008 – GPR methods for archaeology. Seeing the Unseen. Geophysics and landscape archaeology. *CRC Press*. 2008 ; 255-70.

MASINI N., GARCIA S., SILEO M., CAPOZZOLI L., VERA D., LASAPONARA R., 2020 – Urban Archaeo-Geophysics in Cusco. The Case Studies of Paraninfo and Casa Concha. *IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage Trento, Italy, October 22-24, 2020*.

PAEZ-REZENDE L., HULIN G., 2021 – A Combined Approach Using GPR and Trial Trenches in Cherbourg for Archaeological Evaluation. *14th ICAP, 8-10 September 2021, Lyon, France. ArcheoSciences, revue d'archéométrie*. 2021 ; 45(1) ; 101-3.

TRINKS I., KARLSSON P., BIWALL A., HINTERLEITNER A., 2009 – Mapping the urban subsoil using ground penetrating radar – challenges and potentials for archaeological prospection. *ArcheoSciences*. 2009 ; 33(suppl) ; 237-40. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.1630>

LA POLARISATION PROVOQUEE DES PARTICULES METALLIQUES : RETOURS D'EXPERIENCES DE TERRAIN ET EN LABORATOIRE

KESSOURI P.¹, RYCKEBUSCH C.^{1,2}, RAHAMANI M.¹

¹ BRGM, 45100 Orléans, France, p.kessouri@brgm.fr

² Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

RESUME

La polarisation provoquée (PP) a été utilisée pour caractériser d'anciens sites et gisements métallurgiques dans le cadre du projet NWE-REGENERATIS. Cette présentation s'appuie sur les résultats obtenus pour le site de Pompey (FR) pour développer la méthodologie retenue : Approche classique à laquelle s'ajoute (3) Echantillonnage ciblé ; (4) Analyses géochimiques en laboratoire (XRF) ; (5) Analyse géostatistique des corrélations entre données PP et géochimiques ; (6) Interprétation quantitative à l'aide d'une approche géostatistique qui permet de distinguer différents volumes de composition chimique différente et d'y associer une probabilité jointe d'occurrence.

Mots clés : Polarisation Provoquée ; particules métalliques ; approche géostatistique ; probabilité jointe

ABSTRACT

Induced polarization (IP) has been used to characterize past metallurgical sites and deposits as part of the NWE-REGENERATIS project. This presentation is based on the results obtained for the Pompey site (FR) to develop the adopted methodology: Classic approach to which is added (3) Targeted sampling; (4) Laboratory geochemical analyzes (XRF); (5) Geostatistical analysis of correlations between IP and geochemical datasets; (6) Quantitative interpretation using a geostatistical approach that makes it possible to distinguish between different volumes and to associate a joint probability of occurrence.

Key words: Induced Polarization; metallic particles; geostatistical approach; joint probability

INTRODUCTION

Les anciens sites et gisements métallurgiques représentent une part importante des sites potentiellement contaminés dans l'Union européenne (UE) : environ 100 000 ont été identifiés uniquement dans les régions du Nord-Ouest de l'UE. Si les déchets récents des sites encore en activité sont couramment valorisés, ce n'est pas le cas des anciens granulats à forte teneur en métaux ferreux (et autres), scories blanches et noires, résidus de bassins de décantation, etc., qui sont considérés comme des sources de pollution et sont coûteux à gérer ou à éliminer. Ces sites pourraient être considérés comme des opportunités de valorisation de grands volumes de ressources (métaux, matériaux et terres) en utilisant des techniques d'exploitation minières urbaines, s'ils étaient mieux caractérisés.

La méthode de polarisation provoquée (PP) est une méthode géophysique connue pour être sensible à la présence de particules métalliques disséminées dans les couches du sous-sol. Si l'interprétation qualitative des paramètres PP mesurés sur le terrain (c'est-à-dire la résistivité électrique et la chargeabilité) est répandue, l'interprétation quantitative en termes de concentrations de différentes particules métalliques reste à développer.

Cette présentation est centrée sur des expériences récentes à la fois en laboratoire et sur le terrain pour interpréter de façon quantitative les résultats PP.

1. CONTEXTE ET SITE D'ETUDE

L'exemple du site de Pompey (FR), investigué dans le cadre du projet NWE-REGENERATIS (<https://www.nweurope.eu/projects/project-search/nwe-regeneratis-regeneration-of-past-metallurgical-sites-and-deposits-through-innovative-circularity-for-raw-materials/>), est utilisé dans cette étude pour présenter l'intérêt d'utiliser des mesures PP dans le domaine temporel (TDIP) pour caractériser les anciens sites et dépôts métallurgiques. Il s'agit d'un ancien bassin de décantation des boues issues des hauts fourneaux de l'ancien site métallurgique de Pompey-Frouard-Custine. Le site est choisi pour deux raisons principales: (1) il accueillait diverses activités de production d'alliages à base de fer ; (2) il a été réhabilité en surface, et la documentation historique et les investigations ont été faites dans le respect de la législation et des valeurs-seuil françaises.

Des mesures géophysiques multi-méthodes ont été entreprises sur le site. Six profils de mesures électriques ont été réalisés (voir Fig. 1) : 5 profils dans la direction Nord-Sud et 1 profil transversal. La configuration choisie est de type Dipole-Dipole avec un écartement de 2.5 m pour des profils de 96 électrodes (voir Fig. 1). Les mesures ont été réalisées à la fois en terme de résistivité ρ et chargeabilité M . En plus des profils de polarisation provoquée, trois profils sismiques, ainsi qu'une cartographie magnétique et électromagnétique du site ont été déployés (voir Fig. 1).

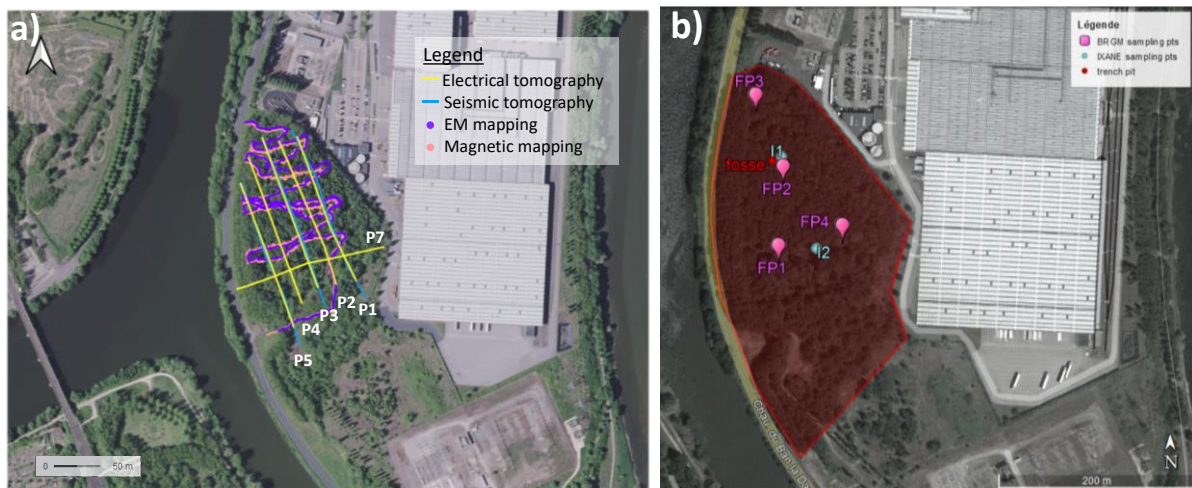


Fig. 1 –a) Carte du site de Pompey avec positionnement des différentes mesures géophysiques réalisées ; b) Carte du site de Pompey avec localisation des différents points d'échantillonnage.

2. METHODOLOGIE

La méthodologie de travail pour les données PP sur le site, développée au cours du projet NWE-REGENERATIS par l'université de Liège et le BRGM, peut être découpée en plusieurs phases :

Phase 1 : Conception des levés géophysiques

Cette phase comprend une analyse des données historiques (plans, rapports, photos), ainsi qu'une visite de site pour analyser l'environnement du site. Une sélection des implantations d'électrodes et des configurations de mesure les plus adaptées est effectuée à ce stade.

Phase 2 : Mesures sur site

Cette phase comprend les mesures PP sur site, ainsi que le traitement et l'inversion des données pour aboutir à une interprétation qualitative des données en terme de zones ou de couches d'intérêt.

Phase 3 : Echantillonnage ciblé

Suite à ces premières investigations et à l'identification des zones d'intérêt, un plan d'échantillonnage est proposé pour extraire des échantillons de sol qui seront analysés en termes de propriétés géophysiques ainsi que de paramètres physico-chimiques.

Des analyses chimiques plus ou moins poussées sont réalisées. Une analyse en terme de concentration en éléments chimiques à l'aide de la méthode de fluorescence aux rayons X est un minimum. Elle peut être complétée par une analyse de diffraction aux rayons X pour connaître la nature des minéraux, couplée à une analyse granulométrique. Enfin des mesures PP de laboratoire peuvent être effectuées sur les mêmes échantillons.

Une analyse en terme de matrice de corrélation ou une analyse des composants principaux sur l'ensemble du jeu de données précédemment acquis (terrain et laboratoire) est utilisée pour identifier des corrélations entre les jeux de données géophysiques, physiques et géochimiques. Les corrélations établies permettent de distinguer des clusters qui serviront d'entrée à l'interprétation finale

Les clusters obtenus sont utilisés dans l'interprétation finale des données de terrain. Celle-ci se fait soit par application d'algorithmes de type machine-learning, soit par approche probabilistique (cf. Isunza-Manrique *et al.*, 2023). L'interprétation permet de caractériser les matériaux de valeur en termes de volume/quantité, concentration, type de métal, granulométrie...

Après filtrage et inversion séparés de chaque profil électrique, les 6 sections inversées sont replacées dans un système de coordonnées globales. La Figure 2a) présente les résultats obtenus en terme de facteur métallique MF ($MF=2000.M/\rho$), qui met en évidence les zones à la fois conductrice et chargeable. Une zone de MF plus élevé est observée au Sud du site. Des échantillons provenant de deux forages sont prélevés sur ce volume (FP1 et FP4). Une autre anomalie de MF élevé est observée à l'extrême Nord des profils. Un sondage (FP3) est réalisé dans cette zone. Enfin, l'emplacement du dernier forage (FP2) est choisi comme représentatif des niveaux moyens observés sur la majorité du bassin.

Une analyse en composantes principales (PCA) a été réalisée sur les résultats XRF des échantillons prélevés (voir Fig. 2b) et c)). Quatre composantes principales expliquent la majorité du jeu de données géochimiques. L'analyse PCA, couplée avec un outil de clustering permet de mettre en évidence 4 couches différentes: (1) une couche d'alluvions naturels profonde (couche A sur la Fig 2b)) ; (2) et (3) deux couches de matériaux provenant de l'ancien bassin de décantation ; (4) une couche de dépôts anthropiques post-fermeture du site sidérurgique (couche la plus en surface).

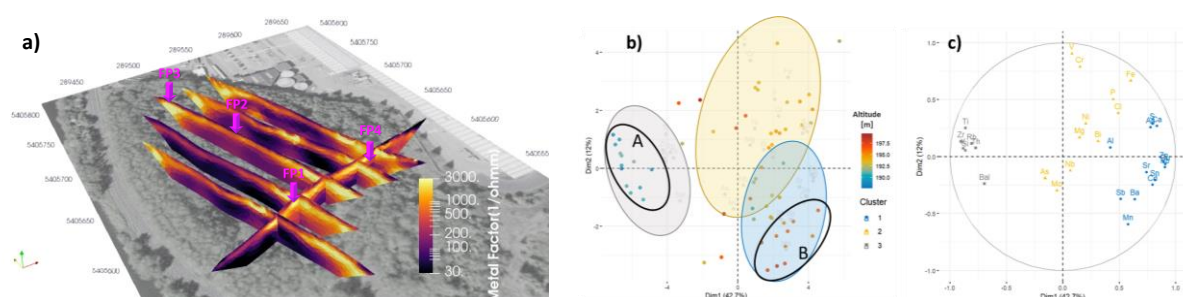


Fig. 2 –a) Profils de mesure PP représentés en terme de facteur métallique ($MF=2000.M/\rho$) et localisation des points d'échantillonnage ; b) analyse des composants principaux (PC1 vs PC2) avec identification de 3 clusters sur les éléments chimiques et projection des points de mesure représentés en fonction de leur altitude. Les groupes A et B ont été identifiés par une analyse plus fine en fonction de l'altitude ; c) analyse des composants principaux (PC1 vs PC2) sur les éléments chimiques représentés en fonction de leur cluster d'appartenance

Les clusters obtenus sur les échantillons sont utilisés pour interpréter les données PP de terrain. Une approche probabiliste (cf. Isunza-Manrique *et al.*, 2023) a été adaptée aux données de Pompey pour

interpréter les résultats en terme de couches, avec une probabilité jointe conditionnelle associée (voir Fig. 3).

CONCLUSIONS

La méthodologie développée lors du projet NWE-REGNERATIS par l'université de Liège et le BRGM a été appliquée sur le site pilote de Pompey. Elle permet d'identifier plusieurs couches de matériaux revalorisables, avec une probabilité jointe d'occurrence associée à chaque couche (voir Fig. 3). Cette information supplémentaire est intéressante pour établir un modèle économique et déterminer l'intérêt du site à être reclassée. La signature PP obtenue sur le site permet donc de mieux le caractériser et réévaluer le potentiel des sites et gisements métallurgiques passés.

Cluster 1: bassin de décantation – couche 1

Cluster 2: bassin de décantation – couche 2

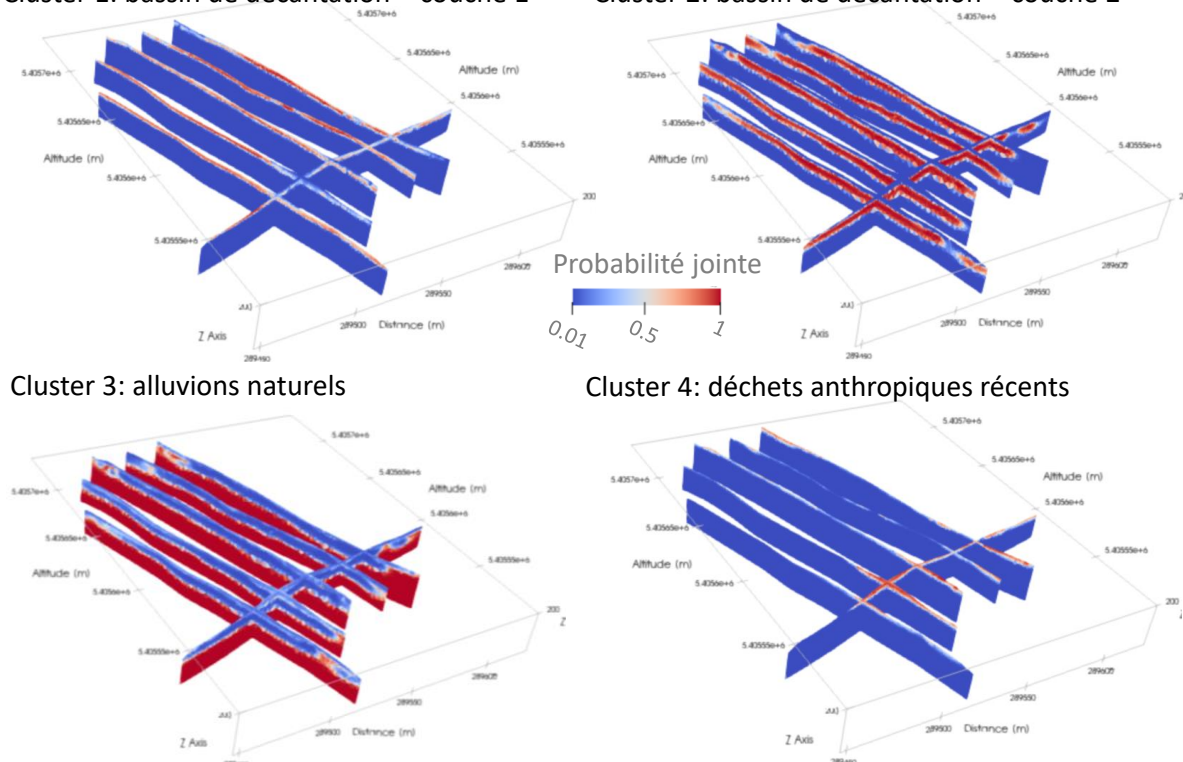


Fig. 3 – Probabilité jointe conditionnelle de présence de chaque couche (cluster) en fonction de la position de la cellule sur les profils PP.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le projet Interreg North West Europe (NWE) appelé NWE-REGENERATIS qui vise à la régénération des anciens sites et gisements métallurgiques grâce à une circularité innovante pour les matières premières.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ISUNZA MANRIQUE I., CATERINA D., NGUYEN F., HERMANS T., 2023 – Quantitative interpretation of geoelectric inverted data with a robust probabilistic approach. p. 93.

ENSEIGNER LE TRAITEMENT DE DONNÉES RADAR DE SOL PAR FEUILLES DE CALCUL JUPYTER: APPLICATIONS EN ARCHÉOLOGIE

SAINTENOY A.¹, LÉGER E.¹, LAMBERT R.¹, CARRIVE P.¹

¹Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, Orsay, France

RÉSUMÉ

Le radar de sol est une méthode de plus en plus utilisée pour détecter des vestiges archéologiques dans les premiers mètres du sous-sol. Pour ce type d'application, une approche consiste à acquérir des profils radar parallèles entre eux, séparés de 50 centimètres, permettant de couvrir une surface avec une précision spatiale suffisante pour les cibles recherchées. Nous présentons ici une chaîne de traitements de tous ces profils, développée sous python, avec un environnement Jupyter, dans le cadre de différentes prospections sur différents sites archéologiques (Ostia-Antica (Italie), chapelle de Riez et abbaye de Thiron-Gardais). La chaîne de traitements permet d'appliquer les filtres classiques sur les données (filtrage fréquentiel, retrait de trace moyenne, gain, analyse d'hyperbole, migration de Stolt) et de visualiser les données en profils ou sous forme de carte d'amplitudes à différentes profondeurs. Les codes Python sont utilisés avec l'environnement Jupyter ce qui permet une utilisation adéquate pour l'enseignement des méthodes de traitement de données radar. L'expérience montre une très bonne réception de la part des étudiant·s·es à ces enseignements et une prise en main efficace lors de leurs différents stages.

Mots clés : Radar de sol, Archéologie, Python, Jupyter

ABSTRACT

Ground-penetrating radar is increasingly used for detecting archaeological remains within the top meters of the ground. For this type of application, one approach consists in acquiring parallel radar profiles every 50 centimeters over a surface area of typically 30 m by 30 m. In this study, we present Python codes, developed within the Jupyter environment, for processing all these profiles, within the context of various archaeological surveys (Ostia-Antica in Italy, Riez'chapelle, and Thiron-Gardais'abbey). The processing tools include the application of classic filters on the data (frequency filtering, removal of mean trace, gain, hyperbola analysis, Stolt migration), as well as visualization of the data in the form of amplitude maps. Using the Jupyter environment provides an appropriate platform for teaching radar data processing methods. The experience shows that students give very positive feedbacks to this teaching and find it effective in their various internships.

Key words : Ground-Penetrating Radar, Archaeology, Python, Jupyter

INTRODUCTION

Le radar de sol est une méthode géophysique très efficace dans les milieux résistants (faible proportion d'argile) pour mettre en évidence des vestiges archéologiques dans les premiers mètres du sous sol [5]. Il existe de nombreux logiciels de traitements des données radar, GUI based, dont le logiciel REFLEXW [4]. Il est difficile d'enseigner avec ce logiciel payant et surtout sous licence non libre, car les traitements apparaissent comme des boîtes noires. Au sein du département des Sciences de la terre de l'université Paris Saclay, nous avons commencé à écrire nos propres codes de traitements de données radar au printemps 2016 sous Python. Par ailleurs, l'environnement Jupyter est l'une des solutions les plus adéquates pour transmettre des techniques de programmation, utilisée dans un grand nombre d'universités [2; 3; 6]. L'Université

Paris-Saclay est très engagée depuis 2015 dans l’usage de Jupyter pour l’enseignement avec notamment le déploiement depuis 2017 d’un service hébergé par le mésocentre Cloud@Virtual-Data JupyterHub@Paris-Saclay pour tous les personnels et étudiants. Nous avons profité de cette dynamique pour mettre en place des enseignements sur le traitement des données radar de sol basés sur l’utilisation de feuilles de calcul Jupyter. Nous illustrons ci-dessous les résultats obtenues à l’aide de cette chaîne de traitements par quelques exemples tirés de stages effectués par les étudiant·s-es de troisième année de licence Sciences de la Terre.

EXEMPLES D’APPLICATION

Cuisine hexagonale de l’abbaye de Thiron-Gardais (France)

Nous avons utilisé pour la première fois nos codes de traitements et de visualisation lors d’une prospection dans l’abbaye de Thiron-Gardais (Eure-et-Loire) au printemps 2018. Nous y recherchions tout particulièrement les fondations d’une cuisine hexagonale [1]. Les premiers traitements effectués sous REFLEXW ne permettaient pas de visualiser de signal associé à ces fondations. La flexibilité d’utiliser ces propres codes, nous a permis de joindre deux jeux de données acquis perpendiculairement entre eux, pour pouvoir atteindre une résolution spatiale qui a mis en évidence les fondations de la cuisine hexagonale de Thiron-Gardais (Figure 1).

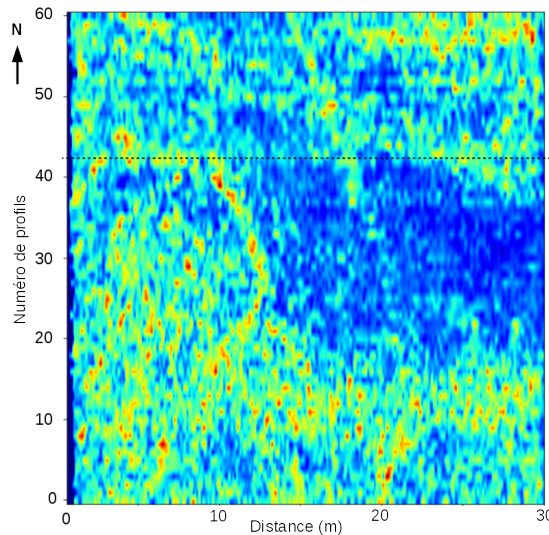


Figure 1: Carte des valeurs absolues des amplitudes reçues sommées sur une tranche de 33 à 43 ns (1,6 et 2,1 m de profondeur) à l’abbaye de Thiron-Gardais (Mala 250 MHz). Les fondations de la cuisine hexagonale y sont visibles. L’échelle de couleurs ”jet” varie de 0 (bleu) à 1 (rouge).

Forum d’Ostia-Antica (Italie)

Une acquisition radar (GSSI 350 MHz) à plus grande échelle, effectuée sur deux printemps (2021 et 2022), a permis d’obtenir des cartes d’amplitudes radar provenant de différentes profondeurs. Celle de la Figure 2, montre une carte de valeur absolue des amplitudes reçues sommées sur une tranche de 20 à 30 ns (correspondant aux profondeurs variant de 1 à 1,5 m). Des fouilles ont été entreprises sur des lieux stratégiques mis en évidence par cette carte. Les fondations mises à jour permettent de valider l’interprétation des données GPR.

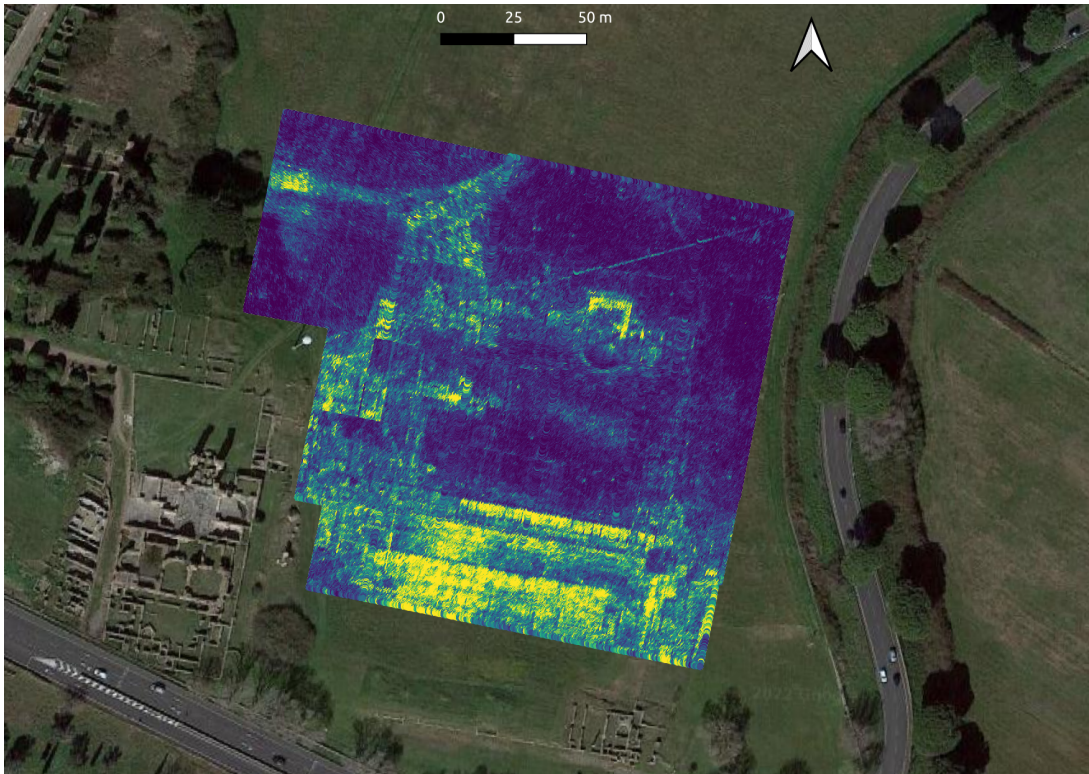


Figure 2: Carte des valeurs absolues des amplitudes reçues sommées sur une tranche de 20 à 30 ns (1 à 1,5 m de profondeur) à Ostia-Antica, Italie (GSSI 350 MHz). L'échelle de couleurs "veridis" varie de 0 (bleu) à 1 (jaune).

Colline Saint-Maxime (Riez, France)

Le dernier exemple, présenté Figure 3 met en évidence les fondations d'une ancienne forteresse autour de la chapelle du XVII^e siècle sur la colline Saint-Maxime sur la commune de Riez (Alpes de Haute Provence). Ces mesures ont été comparées à des cartes de conductivité électrique apparente (mesurée à l'aide d'un CMD MiniEXplorer) et des profils de résistivité électrique.

CONCLUSIONS

Les différents exemples montrent l'efficacité de la chaîne de logiciels développée pour permettre d'obtenir des cartes d'amplitudes radar et mettre en évidence des fondations parfois jusqu'à 2 m de profondeur. L'outil a été à chaque fois pris en main par des étudiants de licence. Il est à compléter par de nombreux autres outils de traitement, déjà testés par ailleurs, comme le filtrage par décomposition en ondelette, ou par décomposition en valeurs singulières. Il est aussi envisagé de le compléter par des traitements de données complémentaires, comme les mesures d'un CMD miniXplorer ou celles d'un magnétomètre à proton. L'utilisation d'un environnement identique sera un atout pour le traitement et l'interprétation conjointe de ces différents types de données.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BONDE, S., MAINES, C., AND SAINTENOY, A. Thiron-gardais - chœur de l'abbaye et ancienne cuisine: Intervention archéologique préalable à une reconstruction du chœur gothique

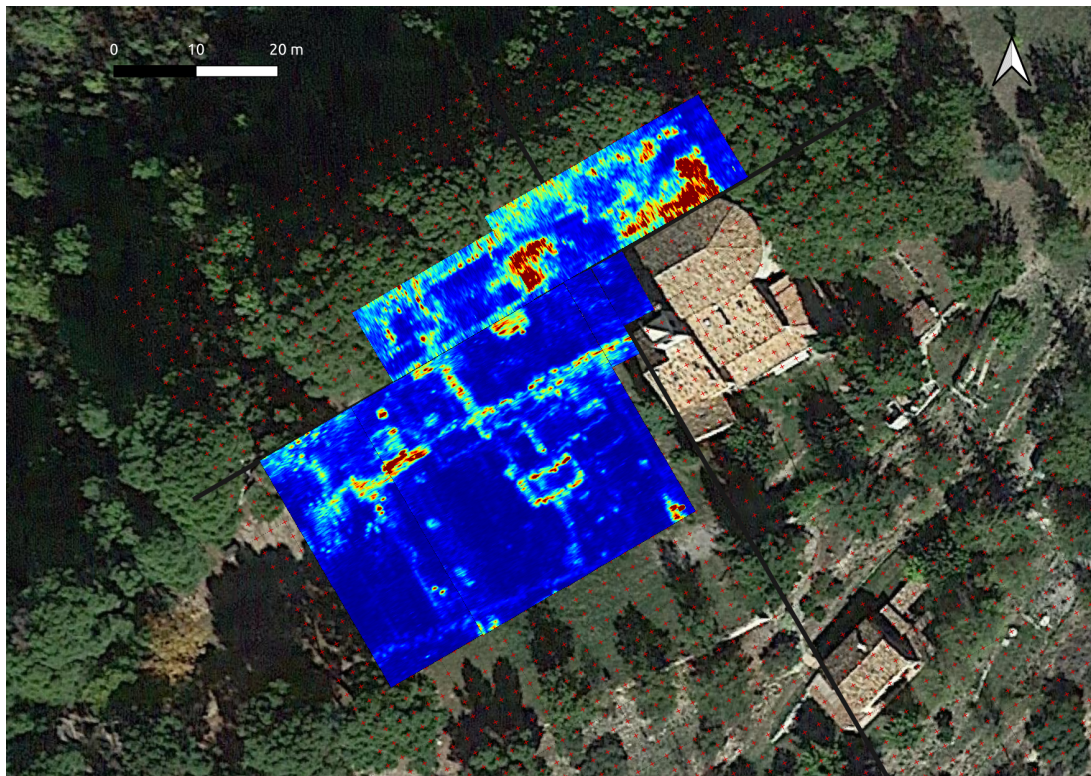


Figure 3: Carte des valeurs absolues des amplitudes reçues sommées sur une tranche de 20 à 30 ns (1 à 1,5 m de profondeur) autour de la chapelle Saint-Maxime (GSSI 350 MHz). L'échelle de couleurs "jet" varie de 0 (bleu) à 1 (rouge).

en 3d et prospection radar situant l'ancienne cuisine hexagonale. *Le collector, bulletin du réseau européen de l'Ordre de Tiron* 7 (2019), 2–5.

- [2] GARFINKEL, A., BENNOUN, S., DEEDS, E., AND VAN VALKENBURGH, B. Teaching dynamics to biology undergraduates: the ucla experience. *Bulletin of Mathematical Biology* 84, 3 (2022), 1–23.
- [3] JOHNSON, J. W. Benefits and pitfalls of jupyter notebooks in the classroom. In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Information Technology Education* (2020), pp. 32–37.
- [4] SANDMEIER, K. J. *ReflexW manual, version 4.5*. www.sandmeier-geo.de, July 2007.
- [5] TRINKS, I. *Advancing large-scale high-resolution near-surface geophysical prospection, Habilitation dissertation*. PhD thesis, Ludwig Boltzmann Institute, 2015.
- [6] WAGEMANN, J., FIERLI, F., MANTOVANI, S., SIEMEN, S., SEEGER, B., AND BENDIX, J. Five guiding principles to make jupyter notebooks fit for earth observation data education. *Remote Sensing* 14, 14 (2022), 3359.

MESURES MAGNETIQUES MULTI-ECHELLES AU SOL ET EN DRONE POUR L'EXPLORATION DE LA PROCHE-SURFACE

GAVAZZI B.¹, BERTRAND L.¹, GOUPIL M.¹

¹ Enerex, Nancy, France, bruno.gavazzi@enerex.fr

RESUME

Enerex développe une approche de mesures magnétiques multi-échelles pour différentes applications concernant l'exploration de la proche-surface. Des dispositifs de mesure au sol et une intégration en drone léger (< 1kg) sont présentés, ainsi que différents types de cas d'étude en archéologie, archéo-sismologie et géotechnique, afin d'illustrer de nouvelles capacités d'investigation.

Mots clés : Magnétisme, fluxgate, archéologie, géotechnique, exploration

ABSTRACT

Enerex is developing a multi-scale magnetic measurement approach for various near-surface exploration applications. Ground-based measurement devices and integration onto light UAVs (< 1kg) are presented, along with different types of case studies in archaeology, archaeoseismology and geotechnics, to illustrate new investigation capabilities.

Key words: Magnetometry, fluxgate, archaeology, geotechnics, exploration

INTRODUCTION

Les mesures magnétiques sont fréquemment utilisées dans le cadre de nombreuses applications comme l'exploration de ressources, les études environnementales, les travaux publics ou l'archéologie (eg. Linford 2006 ; Liu et al., 2012 ; Nabighian et al., 2005). Il existe alors différentes méthodes de mesure en fonction des applications : magnétomètres ou gradiomètres, mesures scalaires ou de composantes. Parmi les différents types de mesure, il a été montré que la mesure à l'aide de fluxgates permet une mesure embarquée légère, que ce soit au sol, sur drone, en ULM ou en avion, (eg Gavazzi et al. 2016 ; 2017 ; 2019 ; 2020 ; Le Maire et al. 2020 ; Mercier de Lépinay et al. 2021). Ces résultats ont permis d'ouvrir de nouvelles échelles de mesure et de nouvelles capacités d'application, notamment à travers l'intégration de la mesure sur des drones de différentes tailles. L'objet de ce travail est de présenter comment sont utilisés les fluxgates au sein d'Enerex pour une approche multi-échelle à travers une solution sol et une solution en drone ultra léger. Pour illustrer cela, trois types de cas d'étude sont présentés.

DISPOSITIFS DE MESURE

Les dispositifs de mesure utilisés s'inscrivent dans la continuité des développements réalisés jusqu'en 2021 à l'Institut Terre et Environnement de Strasbourg (UMR 7063). Les dispositifs au sol utilisent des électroniques centrales développées par Diefi intégrées sur un sac à dos (Fig. 1A), tandis que le système en drone consiste en une intégration d'une électronique Diefi sur un Mavik 2 pro réalisé par Diefi, Coleoptère et Enerex (Fig. 1B).

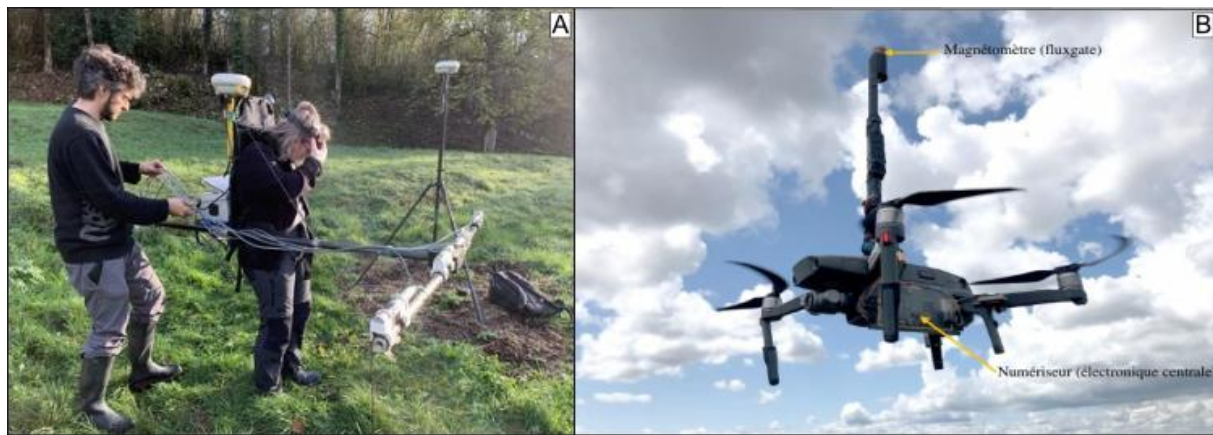


Fig. 1 – A/ Dispositif (multi-voies) de mesures au sol. B/ Dispositif de mesures en drone léger.

CAS D'ETUDE

Archéologie et paléo-environnement (sol)

Le premier type de cas d'étude concerne la détection et la caractérisation de sites archéologiques et de leur environnement proche. Le but est d'illustrer la capacité de détection de signaux d'intensité et de longueur d'onde différents (par exemple bâti et paléochenaux), à l'aide d'une seule méthode de mesure (Fig. 2).

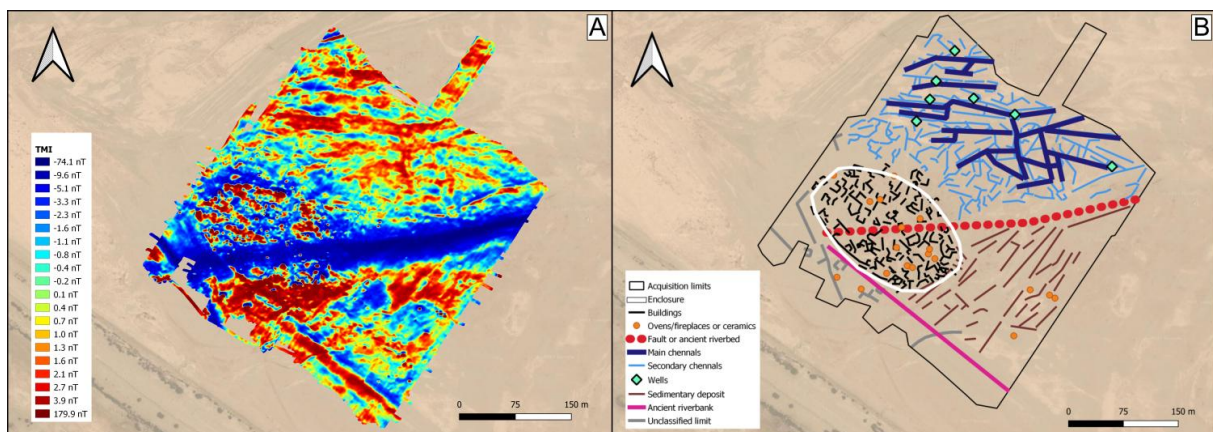


Fig. 2 – A/ Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique. B/ Interprétation à partir de cette dernière et ses transformations. (modifié de Bertrand & Gavazzi 2022)

Hétérogénéités en milieu sédimentaire et archéosismologie (sol + drone)

Le deuxième type de cas d'étude concerne la détection d'hétérogénéités en milieu sédimentaire (Fig.3), souvent considérés comme non détectable dans le milieu de l'exploration de ressource comme la fracturation dans du karst ou des structures liées à des mouvements décrochants.

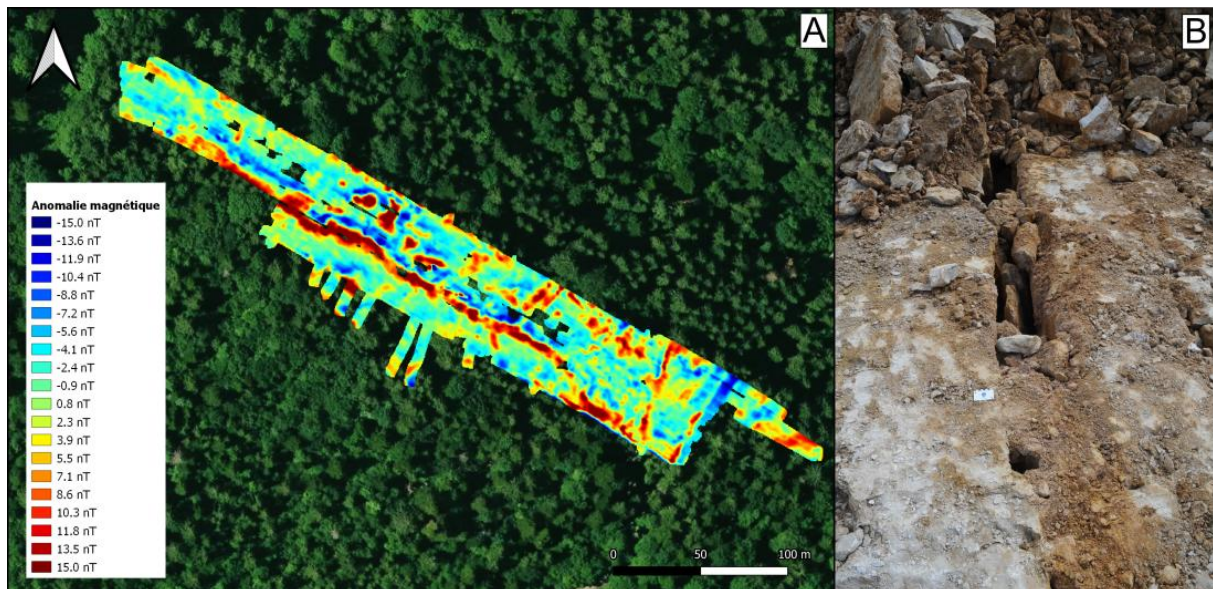


Fig. 3 – A/ Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique (Gavazzi et al., 2022a). **B/** Illustration d'un analogue affleurant des structures enfouies imagées en A (cliché Lionel Bertrand).

Paléo-morphologie et structurale très haute résolution (drone)

Le dernier type de cas d'étude concerne l'évaluation de contraintes de morphologies des contacts lithologiques et des fracturations dans les 20 premiers mètres dans le cadre de l'étude de glissement de terrain (Fig.4).

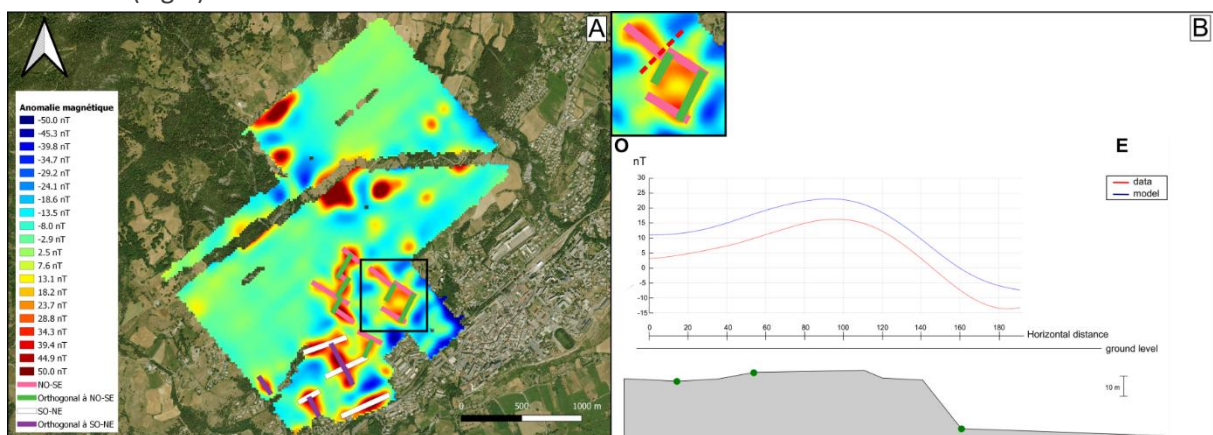


Fig. 4 – A/ Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique et interprétation des principales limites. **B/** Modélisation de la topographie du toit des terres noires sous les moraines à partir des résultats du survey magnétique. (illustrations modifiées de Gavazzi et al., 2022b)

CONCLUSIONS

Les résultats présentés au travers des différents cas d'étude illustrent les nouvelles capacités de détection et d'analyse offertes par les mesures magnétiques entre 0 et 50 m du sol rendues possibles par le développement de solutions en drone. Ces résultats, bien que concluants, ne constituent vraisemblablement qu'une partie des applications possibles qu'il reste à explorer, notamment à travers l'utilisation de méthodes d'interprétation et d'inversion conjointe prenant en compte les différentes échelles d'analyses ainsi que les résultats d'autres méthodes géophysiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERTRAND L., GAVAZZI B., 2022 – Acquisition et interprétation multi-échelles de données magnétiques pour l'exploration du sous-sol. Poster au colloque "Ressources et usages du sous-sol dans la transition énergétique", organisé par IFPEN, CNRS, pôle Avenia, BRGM et ADEME les 27 et 28 septembre 2022 à Paris.

GAVAZZI B., ALKHATIB-ALKONTAR R., MUNSCHY M., ET AL., 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. *Archaeological Prospection*, 24, 59-73.

GAVAZZI B., BERTRAND L., GOUPIL M., GALLUSER F., 2022a – Rapport d'acquisition de données magnétiques au sol et leur interprétation dans le cadre de l'évaluation du sous-sol à Villards . *Rapport d'opération*

GAVAZZI B., BERTRAND L., MUNSCHY M. ET AL., 2020 – On the use of aeromagnetism for geological interpretation: 1. comparison of scalar and vector magnetometers for aeromagnetic surveys and an equivalent source interpolator for combining, gridding and transforming fixed altitude and draping datasets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB018870.

GAVAZZI B., GOUPIL M., BERTRAND L., GALLUSER F., 2022b – Rapport d'acquisition 2022 de données magnétiques en drone à Embrun, fusion avec les données de 2021 et interprétation générale pour l'évaluation du sous-sol . *Rapport d'opération*

GAVAZZI B., LE MAIRE P., MERCIER DE LÉPINAY M., ET AL., 2019 – Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 20, 100117.

GAVAZZI B., LE MAIRE P., MUNSCHY M., DECHAMP A., 2016 – Fluxgate vector magnetometers: a multi-sensor device for ground, UAV and airborne magnetic surveys. . *The Leading Edge*, 35(9), 795-797.

LE MAIRE P., BERTRAND L., MUNSCHY M. ET AL., 2020 – Aerial magnetic mapping with an unmanned aerial vehicle and a fluxgate magnetometer: a new method for rapid mapping and upscaling from the field to regional scale. *Geophysical Prospecting*, 68(7), 2307-2319.

LINFORD N., 2006 – The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Rep Prog Phys*, 69, 2205-2257.

LIU Q., ROBERTS AP., LARRASOANA JC., ET AL., 2012 – Environmental magnetism: principles and applications. *Rev Geophys*, 50(4), 69, RG4002.

MERCIER DE LÉPINAY M., FRÉVILLE T, GAVAZZI B., ET AL., 2021 – A Versatile Solution for High-Quality Uav Fluxgate Magnetic Acquisitions. *First Break*, 39 (8), 57-62.

NABIGHIAN MN., GRAUCH VJS., HANSEN RO., ET AL., 2005 – The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND-61ND.

Comprendre les processus de la zone critique

INFLUENCE DE L'ABATTAGE D'ARBRES SUR LE COMPORTEMENT HYDRIQUE DU MASSIF DE LASCAUX

LARCANCHE M.¹, SIRIEIX C.¹, DOMEQ J.C.², SALMON F.¹, MATEO S.¹, RISS J.¹, PERRIN S.³, VERDET C.¹

¹ Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

² Département de Foresterie, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, UMR 1391 ISPA, F-33882 Villenave-d'Ornon, France

³ Forêt Conseils, 57 avenue Aliénor F-33830 Belin-Beliet, France

Avec le soutien de l'Etat Ministère de la Culture Direction régionale des affaires culturelles de Nouvelle-Aquitaine

RESUME

Le rôle de la végétation est important dans le cadre de l'étude du comportement hydrique d'un milieu karstique non saturé. Le massif environnant la grotte de Lascaux est ici suivi en raison de la conservation de la grotte. Nous présentons dans cet article l'influence de l'abattage des arbres se trouvant au-dessus de la grotte sur la teneur en eau du massif à partir d'un suivi temporel mensuel de tomographie de résistivité électrique réalisé depuis 10 ans. Cette étude met en évidence que la compensation des arbres sur le massif karstique après une gestion sylvicole nécessite au minimum un an et demi.

Mots clés : Tomographie de résistivité électrique 2D, suivi temporel, massif karstique, végétations, teneur en eau

ABSTRACT

Quantifying the role of trees growing on unsaturated karstic environment is important to determine site hydraulic dynamic. The karstic hill hosting the Lascaux cave was studied here because of conservation issue. In this study we analyzed the influence of partial tree harvest on karst water content on a monthly basis using electrical resistivity tomography carried out for consecutive 10 years. This study highlights that it takes 1.5 years for the remaining trees to compensate the felling of trees on the karstic massif following forest practices.

Key words: 2D ERT, time-lapse, karst, vegetation, water content

INTRODUCTION

Le site de la grotte de Lascaux fait l'objet, depuis de nombreuses années, d'études permettant la compréhension de l'environnement autour de la grotte. Depuis les années 2000, des études ont été menées sur plusieurs domaines : géophysiques (Verdet, 2019; Xu, 2015), hydrogéologiques, écophysiologiques et de gestion forestière. Toutes ces études ont permis d'avoir une première approche du comportement hydrique du sol. Il a ainsi été mis en évidence au cours de ces études l'hétérogénéité du massif (Lharti *et al.*, 2023) et une zone d'infiltration préférentielle de l'eau alimentant le SAS1 (Verdet, 2019). Dans un contexte de changement climatique, il est important d'évaluer l'influence de la végétation sur le comportement hydrique du massif. En effet, les arbres puisent l'eau du sol et favorisent l'assèchement du massif ; ils assurent aussi un abaissement du rayonnement et des températures. Cette étude analyse l'influence de l'abattage d'arbres, à l'amont de la grotte, abattage nécessaire afin de limiter l'enracinement pouvant potentiellement endommager les parois et les chablis hivernaux pouvant fissurer la paroi de la grotte. Cette étude est réalisée au moyen de mesures de tomographie de résistivité électrique (TRE) effectuée depuis 2012 à une fréquence sensiblement mensuelle. La séquence d'abattage des arbres la plus importante s'est déroulée en novembre 2016.

MATERIEL ET METHODES

Le site d'étude est localisé dans le sud-ouest de la France, en Dordogne, et concerne l'amont de l'émergence du SAS 1 de la grotte de Lascaux. La carte géologique du massif de Lascaux actualisée (Verdet *et al.*, 2020) présente ce site (Fig. 1). La grotte se développe dans sa partie sommitale dans le calcaire santorien et pour l'essentiel dans le calcaire coniacien. Plusieurs essences d'arbres telles que

les chênes pubescents (*Quercus pubescens*), les pins sylvestres (*Pinus Sylvestris*) ou encore les châtaigniers (*Castanea sativa*) se développent sur ce site. Notre étude porte sur deux problématiques : (1) la réaction du massif à la suite d'une série d'abattage de 210 pins sylvestres (10-15% des arbres présents sur tout le massif), et (2) la durée de réaction de la forêt (temps que mettent les arbres restant à compenser les arbres abattus) et donc du massif rocheux après abattage.

Tomographie de résistivité électrique (TRE)

Les campagnes de mesures de TRE réalisées depuis 2012 sont composées 4 profils 2D sur deux lignes de mesures (Fig. 1). Les profils Nord et Sud 50 sont composés de 72 électrodes avec un espacement de 0,5 m et les profils Nord et Sud 100 sont composés de 72 électrodes avec un espacement de 1 m. Trois dispositifs de mesures sont utilisés : gradient, pole-dipôle direct et inverse. Les deux lignes de mesures sont espacées de 5 m.

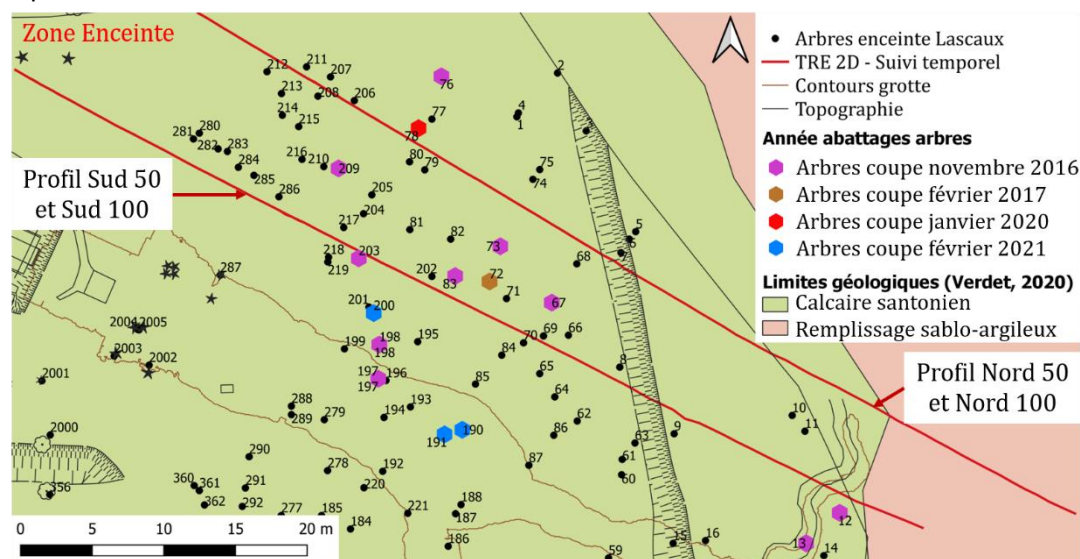


Fig. 1 – Carte de la zone d'étude avec implantation des profils TRE, arbres sains et arbres coupés au cours du temps

Les inversions sont réalisées avec Res2DInv® v. 4.05.38, norme L1 (mieux adaptée à l'hétérogénéité du karst) et le maillage est raffiné pour atteindre $\frac{1}{2}$ espacement inter-électrodes. Les mesures étant réalisées en suivi temporel, il est nécessaire de s'affranchir de l'influence de la température sur la résistivité électrique. Pour cela, les mesures sont corrigées de l'effet de la température à l'aide de la formule du modèle ratio (Xu, 2015). Afin d'être précis concernant les blocs de résistivité situés à une faible profondeur, il est nécessaire d'utiliser un modèle thermique prenant en compte les différents transferts thermiques s'opérant dans le sol et le massif rocheux (Salmon *et al.*, 2023).

Séquence abattage arbres

Depuis 2012, des arbres (essentiellement des pins) ont été abattus au droit de la zone de mesure géophysique : 10 en novembre 2016, 1 en février 2017, 1 en janvier 2020 et 3 en février 2021 répertoriés sur la Fig. 1. Au total avant les abattages, cette zone comprenait 75 arbres environ en majorité des chênes pubescents.

A proximité du profil Nord 50, trois arbres ont été abattus à cette période. Sur les profils Sud 50 et Sud 100, sept arbres ont été abattus. Dans cet article, seul le profil Nord 50 est présenté (Fig. 2), donc seul l'effet des trois arbres abattus en novembre 2016 proches de ce profil est étudié.

Analyse statistique

Afin de comprendre l'impact de l'abattage d'arbres sur le massif, la résistivité électrique des profils a été examinée uniquement dans les zones où les arbres ont été abattus (rectangles rouges sur la Fig. 2). Les zones sous les arbres font 1,2 m de profondeur sur 6 m de long pour la zone 1, et sur 4 m de long pour la zone 2. Les 1,2 m de profondeur ont été définis suite à des mesures diurnes de la résistivité électrique. Pour chacune de ces zones, la résistivité médiane a été calculée depuis 2012. La

zone 1 est localisée au-dessus d'une partie du massif assez résistive alors que la zone 2 est au droit d'une zone très conductrice, bien qu'elle se trouve dans le calcaire, zone pouvant drainer préférentiellement l'eau (Xu *et al.*, 2015). La zone 1 comporte deux arbres dominés abattus et la zone 2 comporte un arbre dominant abattu.

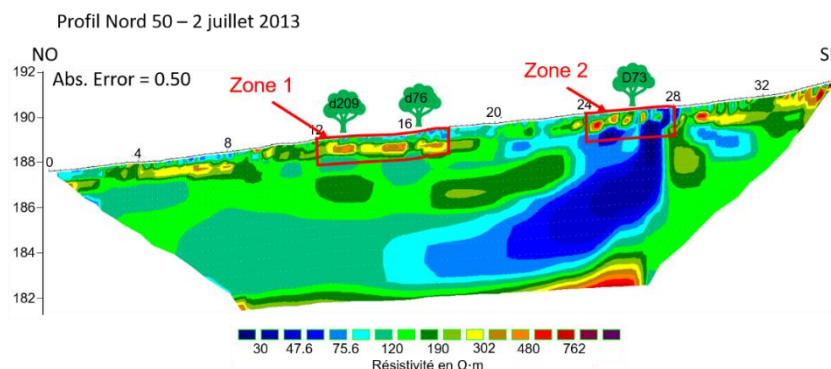


Fig. 2 – Localisation des zones sous les arbres abattus pour le profil étudié

RESULTATS ET DISCUSSION

La Fig. 3 présente les variations de la résistivité médiane pour la zone 1 et la zone 2 ainsi que pour l'ensemble du profil et la pluie brute cumulée par tranche de plusieurs mois (1^{er} novembre au 31 mars et 1^{er} avril au 31 octobre) de novembre 2013 à octobre 2022. Globalement sur l'ensemble du profil (Fig. 3(A)) et sur les deux zones étudiées (Fig. 3(C et D)), il y a des variations cycliques annuelles de résistivité. Par ailleurs nous observons une plus faible résistivité à l'été 2021 à la suite de pluies très importantes (Fig. 3 (B)) en été 2021.

La résistivité de la zone 1 varie annuellement entre environ 125 et 320 $\Omega \cdot m$, tandis que celle de la zone 2 varie entre environ 75 et 220 $\Omega \cdot m$. En été 2017, soit 8 mois après l'abattage des arbres en novembre 2016, on observe une baisse des résistivités médianes mesurées durant les mois de juillet à novembre 2017 par rapport aux années précédentes (représentée par le cercle bleu sur la Fig. 3). La résistivité maximale atteint seulement 250 $\Omega \cdot m$ pour la zone 1 et 150 $\Omega \cdot m$ pour la zone 2, ce qui correspond à une saturation en été 2017 supérieure à 1,2 fois la saturation des autres années alors que les précipitations ne sont pas plus abondantes que les années précédentes. Cela montre bien que le sol est plus saturé en eau en été 2017 que pour les autres années. Les valeurs minimales de résistivité ne semblent pas être affectées par l'abattage et restent presque constantes au cours de ces 10 années, ce qui témoigne probablement d'un seuil de degré de saturation pouvant correspondre au seuil de percolation.

Sur le plan écophysiologique, à la fin du printemps et en été, les arbres absorbent de grandes quantités d'eau et de nutriments du sol. Lorsque des arbres sont abattus, ils ne transpirent plus et le prélèvement d'eau dans le sol est moindre entraînant une augmentation de la teneur en eau du sol, ce qui se traduit 8 mois après l'abattage par une résistivité médiane plus faible par rapport à l'année précédente. Les effets de l'abattage semblent disparaître ou être moins prononcés environ un an et demi après l'abattage de novembre 2016. Les autres profils situés en amont de la grotte montrent exactement la même distribution des résistivités au droit des arbres abattus.

Les résultats de l'étude indiquent que les arbres restants ont réagi à l'abattage de leurs congénères avec un délai d'environ un an et demi (pour un abattage en novembre). Pendant cette période, la canopée et les racines des arbres restants se développent pour occuper l'espace laissé libre par les arbres abattus, conformément aux attentes après une éclaircie forestière. Des études antérieures ont également montré que la dynamique foliaire des peuplements d'épicéas pouvait connaître une réponse significative environ trois ans après un abattage d'environ 40% du peuplement (Omari *et al.*, 2016).

Dans le cas spécifique de l'étude menée sur le massif de Lascaux, où 193 pins ont été abattus, il a été observé une diminution de 6,2 m³ du volume d'eau utilisé par les arbres entre avril et octobre après

l'abattage des pins au-dessus de la grotte au cours du temps. Cette diminution a été mesurée à l'aide de mesures de flux de sève sur le site et indique que la teneur en eau du massif a augmenté suite à la gestion sylvicole. Ces résultats suggèrent que l'abattage d'arbres peut avoir un impact sur la disponibilité en eau du massif en augmentant la quantité de celle-ci.

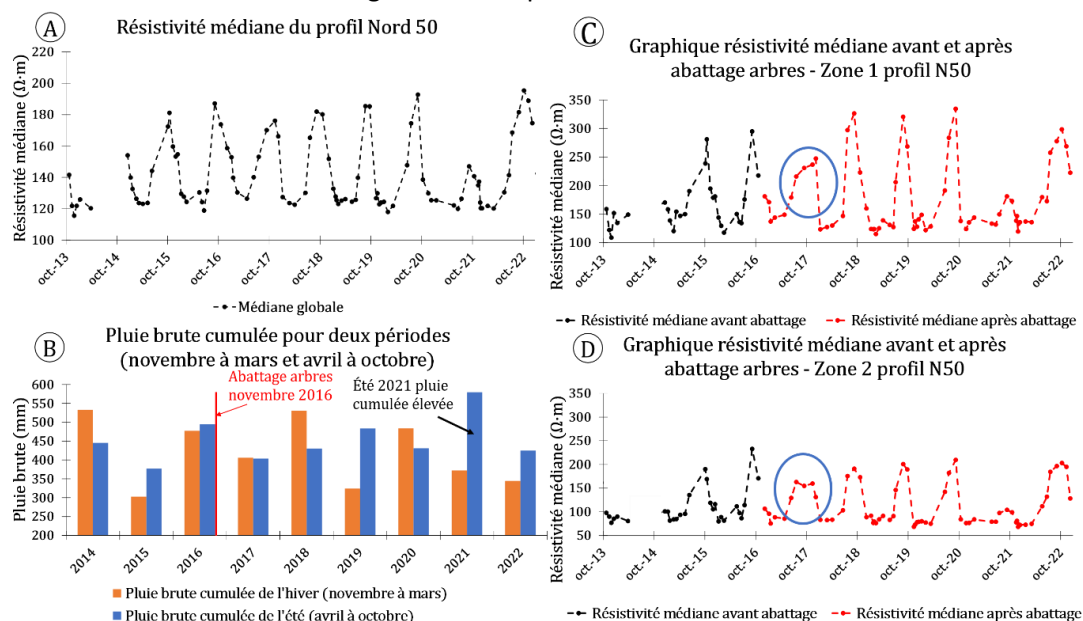


Fig. 3 – Résistivité médiane de tout le profil (A), de la zone 1 (C) et de la zone 2 (D) du profil Nord 50. Et (B) pluie brute cumulée en été et en hiver

CONCLUSIONS

L'étude de l'influence de l'abattage de 10 à 15% des arbres sur le milieu karstique a révélé une augmentation de la teneur en eau du sol pendant l'été, évaluée à partir de mesures de TRE effectuées après la période d'abattage (en novembre 2016 dans ce cas). Les autres arbres présents dans la zone ont compensé en grande partie cet effet environ un an et demi après l'abattage. Ces observations ont été réalisées pour chacun des profils étudiés après l'abattage. Il est important de noter que ces mesures ont été effectuées pendant une période de forte élévation de la température dans le sud-ouest de la France, ce qui peut avoir influencé les résultats. Par conséquent, il est possible que l'effet de compensation des autres arbres prenne en réalité plus de temps que ce qui a été montré ici.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- LHARTI H., SIRIEIX C., RISS J., VERDET C., SALMON F., LACANETTE D., 2023** - Partitioning a rock mass based on electrical resistivity data: the choice of clustering method. *Geophysical Journal International* 234, 439–452.
- OMARI K., MACLEAN D.A., LAVIGNE M.B., KERSHAW J.A., ADAMS G.W., 2016** - Effect of local stand structure on leaf area, growth, and growth efficiency following thinning of white spruce. *Forest Ecology and Management* 368, 55–62.
- SALMON F., LACANETTE D., LHARTI H., SIRIEIX C., 2023** - Heat transfer in rock masses: Application to the Lascaux Cave (France). *International Journal of Heat and Mass Transfer* 207, 124029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124029>
- VERDET C., 2019** - Caractérisation multi-échelle du milieu karstique non saturé.
- VERDET, C., SIRIEIX, C., MARACHE, A., RISS, J., PORTAIS, J.-C., 2020** - Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave hill. *Geomorphology* 360, 107177.
- XU S., 2015** - Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux par couplage de méthodes géophysique, statistique et géostatistique.
- XU S., SIRIEIX C., FERRIER C., LACANETTE-PUYO D., RISS J., MALAURENT P., 2015** - A Geophysical Tool for the Conservation of a Decorated Cave - a Case Study for the Lascaux Cave: Conservation of Lascaux Cave using ERT Survey. *Archaeol. Prospect.* 22, 283–292.

CARACTERISATION GEOPHYSIQUE MULTI-METHODES ET MULTI-ECHELLES DE LA ZNS DES CALCAIRES HETEROGENES DE BEAUCE

RYCKEBUSCH C.^{1,2}, BALTASSAT J.-M.¹, DEPARIS J., KESSOURI P.¹, LEGCHENKO A.³, AMRAOUI N.¹, ABBAS M.², AZAROUAL M.^{1,2}

¹BRGM, 45100 Orléans, France. (c.ryckebusch@brgm.fr)

²Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

³Université Grenoble Alpes, IRD, IGE, Grenoble, France

RESUME

L'enjeu sur la compréhension du cycle d'eau nécessite une connaissance fine de la dynamique dans la zone non saturée (ZNS) et particulièrement la ZNS profonde. L'interprétation jointe des résultats électriques et RMP et des données de forage dans les calcaires hétérogènes altérés de Beauce permet de distinguer une variabilité spatiale à l'échelle décamétrique avec deux zones du milieu aux propriétés lithologiques et hydrogéologiques différentes : un calcaire fracturé karstifié supposant des écoulements rapides et un calcaire fracturé très altéré argileux supposant une barrière sans écoulements.

Mots clés: zone non saturée, RMP, calcaires de Beauce, résistivité électrique, chargeabilité

ABSTRACT

The water cycle issue needs a relevant knowledge of the vadose zone dynamics and particularly of the deep vadose zone. The joint interpretation of SNMR and electrical results with log data in the Beauce heterogeneous weathered limestone allows distinguishing a spatial variability at decametric scale with two areas with variable lithological and hydrogeological properties: a karstified fractured limestone, which assumes fast flows and a highly clayey weathered fractured limestone, which assumes a barrier without flows.

Key words: vadose zone, SNMR, Beauce limestone, electrical resistivity, chargeability

1. INTRODUCTION

La compréhension du cycle de l'eau est un enjeu majeur pour la préservation des nappes. Dans un contexte de dérèglement climatique, la pollution de l'eau notamment par les engrais utilisés pour l'agriculture, amènent à une situation environnementale critique. Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance fine des processus d'écoulements et échanges hydriques entre le sol et la nappe dans la zone non saturée (ZNS). La ZNS très proche surface est bien étudiée avec une instrumentation adaptée de même que les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère sont bien déterminées avec des relevés piézométriques et des tests de pompage. Les méthodes géophysiques de sub-surface permettent de délimiter la géométrie de l'aquifère et ses propriétés physiques, par exemple électriques avec les méthodes ERT et IP. La résonance magnétique protonique (RMP) est une méthode directe de mesure de la teneur en eau et permet d'accéder aux propriétés aquifères en complément de sa géométrie [Legchenko, 2013 ; Binley et al., 2015].

2. CONTEXTE, MATERIELS ET METHODES

Le site d'étude se situe à Villamblain dans la région Centre Val de Loire, l'une des plus cultivée et polluée aux nitrates de France. La géologie complexe du site peut être subdivisée en quatre unités soit de haut en bas : (1) une couche de sol argileux et calcaire très hétérogène et altéré de 0 à 6-8 m, (2) un calcaire altéré, fracturé et karstifié de 6-8 à 25 m, (3) des marnes plus ou moins argileuses de 25 à 30 m, (4) un calcaire fracturé au-delà. De 1966 à 2020, le niveau piézométrique moyen est à -18.40 m. Le site a été choisi pour construire un observatoire de la zone non saturée (<https://plateformes-pivots.eu/o-zns/>).

Cela consiste en un puits instrumenté de 4 m de diamètre et 20 m de profondeur, entouré de 9 forages, dans le but d'étudier la zone non saturée profonde de l'aquifère de Beauce. Des investigations par sondages carottés, diagraphies et géophysique en surface et en forage ont été réalisées avant le creusement du site, pour caractériser le site. Aldana et al., (2021) montre (1) que l'altération des calcaires se traduit par un remplacement de la matrice calcaire par des matériaux argileux et par une oxydation des fractures, (2) une hétérogénéité des propriétés hydrauliques sur les échantillons de roche calcaire. Les campagnes géophysiques menées en 2018 et en 2019 : (1) mettent en évidence une structure du massif calcaire globalement tabulaire correspondant à la succession lithologique décrite par Aldana et al., (2021), (2) identifient localement une lentille argileuse (e.g. Jodry et al., 2018 ; Mallet et al., 2022). En 2020, une troisième campagne d'acquisitions simultanées de données géophysiques multi-méthodes (RMP 3D, ERT/IP 3D, sismique, géoradar, micro-gravimétrie) et de diagraphies en forage (densité, RMN, résistivité électrique) [Figure 1] a été menée par le BRGM et l'ISTO afin (1) de préciser les hétérogénéités spatiales du site en 3D, (2) d'apporter une information supplémentaire avec un modèle de teneur en eau RMP 3D sur l'hydrogéologie du site à l'échelle terrain. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude dont l'objectif est d'interpréter conjointement les réponses RMP et électriques en 3D avec les données de forage pour distinguer les hétérogénéités spatiales en terme de contrastes lithologiques et hydrogéologiques. Les acquisitions 3D ont été réalisées suivant 10 sondages RMP en configuration de boucle carrée de 50 m de côté, et 8 profils électriques de 48 électrodes écartées de 2.5 m en configuration dipôle-dipôle. Les données RMP et électriques sont inversées en 3D respectivement avec les logiciels SAMOVAR et BERT et interprétés conjointement.

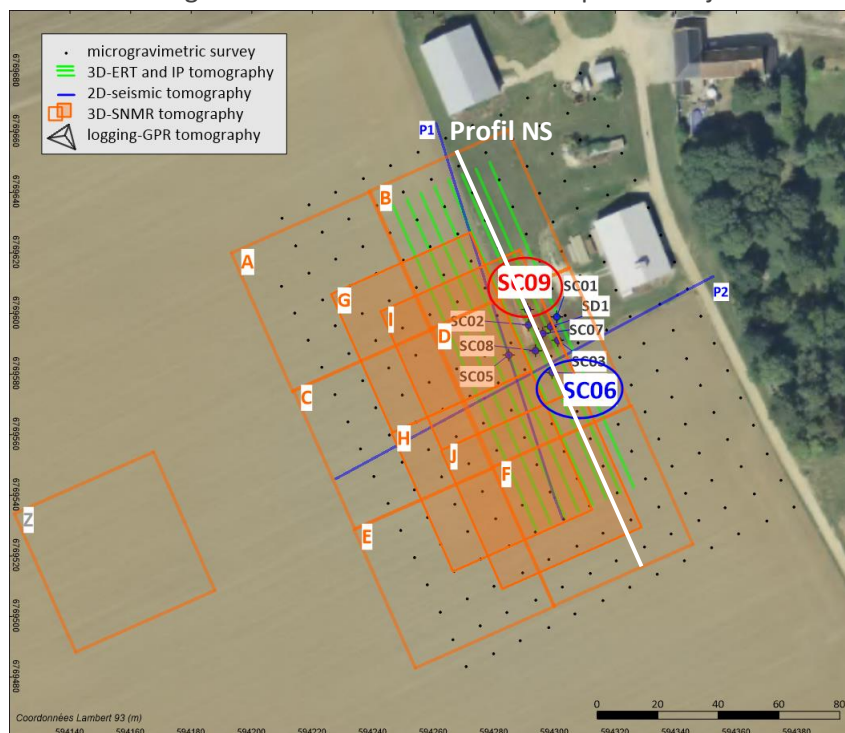


Fig. 1 - Localisation des forages et des données géophysiques multi-méthodes acquises sur le site lors de la campagne de 2020.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'interprétation jointe est faite selon le profil NS [Figure 1] passant à la fois par les modèles 3D de teneur en eau RMP, de résistivité électrique/chargeabilité et 4 forages. Dans l'aquifère, l'interprétation des mesures RMP du profil NS [Figure 2] permet de distinguer deux zones aux réponses de teneur en eau contrastées : la zone 1 avec une forte teneur en eau RMP dans l'aquifère et quelques mètres au-dessus correspondant à une porosité plus élevée due à une fracturation/karstification du calcaire. La zone 2 avec une faible teneur en eau RMP correspondant à une porosité faible, probablement due à une moindre fracturation ou une augmentation de la teneur en argile.

Dans la zone non saturée (0-20 m), la réponse électrique concorde avec celle obtenues dans les études précédentes (e.g. Mallet et al., 2022) et permet de retrouver l'anomalie conductrice et hautement chargeable interprétée comme argileuse. Cependant, à ce stade, les mesures électriques ciblées à la zone non saturée et les mesures RMP donnant une information sur la zone saturée, ne permettent pas de les comparer directement.

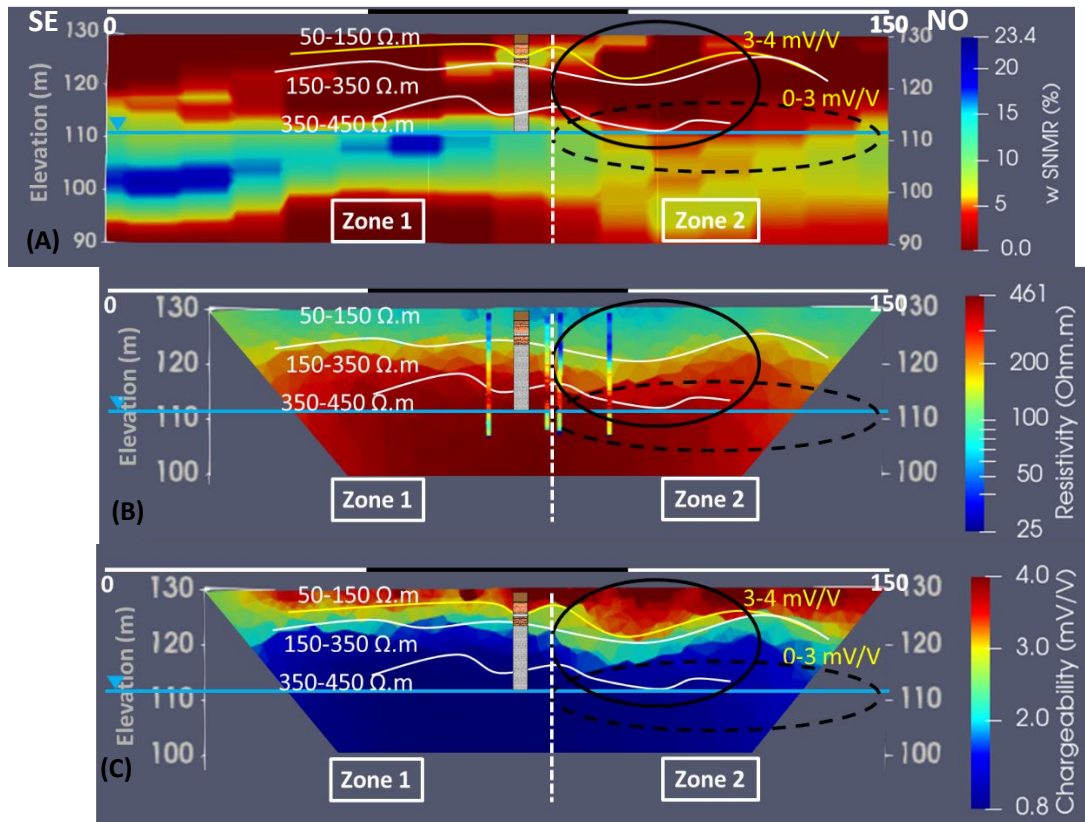


Fig. 2 – Profils NS de (A) teneur en eau RMP, (B) résistivité électrique, (C) chargeabilité, interprétés avec la zone 1 et la zone 2 présentant une anomalie RMP (cercle noir trait pointillé) et une anomalie électrique (cercle noir trait plein).

L'analyse détaillée des données de forage nous permet-elle de préciser ce modèle ? La Figure 3 présente les logs des sondages SC06 et SC09 situés respectivement en zone 1 et 2 [Figure 1] avec la densité et résistivité en forage, la résistivité extraite du modèle 3D et un modèle synthétique des données de forage.

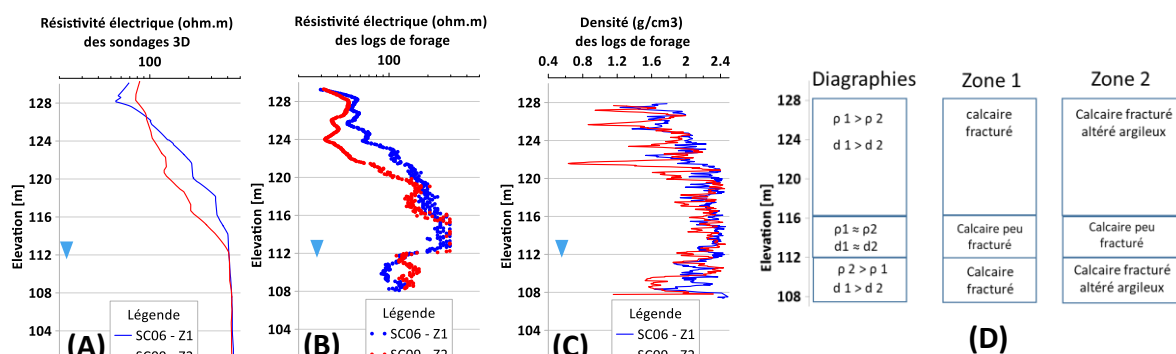


Fig 3 – Logs SC06 (zone 1) et SC09 (zone 2) : de résistivité électrique (A) extrait du modèle 3D, (B) en forage ; (C) densité en forage ; (D) Modèle synthétique des informations issues des forages pour les zones 1 et 2 avec p la résistivité et d la densité.

D'après la Figure 3, le sondage SC06 (zone 1) est plus dense et a une résistivité plus élevée que le sondage SC09 (zone 2) jusque 116 m à l'échelle terrain et forage, ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'un calcaire fracturé peu altéré en zone 1 et un calcaire fracturé, très altéré argileux en zone 2. De 116 m à 112 m, les densités et résistivités de SC06 et SC09 sont équivalentes, l'hypothèse retenue est celle d'un changement de lithologie avec pour les deux sondages un calcaire peu fracturé. De 112 m à 108 m, résistivité et densité de SC09 sont proches de celles observées au-dessus de 116 m, l'hypothèse retenue est celle d'un retour à la lithologie précédente : calcaire fracturé, très altéré argileux. Pour SC06, la densité est équivalente aux précédentes avec une forte baisse de la résistivité. L'hypothèse retenue est que la saturation sous nappe fait baisser significativement la résistivité de ce milieu fracturé, peu altéré. Que cette baisse ne soit pas visible dans le modèle 3D, s'explique par le défaut de résolution en profondeur (effet d'échelle entre les résistivités par diagraphies et en tomographie 3D). En revanche la teneur en eau plus élevée dans la zone 1 saturée est bien sensible dans le modèle 3D de teneur en eau RMP. Ce modèle est discuté sur la base de la loi d'Archie déterminée sur le même site par Abbas et al., (2022) ainsi que par modélisation directe visant à tester la résolution des méthodes géophysiques de surface.

CONCLUSIONS

L'interprétation conjointe des résultats électriques et RMP et des données de forage a mis en évidence la variabilité latérale lithologique et hydrique à l'échelle décamétrique (deux zones distinguées) avec une homogénéité lithologique verticale (nappe et ZNS) pour chaque zone. Des mesures locales en forages (ERT) montrent une bonne correspondance entre des mesures à une grande échelle (ERT) et des mesures locales (logs électriques en forages). Ces réponses peuvent supposer des dynamiques d'écoulement dans la ZNS variables pour les deux zones : des écoulements plus rapides dans la première due à une forte karstification dans l'aquifère et des écoulements plus lents, voire une barrière et une possibilité de nappe perchée dans la seconde due à la présence d'argile dans la ZNS et l'aquifère. L'étude a mis en évidence des effets d'échelles et la complémentarité des données de résistivité électrique et de teneur en eau RMP pour l'interprétation ; elle montre l'intérêt d'acquérir un jeu de données à la fois multi-méthode et multi-échelle pour appréhender la complexité du milieu.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBAS M., DEPARIS J., ISCH A., MALLET C., JODRY C., AZAROUAL M., ABBAR B., BALTASSAT J. M., 2022** - Hydrogeophysical characterization and determination of petrophysical parameters by integrating geophysical and hydrogeological data at the limestone vadose zone of the Beauce aquifer. *Journal of Hydrology*, 615, 128725.
- ALDANA C., ISCH A., BRUAND A., AZAROUAL M., COQUET Y., 2021** - Relationship between hydraulic properties and material features in a heterogeneous vadose zone of a vulnerable limestone aquifer. *Vadose zone journal*, 20 (4), e20127.
- BINLEY A., HUBBARD S.S., HUISMAN J.A., REVIL A., ROBINSON D.A., SINGHA K., SLATER, L.D., 2015** - The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research*, 51 (6), 3837–3866.
- JODRY C., ISCH A., ALDANA C., AZAROUAL M., KLINTZING M., 2018** - Caractérisation géoélectrique de la zone non saturée d'un site d'observation de la nappe de Beauce à Villamblain. *GEOFCAN 2018, Antony (France)*.
- LEGCHENKO A., 2013** - Magnetic Resonance Imaging for Groundwater. *John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118-64947-3*.
- MALLET C., ISCH A., LAURENT G., JODRY C., AZAROUAL M., 2022** - Integrated static and dynamic geophysical and geomechanical data for characterization of transport properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 153, 105050.

GÉOPHYSIQUE PERIGLACIAIRE POUR IDENTIFIER LES COMPARTIMENTS HYDROGÉOLOGIQUES ET LEURS CONNEXIONS

VALOIS R.¹, NAVARRO G.^{2,3}, BUVAT S.⁴, BRESCIANNI E.²

¹ Université d'Avignon, Avignon, France, remi.valois@univ-avignon.fr

² CEAZA, La Serena, Chili.

³ Université La Serena, La Serena, Chili.

⁴ Université Clermont Auvergne Clermont-Ferrand, France.

RESUME

Dans les Andes semi-arides, les enjeux socio-économiques liés à l'eau sont très importants, d'autant plus que ces systèmes sont vulnérables aux changements globaux. Plus spécialement, ces travaux visent à comprendre comment se structurent les réservoirs hydrogéologiques et comment ils fonctionnent ensemble. La géophysique déployée en haute montagne vise ici à caractériser les structures périglaciaires en vue d'améliorer le modèle conceptuel de fonctionnement du cycle de l'eau en tête de bassin versant.

Mots clés : Glacier, géophysique, hydrogéologie, hydrogéophysique

ABSTRACT

In the semi-arid Andes, socio-economic issues related to water are very important, especially since these systems are vulnerable to global changes. More specifically, this work aims to understand how hydrogeological reservoirs are structured and how they work together. The geophysics deployed in the high mountains aims here to characterize the periglacial structures in order to improve the conceptual model of the functioning of the water cycle at the head of the catchment area.

Key words: Glacier, geophysics, hydrogeology, hydrogeophysics

INTRODUCTION

Dans le centre-nord du Chili, les Andes semi-arides (AS) agissent comme un château d'eau (Immerzeel et al., 2020), car la majeure partie de l'eau utilisée par les villes et l'industrie est générée dans la haute cordillère andine. La cryosphère est importante à la fois pour la production et le stockage de l'eau (par exemple Favier et al., 2009), plus de 85 % de la variance du débit étant expliquée par l'accumulation de neige dans les bassins versants des Andes centrales (30°-37°S) (Masiokas et al., 2006). Dans cette région, le système hydrologique devrait subir d'importants changements en raison des taux accélérés de fonte des neiges et des glaces, ainsi que d'une diminution des chutes de neige et par conséquent des périodes de sécheresse plus fréquentes pour la région, dans le cadre d'un modèle reconnu de changement climatique (Garreaud et al., 2017). Les Andes étant la principale source d'eau qui alimente les zones en aval, les conséquences du changement climatique sont préoccupantes pour l'Amérique du Sud en termes de disponibilité des ressources en eau (Valois et al., 2020) ainsi que de conséquences socioéconomiques et sociales plus larges (Immerzeel et al., 2020).

Pour mieux planifier les futures sécheresses et l'extension attendue de la désertification, il est nécessaire de mieux conceptualiser la façon dont le système hydrologique fonctionne et est lié aux conditions climatiques. Une compréhension plus détaillée des processus dans une zone très sensible aux petites perturbations des paramètres climatiques contribuera à réduire les incertitudes lors de la modélisation de la réponse aux futurs scénarios climatiques. Dans les eaux d'amont des bassins versants des AS, il y a eu peu de tentatives pour rassembler les composants du système hydrologique pour comprendre comment ils fonctionnent comme un système complet (Fig. 1). Cependant, une grande partie des recherches existantes ont été menées de manière isolée, en analysant individuellement les composants du système hydrologique, tels que la neige, les glaciers (McPhee et al., 2021), glaciers rocheux (Schaffer et al., 2019), eaux souterraines (Valois et al., 2020), zones humides (Valois et al., 2021) ou écoulement fluvial (Favier et al., 2019), plutôt que de manière intégrée. Cela a conduit à une conceptualisation fragmentée du système.

L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment se structurent les compartiments hydrogéologiques et comment ils se connectent. La reconnaissance des différents composants et processus dominants qui régissent la production et l'acheminement de l'eau dans les bassins de haute montagne est une étape cruciale pour évaluer les impacts actuels et futurs probables du changement climatique sur le système hydrologique.

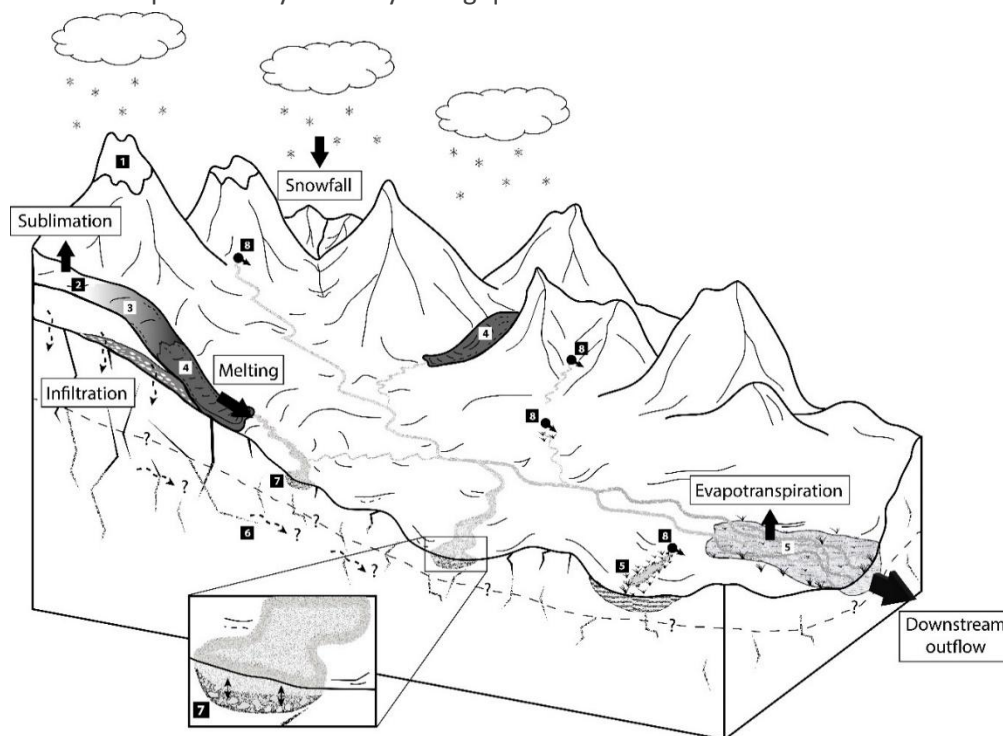


Figure 1: Schéma conceptuel (Navarro et al., 2022). 1 : neige ; 2 : glacier sans débris ; 3 : glacier couvert de débris ; 4 : reliefs du pergélisol (c.-à-d. glaciers rocheux) ; 5 : zone humide d'altitude ; 6 : circulation souterraine profonde ; 7 : eaux souterraines peu profondes ; 8 : source.

CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE & METHODES

En altitude, les précipitations hivernales sont plus importantes et permettent le stockage de la neige qui fondra complètement au printemps suivant et les saisons estivales (Favier et al. 2009), et qui contrôlent le volume du débit dans les principaux fleuves. Plus de 85% des précipitations tombent entre juin et septembre, ce qui génère une légère augmentation du ruissellement à la même période en aval. Des augmentations marquées du ruissellement sont observées pendant la saison de fonte

des neiges de septembre à décembre. Le ruissellement atteint son maximum à la fin ou juste un mois après la fin de la saison de fonte des neiges. Mis à part la fonte des neiges et des précipitations directes, les débits pérennes sont maintenus principalement par glaciers blancs et rocheux situés dans des zones de haute altitude à proximité la frontière argentine (Favier et al. 2009, Valois et al. 2019), ainsi que des aquifères dans le remplissage sédimentaire de ces vallées. La variabilité interannuelle des précipitations observée dans cette région peut être expliquée en partie par ENSO.

En ce qui concerne la configuration géologique, la zone est composée de vallées étroites entourées principalement de roches intrusives, volcaniques et roches volcano-sédimentaires (Fig. 2). Les forages surveillés utilisés dans cette étude ont été forés dans les comblements d'alluvions de la vallée sol.

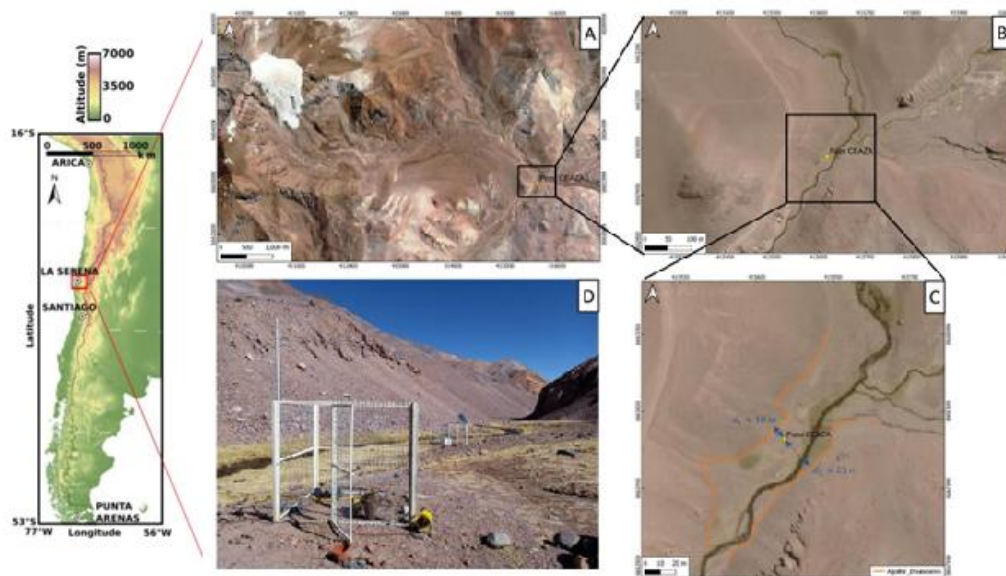


Figure 2 –Localisation et photos de la zone d'étude.

Les techniques de tomographies de résistivité électriques, de sondages électro-magnétiques ont été déployées conjointement avec des techniques hydrogéologiques (hydrochimie, essais de pompage) pour caractériser les différents compartiments hydrogéologiques et tenter de comprendre comment ils se connectent entre eux.

CONCLUSIONS

Les connexions entre compartiments hydrogéologiques doivent être approfondies pour améliorer la conceptualisation du modèle et comprendre sa pertinence non seulement pour la biodiversité locale mais aussi pour la population qui dépend de l'eau de montagne.

Une meilleure compréhension du système permettra de développer des modèles hydrologiques plus appropriés et donc de projeter des scénarios futurs, en reconnaissant les points de basculement en fonction, par exemple, des changements attendus des conditions climatiques, comme des changements dans la quantité, le moment et le type des précipitations ou des changements de température conditions climatiques et une augmentation conséquente de la dégradation du pergélisol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Favier V, Falvey M, Rabatel A, Praderio E and López D (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32° S). *Water Resources Research*, 45(2).
- Garreaud RD, Alvarez-Garretón C, Barichivich J, Boisier JP, Christie D, Galleguillos M, ... and Zambrano-Bigiarini M (2017) The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307-6327. doi: 10.5194/hess-2017-191
- Immerzeel WW, Lutz AF, Andrade M, Bahl A, Biemans H, Bolch T, ... and Baillie JEM (2020) Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790): 364-369. doi: 10.1038/s41586-019-1822-y
- Masiokas M, Villalba R, Luckman B, Le Quesne C and Aravena J (2006) Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate*, 19(24); 6334–6352. doi: doi.org/10.1175/JCLI3969.1.
- McPhee J, MacDonell S and Cassasa G (2021) Snow Cover and Glaciers. In: Fernández B., Gironás J. (eds) *Water Resources of Chile*. World Water Resources, vol 8. Springer Cham, pp 129–151. doi: 10.1007/978-3-030-56901-3_6.
- Navarro, G., MacDonell, S., & Valois, R. (2023). A conceptual hydrological model of semiarid Andean headwater systems in Chile. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 03091333221147649.
- Schaffer N, MacDonell S, Réveillet M, Yáñez E and Valois R (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, 1-17.
- Valois R, Araya-Vargas J, MacDonell S, Guzmán-Piñones C, Fernandoy F, Yáñez-Carrizo G, ... and Maldonado A (2021) Improving the underground structural characterization and hydrological functioning of an Andean peatland using geoelectrics and water stable isotopes in semi-arid Chile. *Environmental Earth Sciences*, 80(1): 1-14.
- Valois R, MacDonell S, Núñez-Cobo J and Maureira-Cortés H (2020) Groundwater level trends and recharge event characterization using historical observed data in semi-arid Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65(4): 597-609. doi: 10.1080/02626667.2020.1711912

SUIVI PLURIANNUEL PAR TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE D'UNE PARCELLE FORESTIÈRE (FORÊT DE BARBEAU, SEINE-ET-MARNE, FRANCE)

PESSEL M.¹, DELPIERRE N.², BERVEILLER D.³, LAMBERT R.⁴, E. LEGER E.⁵, MORFIN A.⁶, VINCENT G.⁷
COURTIN A.⁸

¹ Université Paris-Saclay, GEOPS, Orsay, France, marc.pessel@universite-paris-saclay.fr

² Université Paris-Saclay, ESE, Gif-sur-Yvette, France, nicolas.delpierre@universite-paris-saclay.fr

³ Université Paris-Saclay, ESE, Gif-sur-Yvette, France, daniel.berveiller@universite-paris-saclay.fr

⁴ Université Paris-Saclay, GEOPS, Orsay, France, remi.lambert@universite-paris-saclay.fr

⁵ Université Paris-Saclay, GEOPS, Orsay, France, emmanuel.leger@universite-paris-saclay.fr

⁶ Université Paris-Saclay, ESE, Gif-sur-Yvette, France, alexandre.morfin@universite-paris-saclay.fr

⁷ Université Paris-Saclay, ESE, Gif-sur-Yvette, France, gaelle.vincent@universite-paris-saclay.fr

⁸ Université Paris-Saclay, GEOPS, Orsay, France, alexandra.courtin@universite-paris-saclay.fr

RESUME

De juin 2021 à mars 2023 six transects de tomographie de résistivité électrique ont été acquis dans une parcelle forestière en forêt de Barbeau (Seine-et-Marne). Durant cette période deux étés différents (humide et sec) ont permis de mettre en évidence des comportements différents de variations de résistivité électrique du sous-sol. On propose un processus « ascenseur hydraulique » pour expliquer ce phénomène.

Mots clés : suivi géophysique, ascenseur hydraulique, événement extrême, ERT

ABSTRACT

From June 2021 to March 2023, 6 electrical resistivity tomography transects were acquired in a forest plot in the Barbeau Forest (Seine-et-Marne). During this period, two different summers (wet and dry) allowed for the observation of distinct variations in subsurface resistivity. We propose a hydraulic lift process to explain this phenomenon.

Key words: geophysical monitoring, hydraulic lift, extreme event, ERT

INTRODUCTION

Dans le contexte du changement climatique, les écosystèmes terrestres sont confrontés à une augmentation de la demande évaporative de l'atmosphère. La façon dont les forêts réagiront aux sécheresses extrêmes dépendra, dans une large mesure, de leur accès à l'eau du sol. La "capacité de rétention d'eau dans le sol" (CRES, en millimètres d'eau) est considérée comme un paramètre-clé pour la croissance et la survie des arbres. Cependant, l'estimation de la CRES reste extrêmement compliquée pour les arbres forestiers, notamment car il est très difficile d'évaluer la profondeur d'extraction d'eau par les arbres en forêt.

Le laboratoire ESE a installé en 2005 une station de recherche lourdement instrumentée au sein de la forêt de Barbeau (Seine-et-Marne). Cette forêt a remarquablement bien résisté aux sécheresses estivales (2009, 2011, 2015, 2018-2020, 2022), avec une fixation nette de carbone maintenue voire accrue lors des années de sécheresse, nous supposons que cette résistance tient à une CRES particulièrement élevée pour cette forêt. Les laboratoires ESE et GEOPS ont mis en place depuis l'été 2021 une caractérisation hydrogéophysique du site de Barbeau par suivi de la résistivité du sous-sol par méthode ERT (*Electrical Resistivity Tomography*). Les premiers résultats, encourageants, confirment d'une part la forte hétérogénéité des sols forestiers ainsi que la faisabilité d'utiliser la résistivité électrique de sols comme proxy de l'accès à l'eau des arbres et donc de rendre compte de la variabilité interindividuelle en termes de fonctionnement et de vulnérabilité au stress hydrique.

SITE D'ÉTUDE

La forêt de Barbeau est située dans le département de la Seine-et-Marne en Île-de-France, elle s'étend sur une superficie de plus de 1200 hectares. Cette forêt est située à 100m d'altitude en bordure du plateau de Brie et domine la Seine (Fig. 1). Cette région a un climat océanique dégradé et homogène typique de l'Île-de-France avec des températures moyennes annuelles d'environ 11 °C et des précipitations annuelles moyennes d'environ 650 millimètres. Selon une coupe géologique perpendiculaire à la Seine (fig. 2), le bois de Barbeau est situé sur un plateau essentiellement constitué des calcaires de Champigny puis par la formation des marnes vertes et des calcaires de Brie, ceux-ci étant probablement en partie érodés. Au-dessus de ces formations calcaires-marneuses, les sables de Fontainebleau peuvent être présents avec des faibles épaisseurs (entre 1 et 5m), puis 1-2 m d'argiles à meulière sur lesquelles repose la couverture limoneuse (fig. 1).

Fig. 1: Principales entités géologiques de la forêt de Barbeau (Thiry, 2010).

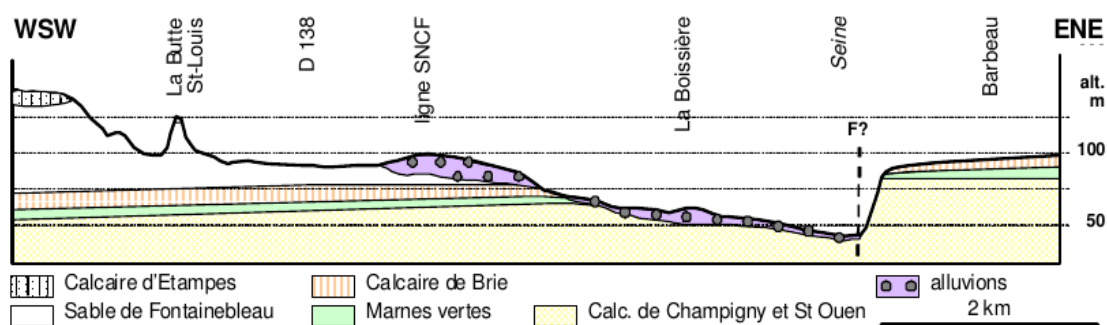
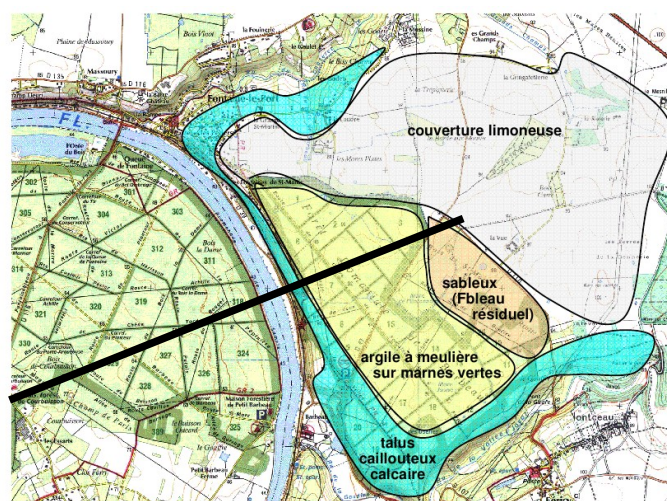


Fig.

2: Coupe géologique perpendiculaire à la seine et au droit de la forêt de Barbeau (Thiry, 2010)

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tomographie de résistivité électrique

Entre Avril 2021 et Mars 2023, six transects de résistivité électrique ont été effectués sur la même ligne d'électrodes, chaque position d'électrodes étant référencée par un piquet, permettant ainsi une erreur de repositionnement minime (inf. à qq centimètres). Les périodes d'acquisition ont été choisies de façon à couvrir les variations saisonnières annuelles, notamment la période estivale d'assèchement et la période hivernale de recharge. Les années 2021 et 2022 présentent des

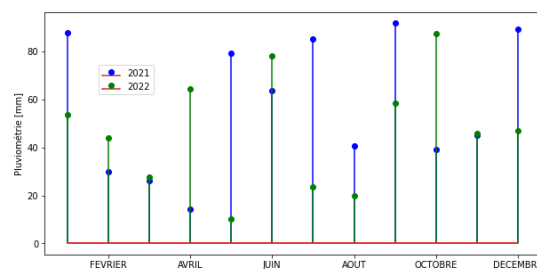


Fig. 3: Pluviométrie cumulée mensuellement pour 2021 et 2022

comportements estivaux très différents, 2021 étant une année humide tandis que 2022 une année sèche (fig. 3).

L'acquisition a été réalisée avec un Syscal PRO de 48 électrodes espacées d'1 m et le protocole d'acquisition choisi est un Wenner-Schlumberger. L'inversion des données de résistivité apparente est réalisé à l'aide de la librairie Python pyBERT/pyGIMli (Rücker et al., 2017).

Pseudo-sections

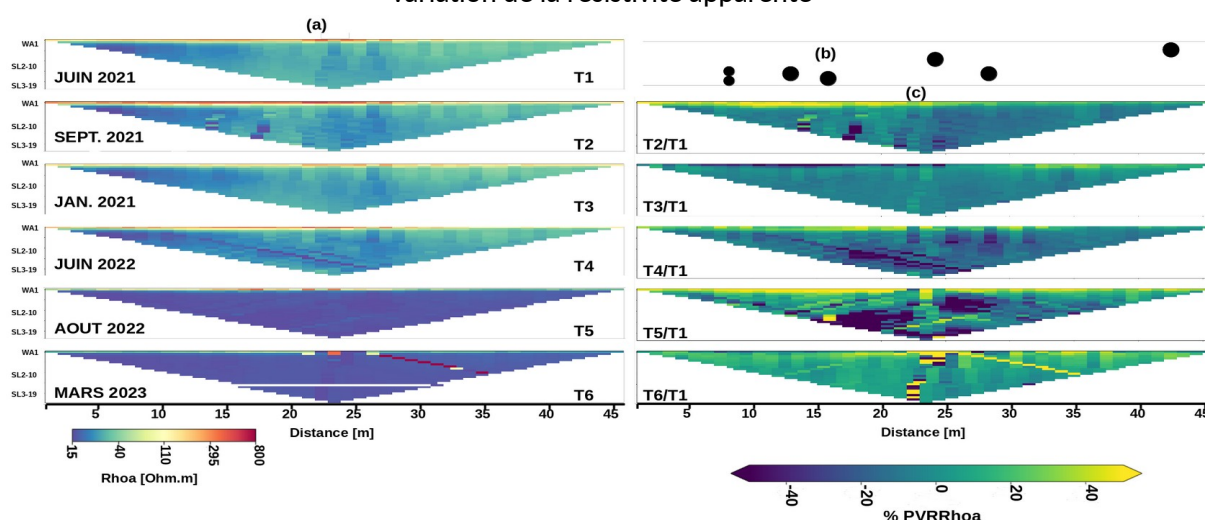
La figure 4 présente les six pseudo-sections obtenues ainsi que les pseudo-sections de pourcentage de variation de résistivité apparente (PVRrhoa). Les grands arbres localisés sur le profil sont également indiqués. Même si l'interprétation en terme de structure du sous-sol ne peut se faire à partir des pseudo-sections de résistivité apparente Zhang et al. (2023) ont très récemment montré que l'utilisation des valeurs de résistivité apparente étaient plus pertinentes pour suivre des traceurs dans la zone hyporhéique. Ainsi il est intéressant dans une première approche d'étudier la variation de la résistivité apparente.

Les différentes périodes d'acquisition permettent de mettre en évidence 5 périodes saisonnières différentes :

- de juin 2021 à Septembre 2021 : période estivale humide 2021
- de septembre 2021 à janvier 2022 : période hivernale 2021/22
- de janvier 2022 à juin 2022 : période printanière 2022
- de juin 2022 à Août 2022 : période estivale sèche 2022
- de août 2022 à mars 2023 : période hivernale 2022/2023

La différence des deux étés 2021 et 2022 est très remarquable, les PVRrhoa T2/T1 et T5/T1

Fig. 4: (a) Pseudo-sections de résistivité apparente (b) localisation des arbres (c) Pourcentage de variation de la résistivité apparente

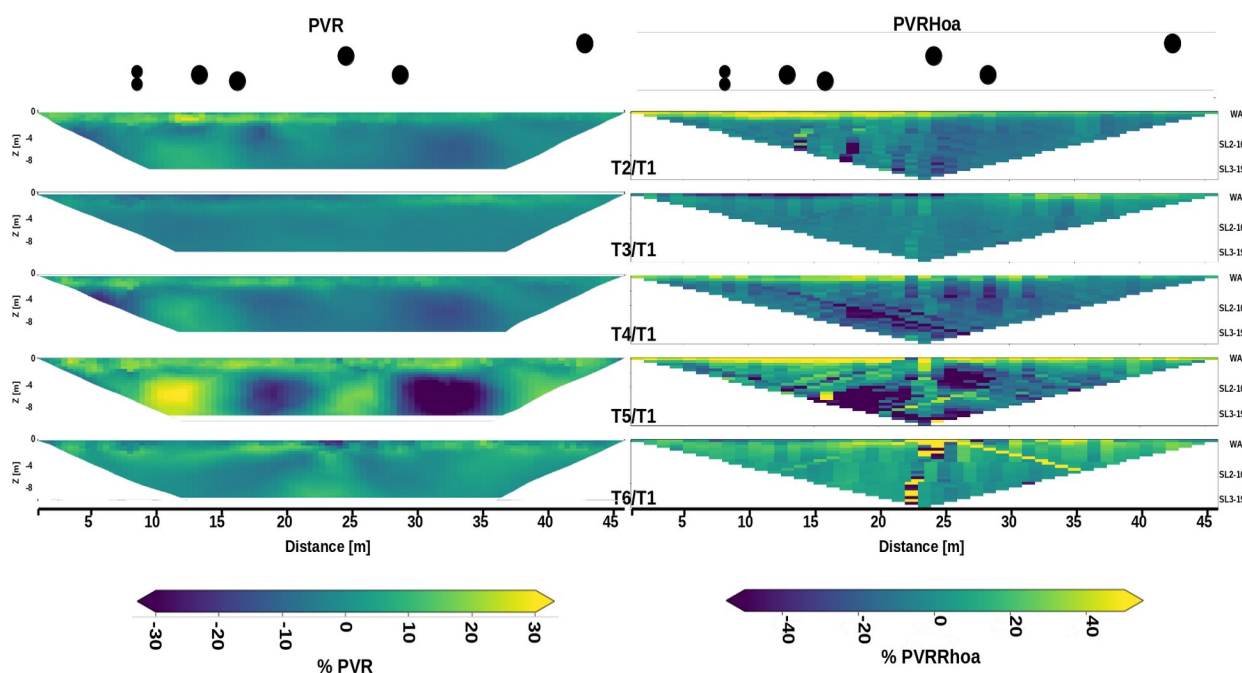


permettent de visualiser les différences de résistivité sur ces 2 périodes. On observe une baisse de la résistivité apparente en profondeur, plutôt localisée à l'aplomb des arbres majeurs du profil. Intuitivement on s'attendrait à une augmentation de la résistivité apparente (perte de teneur en eau). Un effet d'ascenseur hydraulique généré par les arbres, notamment en période sèche en faisant remonter de l'eau des niveaux profonds (Horton and Hart, 1998) pourrait expliquer ce phénomène.

Modèles inverses

Les sections PVR (pourcentage de variation de résistivité) des modèles inverses sont présentés sur la figure 5. La profondeur d'investigation maximale est de 10m. L'effet d'ascenseur hydraulique semble se confirmer, notamment en montrant des zones latérales plus résistantes entourant les zones plus conductrices.

Fig. 5: PVR : Pourcentage de Variation de Résistivité (modèle inverse) - PVRhoa : Pourcentage de Variation de Résistivité Apparente (pseudo-section)



CONCLUSIONS

Ce suivi pluriannuel semble mettre en évidence un effet d'ascenseur hydraulique cependant ce processus demande à être confirmé et notamment s'il n'a lieu que lors d'épisode extrême de sécheresse (été 2022). Pour ce faire un suivi moyen-terme et bi-quotidien a été mis en place sur cette parcelle, ainsi qu'une caractérisation pétro-physique par sismique réfraction et polarisation provoquée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HORTON, J. AND HART, S. (1998). Hydraulic lift : a potentially important ecosysprocess. *Trends in Ecology and Evolution*. 13 (6): 232–235. doi:10.1016/s0169-5347(98)01328-7. pmid 21238277.

THIRY M., 2010 – Le plateau de Brie à Fontaine-Le-port : géologie, géomorphologie, hydrologie et aménagement du territoire. 8. (hal-00647379)

RÜCKER, C., GÜNTHER, T., WAGNER, F.M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics, *Computers and Geosciences*, 109, 106–123, doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011.

ZHANG, XL, SAWYER, AH and SINGHA, K, 2023. A numerical exploration of hyporheic zone solute transport behavior estimated from electrical resistivity inversions, *Volume 621, Article Number 129577*, DOI : 10.1016/j.jhydrol.2023.129577

UTILISATION DE LA GEOPHYSIQUE DE PROCHE-SURFACE POUR ETUDIER LES ECOSYSTEMES FORESTIERS

LOISEAU B.¹, CARRIERE S.D.¹, JOUGNOT D.¹, SINGHA K.², MARY B.³, DELPIERRE N.^{4,5}, GUERIN R.¹, MARTIN-STPAUL N.⁶

¹ UMR METIS, Sorbonne Université, UPMC, CNRS, EPHE, 75005 Paris, France

² Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, USA

³ Geoscience Department, University of Padova, 35100 Padova, Italy

⁴ Université Paris-Saclay, CNRS, AgroParisTech, Ecologie Systématique et Evolution, 91405 Orsay, France

⁵ Institut Universitaire de France (IUF), France

⁶ URFM, INRAE, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84000 Avignon, France

RESUME

L'étude des sols et sous-sols forestiers représente un défi en raison de l'hétérogénéité de ces milieux. Les approches traditionnelles utilisées par les écologues pour caractériser les sols forestiers ont une faible représentativité spatiale et sont souvent intrusives voire destructives. Ce travail de revue illustre comment la géophysique de proche surface peut être utilisée pour obtenir de nouvelles informations de la subsurface de manière non destructive et intégrative. L'article est organisé autour de trois thèmes sur lesquels la géophysique peut contribuer aux études d'écologie forestière: 1) la détection des systèmes racinaires, 2) le suivi des quantités et de la dynamique de l'eau, et 3) la caractérisation de l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sous-sol à l'échelle de la parcelle.

Mots clés : Géophysique, écologie forestière, échohydrologie, zone critique, zone racinaire

ABSTRACT

The study of the forest soils and subsoils is a challenge due to their heterogeneity. The traditional approaches used by ecologists to characterise it have a low spatial representativeness and are often intrusive or even destructive. This review illustrates how near-surface geophysics can be used to obtain new information on the subsurface in a non-destructive and integrative way. The article is organised around three areas in which geophysics can contribute to forest ecology studies: 1) detection of root systems, 2) monitoring of water quantity and dynamics, and 3) characterisation of spatial heterogeneity in subsurface properties at the stand level.

Key words: Geophysics, forest ecology, ecohydrology, critical zone, root zone

INTRODUCTION

Les forêts couvrent près d'un tiers des terres émergées de la planète et jouent un rôle central dans les cycles du carbone et de l'eau. La disponibilité de l'eau dans le sol est l'un des facteurs les plus importants qui régulent la transpiration, la production de biomasse et la répartition des espèces végétales dans les écosystèmes (e.g. Mathys et al., 2014). Les cycles du carbone et de l'eau sont étroitement liés et il est donc essentiel de comprendre le fonctionnement et l'évolution des environnements forestiers ainsi que leur relation avec la structure du sous-sol et la disponibilité de l'eau pour améliorer la compréhension du cycle de l'eau dans le contexte de changement climatique. Une augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses est observée dans de nombreuses régions (e.g. Dai, 2013). Les épisodes de sécheresse affectent fortement la production de biomasse et, par conséquent, la séquestration du carbone dans les forêts.

La subsurface forestière est difficile à caractériser en raison de sa grande hétérogénéité et de sa fraction rocheuse souvent importante. La plupart des méthodes classiquement utilisées pour étudier la subsurface des écosystèmes forestiers sont invasives, destructrices et fournissent une représentation spatiale limitée.

La géophysique de proche surface offre un large éventail de méthodes pour caractériser la subsurface et les processus associés qui se produisent dans la zone critique. L'utilisation des méthodes géophysiques connaît un essor tant de la part des géophysiciens qui cherchent à confronter leurs outils à des milieux plus complexes, que de la part des écologues qui cherchent à mieux caractériser les sols de leurs sites expérimentaux. Nous proposons ainsi un état de l'art de l'intérêt croissant de l'utilisation de la géophysique pour explorer les problématiques relatives à l'écologie forestière.

METHODES

Les différentes méthodes géophysiques qui ont été considérées dans ce travail sont : 1) les méthodes électriques avec la tomographie de résistivité électrique (ERT, Fig. 1E), le potentiel spontané (PS, Fig. 1B), et de façon plus exploratoire la polarisation provoquée et la mise-à-la-masse ; 2) les méthodes électromagnétiques avec le géoradar (GPR, Fig. 1A) et l'induction électromagnétique (EMI, Fig. 1D) ; 3) les méthodes sismiques avec la sismique réfraction ; et 4) les méthodes gravimétriques avec la gravimétrie à supraconducteur (Fig. 1C). La mise en œuvre des principales techniques évoquées sont représentées sur la Fig. 1 avec un exemple de résultat qu'elles permettent d'obtenir (e.g. carte, coupe transversale, série temporelle).

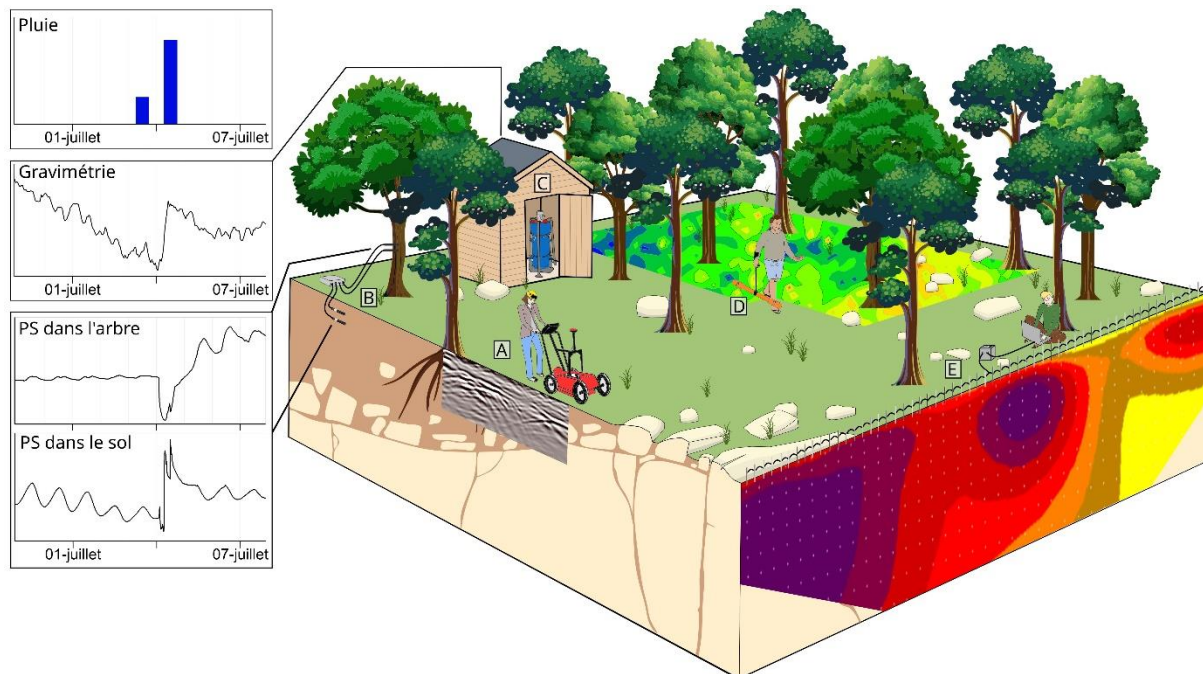


Fig. 1: Mise en œuvre sur le terrain des principales techniques géophysiques abordées. Pour chaque technique, un exemple de résultat est donné : ici, des séries temporelles, des coupes transversales et des cartes. Les méthodes illustrées sont A) le radar à pénétration de sol (GPR), utilisé pour détecter les racines grossières ; B) le potentiel spontané (SP), utilisé pour surveiller l'écoulement de l'eau ; C) la gravimétrie, utilisée pour surveiller les réserves d'eau ; D) l'induction électromagnétique (EMI), utilisée pour caractériser l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sous-sol ; et E) la tomographie de résistivité électrique (ERT), utilisée pour caractériser l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sous-sol et, éventuellement, surveiller la dynamique de l'eau.

APPLICATIONS

Les applications géophysiques ont pu être organisées autour de trois problématiques relatives à l'écologie forestière : 1) la détection des systèmes racinaires, 2) le suivi des quantités et de la dynamique de l'eau, et 3) la caractérisation de l'hétérogénéité spatiale des propriétés de la subsurface à l'échelle de la parcelle.

Détection des systèmes racinaires

Le GPR est la principale technique géophysique utilisée (e.g. Lorenzo et al., 2010). Son utilisation a été validée dans diverses études pour cartographier l'architecture de systèmes racinaires en forêts, estimer leur biomasse ou encore estimer la fréquence et le diamètre des racines (e.g. Day et al., 2013). Des études plus récentes cherchent à comprendre la distribution spatiale des racines en fonction de différents paramètres comme l'âge des arbres, la teneur en eau ou en élément chimique du sol (e.g. Lombardi et al., 2021 ; Zhang et al., 2021). L'ERT est aussi utilisée pour imager la zone racinaire des forêts et détecter indirectement les racines grâce aux variations d'humidité dans le sol (e.g. Zenone et al., 2008).

Suivi des quantités et de la dynamique de l'eau

L'ERT est la technique géophysique la plus utilisée pour évaluer la distribution et les variations spatiale de la teneur en eau dans la subsurface. L'hétérogénéité de la distribution de l'eau dans le sol de différentes forêts a pu être constatée (e.g. Ma et al., 2014) et le rôle de la végétation sur la redistribution des précipitations a pu être observé (e.g., Cardenas et Kanarek, 2014). L'ERT a permis de détecter les mouvements de l'eau dans le sol liés à l'activité des racines des arbres ce qui a notamment permis de déterminer des profondeurs d'absorption (e.g. Jayawickreme et al., 2008) ou les sources d'eau utilisées pour maintenir le flux de transpiration (e.g. Mares et al., 2016). La PS qui est directement sensible aux flux d'eau et la gravimétrie aux variations de masse ont aussi été utilisées pour étudier l'évapotranspiration (e.g. Voytek et al., 2019 ; Carrière et al., 2021a).

Caractérisation de l'hétérogénéité spatiale des propriétés de la subsurface à l'échelle de la parcelle

La capacité des méthodes géophysiques à caractériser l'hétérogénéité spatiale de la subsurface est un atout majeur pour les études d'écologie forestière. Les méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques ont permis d'évaluer la variabilité spatiale de l'humidité, de l'épaisseur et du type de sol ou encore de l'altération de la subsurface. L'impact des conditions édaphiques sur le développement des peuplements forestiers a pu être étudié et des relations en sont ressorties (e.g. Carrière et al., 2021b ; Grellier et al., 2014). Le rôle du sol sur le fonctionnement des forêts a aussi pu être étudié et notamment celui sur la résilience des arbres à la sécheresse (e.g. Carrière et al., 2020). Caractériser les propriétés de la subsurface de façon spatialisée donne ainsi la possibilité d'améliorer notre compréhension des processus liés à l'écohydrologie ou à la dynamique et l'assemblage des communautés végétales.

CONCLUSIONS

Cette revue bibliographique montre comment la géophysique peut contribuer à améliorer notre compréhension des écosystèmes forestiers. Trois thématiques d'application ont été identifiées : 1) la détection des systèmes racinaires, 2) le suivi des quantités et de la dynamique de l'eau et 3) la caractérisation de l'hétérogénéité spatiale des propriétés de la subsurface à l'échelle de la parcelle. La géophysique offre de nouvelles méthodes d'étude de la zone critique qui peuvent casser les frontières entre les communautés scientifiques et fournir une vision plus exhaustive dans l'espace et dans le temps.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CARDENAS M.B., KANAREK M.R., 2014** – Soil moisture variation and dynamics across a wildfire burn boundary in a loblolly pine (*Pinus taeda*) forest. *Journal of Hydrology* 519, 490–502. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.016>
- CARRIÈRE S.D., LOISEAU B., CHAMPOLLION C., OLLIVIER C., MARTIN-STPAUL N.K., LESPARRE N., OLIOSSO A., HINDERER J., JOUGNOT D., 2021A** – First Evidence of Correlation Between Evapotranspiration and Gravity at a Daily Time Scale From Two Vertically Spaced Superconducting Gravimeters. *Geophysical Research Letters* 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL096579>

- CARRIÈRE S.D., MARTIN-STPAUL N.K., DOUSSAN C., COURBET F., DAVI H., SIMIONI G., 2021B** – Electromagnetic Induction Is a Fast and Non-Destructive Approach to Estimate the Influence of Subsurface Heterogeneity on Forest Canopy Structure. *Water* 13, 3218. <https://doi.org/10.3390/w13223218>
- CARRIÈRE S.D., RUFFAULT J., PIMONT F., DOUSSAN C., SIMIONI G., CHALIKAKIS K., LIMOUSIN J.-M., SCOTTI I., COURDIER F., CAKPO C.-B., DAVI H., MARTIN-STPAUL N.K., 2020** – Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: insights from Electrical Resistivity Tomography. *Science of The Total Environment* 698, 134247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134247>
- DAI A., 2011** – Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change* 2, 45–65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- DAY F.P., SCHROEDER R.E., STOVER D.B., BROWN A.L., BUTNOR J.R., DILUSTRO J., HUNGATE B.A., DIJKSTRA P., DUVAL B.D., SEILER T.J., 2013** – The effects of 11 yr of CO₂ enrichment on roots in a Florida scrub-oak ecosystem. *New Phytologist* 200, 778–787. <https://doi.org/10.1111/nph.12246>
- GRELLIER S., FLORSCH N., JANEAU J.-L., PODWOJEWSKI P., CAMERLYNCK C., BAROT S., WARD D., LORENTZ S., 2014** – Soil clay influences Acacia encroachment in a South African grassland: Soil clay drives spatial distribution of Acacia. *Ecohydrol.* 7, 1474–1484. <https://doi.org/10.1002/eco.1472>
- JAYAWICKREME D.H., VAN DAM R.L., HYNDMAN D.W., 2008** – Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions. *Geophys. Res. Lett.* 35, L18404. <https://doi.org/10.1029/2008GL034690>
- LOMBARDI E., FERRIO J.P., RODRÍGUEZ-ROBLES U., RESCO DE DIOS V., VOLTAS J., 2021** – Ground-Penetrating Radar as phenotyping tool for characterizing intraspecific variability in root traits of a widespread conifer. *Plant Soil* 468, 319–336. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05135-0>
- LORENZO H., PÉREZ-GRACIA V., NOVO A., ARMESTO J., 2010** – Forestry applications of ground-penetrating radar. *Forest Syst* 19, 5. <https://doi.org/10.5424/fs/2010191-01163>
- MA, Y., VAN DAM, R.L., JAYAWICKREME, D.H., 2014** – Soil moisture variability in a temperate deciduous forest: insights from electrical resistivity and throughfall data. *Environ Earth Sci* 72, 1367–1381. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3362-y>
- MARES R., BARNARD H.R., MAO D., REVIL A., SINGHA K., 2016** – Examining diel patterns of soil and xylem moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology* 536, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.003>
- MATHYS A., COOPS N.C., WARING R.H., 2014** – Soil water availability effects on the distribution of 20 tree species in western North America. *Forest Ecology and Management* 313, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.005>
- VOYTEK E.B., BARNARD H.R., JOUGNOT D., SINGHA K., 2019** – Transpiration- and precipitation-induced subsurface water flow observed using the self-potential method. *Hydrological Processes* 1784–1801. <https://doi.org/10.1002/hyp.13453>
- ZENONE T., MORELLI G., TEOBALDELLI M., FISCHANGER F., MATTEUCCI M., SORDINI M., ARMANI A., FERRÈ C., CHITI T., SEUFERT G., 2008** – Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations. *Functional Plant Biol.* 35, 1047. <https://doi.org/10.1071/FP08062>
- ZHANG T., SONG L., ZHU J., WANG G., LI M., ZHENG X., ZHANG J., 2021** – Spatial distribution of root systems of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees with different ages in a semi-arid sandy region of Northeast China. *Forest Ecology and Management* 483, 118776. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118776>

DETERMINER LES FLUX D'EAU EN PROCHE SURFACE GRACE AUX CHRONIQUES DE TEMPERATURE A DIFFERENTES PROFONDEURS SUR DEUX SITES D'ETUDES

HARROUET T.¹, LEGER E.¹, SAILHAC P.¹, ZEYEN H.¹, LAMBERT R.¹, MAUGIS P.², RIVIERE A.³

¹ GEOPS, Université Paris Saclay, Orsay, France

² UMR CEA-CNRS, Université Versailles Saint Quentin, IPSL, Saclay, France

³ Mines Paristech, PLS University, Geosciences, Fontainebleau, France

RESUME

Le transfert thermique au sein de la zone non saturée est régi par les processus de diffusion et advection provoqués par le transfert de fluides. En observant les variations temporelles de température à plusieurs profondeurs, une estimation de ces deux processus et aux variations des paramètres thermiques les caractérisant peut être obtenue. Cette étude présente ces estimations de deux manières différentes : (i) par décomposition spectrale des variations de température et, (ii) par modèle thermo-hydrodynamique. Les résultats sur deux sites d'études ayant des contextes et des dynamiques hydriques différents sont présentés.

Mots clés : Thermique, advection, diffusion, UAV, zone humide

ABSTRACT

Heat transfer within the unsaturated zone is governed by diffusion and advection processes caused by fluid transfer. By observing temporal variations in temperature at various depths, it is possible to estimate these two processes and the variations in the thermal parameters characterizing them. This study presents the quantification of fluxes and thermal parameter variations in two different ways: (i) by spectral decomposition of temperature variations and, (ii) by thermo-hydrodynamic modelling. Results from two study sites with different contexts and water dynamics are presented.

Key words: Thermal, advection, diffusion, UAV, wetland

INTRODUCTION

Étudier la dynamique des flux d'eau sur le premier mètre de la zone non saturée permet d'estimer l'infiltration et la reprise évapo-transpiratoire qui sont des membres du bilan hydrique à l'échelle locale. En effet, la variation de la teneur en eau de la zone non saturée est le résultat de nombreuses dynamiques saisonnières impliquant, entre autre, la variation des niveaux des eaux souterraines, l'activité des plantes ainsi que les précipitations. L'activité végétale en est un des principaux facteurs affectant la distribution de la teneur en eau du sol (Bengough, 2012). Le besoin des plantes en eau en période de pousse implique un pompage de l'eau contenue dans le milieu poreux autour de la zone racinaire. À cela s'ajoute l'évaporation du sol nu, et les périodes d'infiltration d'eau lors de pluies.

Ces dynamiques se matérialisent dans la mise en place de flux hydriques au sein du milieu poreux et modifient, en conséquences, les propriétés thermiques de la zone non saturée. Par conséquent, mesurer les variations temporelles de température permet de remonter à la variation de saturation en eau via la variation des paramètres thermiques du milieu poreux du sous-sol (de Vries, 1963 ; Tabbagh & Jolivet, 1974) et potentiellement remonter aux flux d'eau liquide (Tabbagh et al., 2009). Le transfert d'énergie thermique peut avoir lieu soit sous forme d'advection (avec mouvement de masse

d'eau) soit en terme de diffusion (sans mouvement de masse d'eau). L'étude que nous présentons ici s'attache à déterminer la variation temporelle de la part de l'advection versus diffusion sur deux sites ayant des dynamiques d'eau souterraine différente ainsi que des couverts végétaux différents.

Sites d'étude

Deux sites d'études sont investigués thermiquement. Le premier est un champ cultivé en zone péri-urbaine sur le plateau de Saclay en Essonne (Chalhoub et al. 2020). Les premiers mètres de sol se composent essentiellement d'alternance de limon/sable/argile/calcaire. Le deuxième site est une zone humide le long de la rivière Essonne, principalement constituée de matière organique à différents stades de décomposition (tourbe) également en Essonne (Renaud, 2023). Par définition, la zone humide a un toit de nappe beaucoup moins profond que le site agricole. Ces deux sites présentent une variation saisonnière de l'occupation du sol par la végétation. En hiver, le champ est à nu et seulement labouré quant à la végétation de la zone humide, elle est en hibernation (roseaux morts, buissons et arbres sans feuille). A l'arrivée des beaux jours, le blé commence à pousser sur le champ tandis que sur la zone humide, la végétation (roselière) reprend son activité. Ce contraste d'activité de la végétation a une incidence sur la saturation en eau de la zone non saturée.

Instrumentation des sites

Ces deux sites sont instrumentés avec des piézomètres, des capteurs de température répartis sur un profil 1D à différentes profondeurs d'une précision de 0,01°C avec un échantillonnage toutes les 15 min et des stations météo qui permettent d'avoir accès à la micro-météorologie.

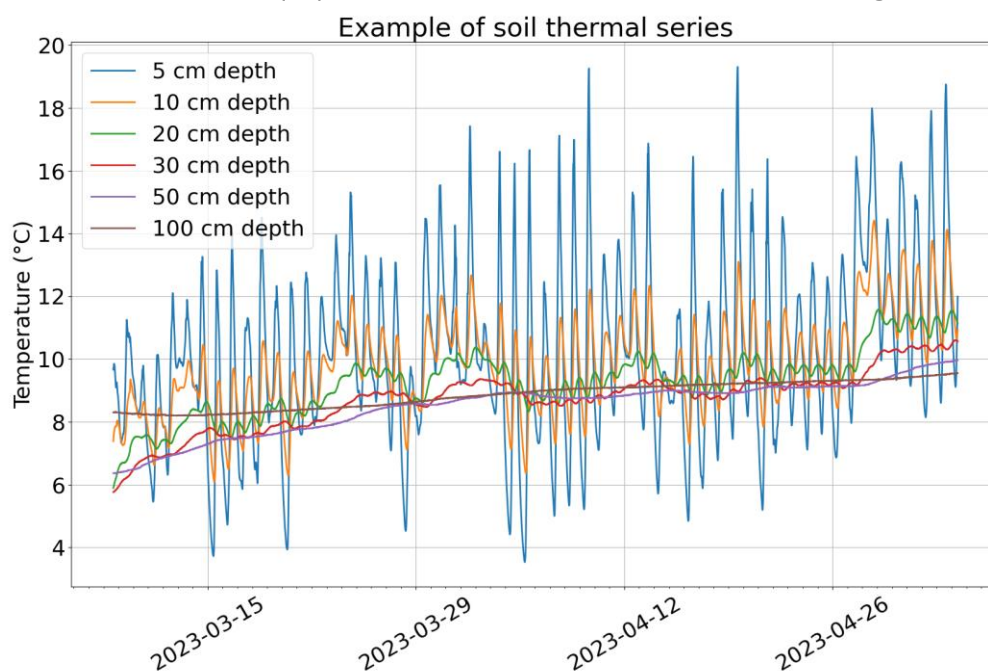


Fig. 1 – Exemple de séries temporelles de mesure de température sur un site

De plus, sur la zone humide, un suivi de la croissance de la végétation est effectué par imagerie drone dans le visible.

Méthode

La variation spatio-temporelle de la température est décrite en 1D pour un milieu homogène par :

$$\frac{\partial T(t, z)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial^2 T(t, z)}{\partial z^2} - v_{eff} \frac{\partial T(t, z)}{\partial z}$$

où T est la température en degrés Celsius, c_p est la capacité thermique volumique, λ la conductivité thermique et v_{eff} une vitesse effective prenant en compte la vitesse de Darcy facteur de la capacité thermique volumique de l'eau sur la capacité thermique du milieu poreux.

Une première méthode d'analyse de données de température se base sur une décomposition spectrale. En supposant une solution de type sinusoïdale avec un terme d'amortisseur/dissipateur et en isolant la partie réelle et imaginaire de la solution dans l'espace de Fourier, il est possible de remonter à l'expression d'une diffusivité et d'une vitesse effective en fonction de la fréquence. Ces deux paramètres sont estimés sur des fenêtres glissantes de 10 jours sur les séries temporelles acquises sur les sites.

Résultats préliminaires

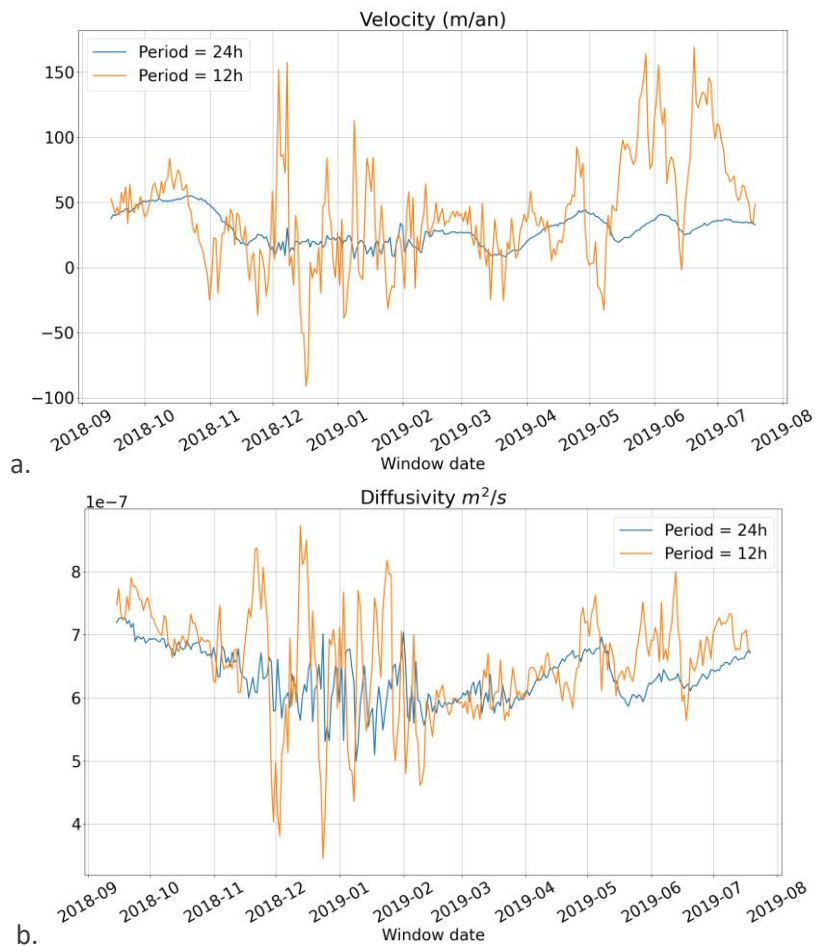


Fig. 2 - Exemple de résultats et de vitesse a. de diffusivité b. pour chacune des fenêtres glissantes pour un site d'étude.

Les valeurs de diffusivités thermiques et d'advections calculées via cette méthode pour la période de 24h restent dans un bon ordre de grandeur, de l'ordre de $1.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ pour la diffusivité thermique et entre 1.10^{-8} et $1.10^{-7} \text{ m}.\text{s}^{-1}$ pour l'advection. On peut alors s'intéresser à la variation temporelle sur

chacune des fenêtres des 10 jours de ces deux grandeurs. On remarque notamment des valeurs positives et négatives pour l'advection, ce qui laisse penser à des directions de flux différentes (évaporation/infiltration). Pour des périodes autres que 24 et 12h, des incertitudes persistent et mènent à des valeurs beaucoup moins réalistes (Béhaegel et al., 2007). Une étude de stabilité de la méthode pourra être approfondie, avec également un travail sur le choix des fenêtres glissantes.

Perspectives

Des travaux sont à l'étude pour coupler les résultats avec un code de résolution de l'équation de diffusion-advection et non une solution approximative. Le code Ginette (Rivière, 2012) calculant le transport de la chaleur dans le sous-sol résolvant les équations de Richards notamment. Ainsi, en ayant une autre méthode d'estimation des flux à partir de chroniques de température, il sera possible de comparer les deux méthodes, voire, de se servir du modèle direct généré par Ginette et de tester la méthode de décomposition spectrale en fréquence (Cas d'une résolution d'un modèle numérique).

Suites aux différents résultats, une corrélation entre les différents suivis (précipitations, phases de pousse de la végétation notamment) sera nécessaire afin d'essayer de comprendre les processus thermo-hydro-dynamiques des différents sites.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BÉHAEGEL, M., SAILHAC, P., & MARQUIS, G., 2007 – On the use of surface and ground temperature data to recover soil water content information. *Journal of Applied Geophysics*, 62(3), 234-243.

BENGOUGH A. G., 2012 – Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology. *Vadose Zone Journal*, 11(2).

CHALHOUB, M., GABRIELLE, B., TOURNEBIZE, J., CHAUMONT, C., MAUGIS, P., GIRARDIN, C., ... & GARNIER, P., 2020 – Direct measurement of selected soil services in a drained agricultural field: Methodology development and case study in Saclay (France). *Ecosystem services*, 42, 101088.

RENAUD A., 2023 – Compréhension du fonctionnement hydrologique et géochimique d'une zone humide riparienne : cas du marais de Jarcy (Essonne, France). *Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay*.

RIVIERE A., 2012 – Influences du pergélisol sur les écoulements souterrains et leurs échanges avec une rivière : étude numérique et expérimentale. *Doctoral dissertation, Paris 6*.

TABBAGH A., JOLIVET A., 1974 – Procédé de mesure in-situ des propriétés thermiques des sols. *Science du sol*, 4, 269-279.

TABBAGH A., GUERIN R., BENDJOUDI H., CHEVIRON B., BECHKIT M.-A., 2009 – Pluri-annual recharge assessment using vertical soil temperature profiles: Example of the Seine river basin (1984-2001). *Comptes Rendus Geoscience*, 341(10-11), 949-956.

PROPRIETES DU REGOLITE A L'OBSERVATOIRE DE LA ZONE CRITIQUE DE BERAMBADI (INDE) PAR COMBINAISON DE TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE (ERT) ET AUDIO-MAGNETO-TELLURIQUE (AMT)

SAILHAC P.¹, HARROUET T.¹, ROBAIN H.², CAMERLYNCK C.³, BAUD. B.⁴, AMELIN J.⁴, RUIZ L.^{5,4}, SEKHAR MUDDU^{6,4}, ANBAZHAGAN P.⁶, RIOTTE J.^{7,4}

¹GEOPS, Université Paris-Saclay, Orsay, France, titouan.harrouet@universite-paris-saclay.fr

²IRD, Sorbonne Université (SU), Université Paris Est Creteil (UPEC), CNRS, INRAE, Institute of Ecology and Environmental Sciences of Paris, iEES-Paris, Paris, France

³METIS, Sorbonne Université (SU), CNRS, Paris, France

⁴IISc, Indo-French Cell for Water Sciences, Interdisciplinary Center for Water Research, Indian Institute of Science, Bangalore, India

⁵SAS, INRAE, Institut Agro, Rennes, France

⁶IISc, Civil Engineering Department, Indian Institute of Science, Bangalore, India

⁷GET, IRD, CNRS, CNES, Université Toulouse III, Toulouse, France

RESUME

Nous avons mené une étude géophysique multi-méthodes du bassin versant de Berambadi (Inde), qui fait partie du Service National d'Observation M-TROPICS (Multiscale TROPICAL CatchmentS). Deux campagnes incluant sismique, électrique, et électromagnétisme ont été répétées à des niveaux piézométriques contrastés (haut en dec. 2019, bas en mai 2022). L'imagerie "time-lapse" avec des modèles issus d'inversions jointes ERT-AMT (tomographie de résistivité électrique et audio-magneto-tellurique) est discutée en termes de contenu en eau et de propriétés du régolite.

Mots clés : tomographie de résistivité électrique, audio-magneto-tellurique, contenu en eau, régolite

ABSTRACT

We carried out a multimethod geophysical survey at the Berambadi catchment aquifer (India) which is part of the National Observation Services M-TROPICS (Multiscale TROPICAL CatchmentS). Two campaigns including seismic, electrical, and electromagnetic methods have been repeated for contrasting piezometric levels (high in Dec. 2019, low in May 2022). We consider time-lapse imaging using electrical resistivity tomography (ERT) and audio-magneto-tellurics (AMT); resulting models from jointly inverted ERT-AMT data are discussed in terms of water content and regolith properties.

Key words: electrical resistivity tomography, audio-magneto-tellurics, water content, regolith

INTRODUCTION

La caractérisation du régolite est une des étapes importantes dans l'étude des aquifères en zones de socle comme en Inde sur le bassin versant expérimental de Berambadi dans un contexte où la production agricole irriguée est fortement influencée par la variabilité spatiale et temporelle des sols et formations superficielles. Une combinaison de méthodes géophysiques a été utilisées pour apporter des contraintes supplémentaires à celles apportées par les méthodes hydrogéologiques et géochimiques (e.g. niveaux piézométriques, tests de pompages en forage, analyses des eaux de surface et de puits, etc.). La résistivité électrique avait déjà été identifiée il y a près de 20 ans comme marqueur du front d'altération : un seuil à

environ 400 Ωm marquant pour ce site la base du régolite (Fleury 2005, Parate et al. 2011, Braun et al. 2019). Les couches plus superficielles altérées étant moins résistantes ($<10\ \Omega\text{m}$), la pénétration des méthodes ERT (tomographie de résistivité électrique) est limitée mais elle est améliorée par combinaison avec des méthodes électromagnétiques de type AMT (audio-magneto-tellurique). Nous considérons des données acquises en divers lieux du site de Berambadi (Fig. 1) et à deux dates aux niveaux piezométriques contrastés (haut en dec. 2019, bas en mai 2022).

Nous présentons la démarche mise en œuvre, par méthode jointe ERT-AMT puis discutons des premiers résultats “time-lapse” en nous focalisant sur les sondages FT et KA (resp. Lakipura Flux Tower et Kannegala proches du centre de la carte sur la Fig. 1).

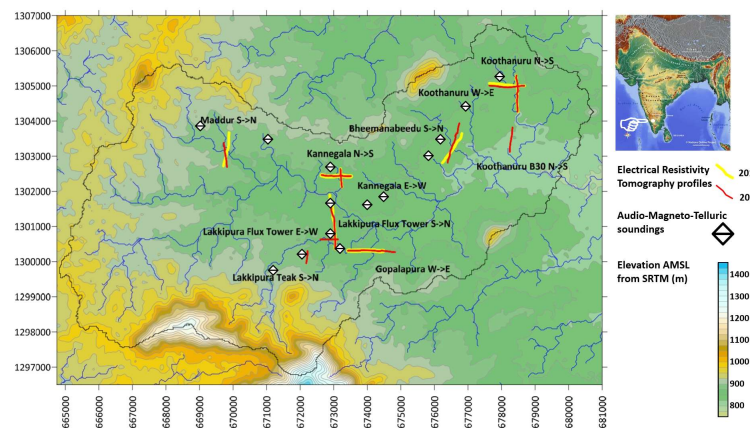


Fig. 1 – Position des deux campagnes de mesures incluant sismique, électrique, et électromagnétisme répétées en dec. 2019 et en mai 2022 sur la partie Berambadi de M-TROPICS CZO (Sud de l’Inde).

METHODES

Imagerie de résistivité électrique par méthodes « ERT » et « AMT »

La méthode géophysique utilisée pour imager le plus proche de la surface est la tomographie de résistivité électrique (ou ERT pour “Electrical Resistivity Tomographie”) réalisée avec un système multi-électrode (Syscal-Pro d’IRIS Instruments). Le protocole d’acquisition de type Wenner-Schlumberger contrôlant l’agencement des positions relatives de dipôles d’injection de courant et de mesures de différences de potentiel a été utilisé sur des séries de 72 électrodes avec un espace inter-électrodes de 5m. Le traitement des données ERT est réalisé par une sélection basée sur un seuil de qualité (répétabilité des données à 2%) puis conduisant à des valeurs de résistivité apparente pour chaque « quadripole de mesure ». L’inversion 2D des données ERT à l’aide du logiciel Res2DInv a fourni des sections de résistivité électrique dont on peut considérer la sensibilité limitée en profondeur à une vingtaine de mètres sur certains sites du Berambadi, en particulier dans les zones de sols noirs dont l’environnement est le plus conducteur.

Pour étendre les profondeurs de pénétration à plusieurs dizaines ou centaines de mètres, nous avons utilisé la méthode audio-magnéto-tellurique (ou AMT) avec un système d’acquisition large bande particulièrement sensible aux hautes fréquences 1-100 kHz (ADU07e de Metronix, avec capteur magnétique 3 composantes SHFT-02). Les acquisitions sont réalisées avec une station « mobile » permettant des mesures de dipôles électriques et magnétiques sur les sites d’intérêt et une station « fixe » avec seulement des mesures magnétiques, utilisée comme site de référence. Le traitement des données AMT est réalisé par une méthode basée sur des statistiques robustes avec le programme Razorback développé par Smaï et Wawrzyniak (2020), permettant d’obtenir des valeurs de résistivité apparente (et phase) en fonction de la fréquence.

Les valeurs de résistivité apparente AMT présentent un biais connu sous le nom de « static shift » (Spitzer 2001 ; Sasaki and Meju 2006). Pour identifier cet effet (figure 2), nous avons utilisé le modèle de résistivité électrique issu des données ERT pour extraire un profil vertical et produire des données AMT synthétiques par modélisation 1D : il apparaît un décalage entre le logarithme des résistivités AMT observées et celles synthétisées sur les données ERT. Ce décalage est presque constant sur une large gamme de fréquences ; il est corrigé par un facteur correctif sur les valeurs de résistivités apparentes AMT avant inversion 1D. On ne considère que la composante ρ_{yx} dont le traitement paraît le plus fiable (voir Fig 2.c et 2.e, respectivement pour les sites FT et KA).

Paramétrage de l'inversion « jointe » de données AMT contrainte par modèle ERT

Les données AMT sont inversées dans une démarche similaire à celle utilisée par Monteiro Santos et al. (2007) et Lajaunie et al. (2023) en utilisant un modèle de référence m_{prior} (modèle 1D a priori) construit sur la base de mesures ERT. L'inversion conduisant au modèle m est basée sur la minimisation d'une fonction objective définie par la formule suivante :

$$\Phi(m; d_{obs}, w_d, m_{prior}, w_m) = \|d_{calc} - d_{obs}\|_w + \lambda_1 \|\nabla m\| + \lambda_2 \|m - m_{prior}\|_w$$

Ici, les données d sont définies par le logarithme des résistivités apparentes corrigées du « static shift ». Le premier terme caractérise le « misfit » entre données observées d_{obs} et données calculées d_{calc} avec une pondération w_d liée aux incertitudes. Les autres termes, associés aux préfacteurs λ_1 et λ_2 , sont des termes de régularisation : un terme de lissage minimisant le gradient vertical du modèle, et un terme d'écart au modèle a priori m_{prior} avec une pondération w_m liée à la confiance à ce modèle. On tend ainsi à limiter l'éloignement du modèle AMT à 10 % de celui issu des données ERT aux faibles profondeurs (<15 m) tout en permettant 100 % aux plus grandes profondeurs non contraintes par l'ERT.

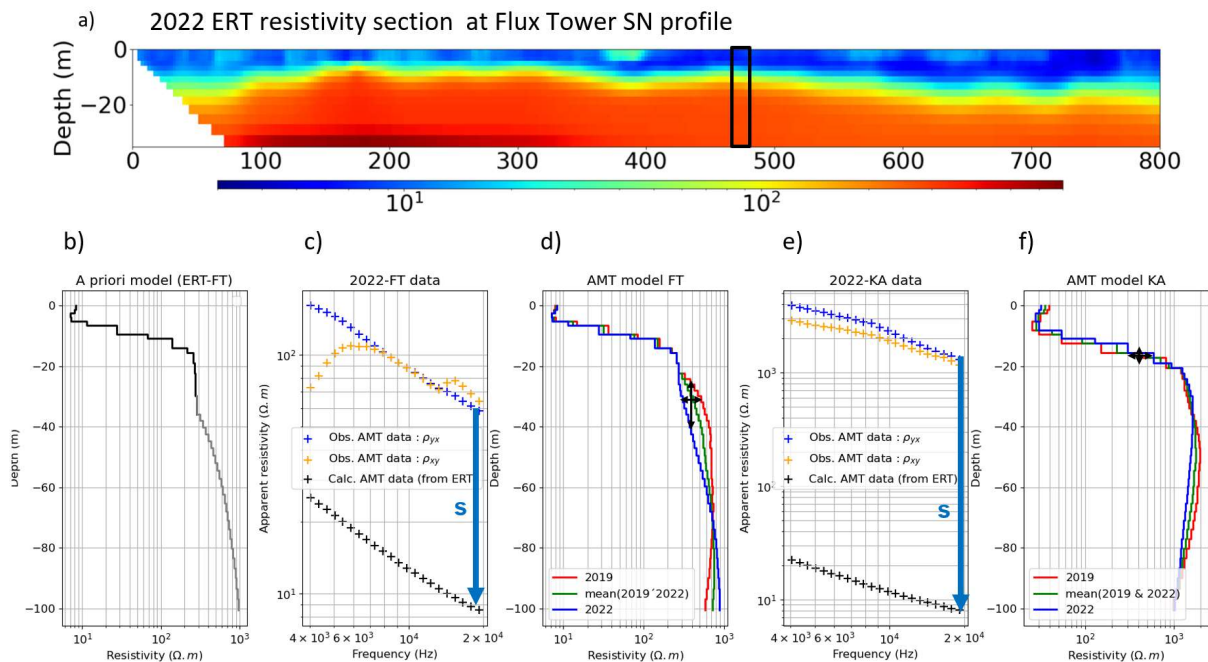


Fig. 2 – Exemple de traitement ERT-AMT : a) section ERT inversée et rectangle noir montrant le positionnement du site AMT de Lakipura Flux Tower (FT), b) profil électrique vertical extrait de la section ERT à proximité du sondage AMT, c) résistivité apparente observées (après traitement par razorbak) et calculées à 1D sur la base du modèle ERT (La flèche rouge indique la correction s à appliquer pour corriger du « static shift »), d) profils électriques inversés avec indication du seuil à 400 Ωm (croix noire), e) et f) cas d'un autre site AMT moins conducteur (KA)

RESULTATS

La profondeur d'investigation de certaines sections de résistivité électrique issues de données ERT ne permet pas d'atteindre la zone à environ 400 Ωm marquant le front d'altération et la base du régolite ; c'est le cas du site FT (Lakipura Flux Tower) dont l'analyse est présentée sur la Figure 2. Le profil vertical de résistivité électrique obtenu par la méthode jointe ERT-AMT permet d'identifier ce seuil de 400 Ωm entre 26 m et 42 m (Figure 2d). Sur d'autres zones dont la très proche surface est moins conductrice comme le site KA (Kannegala), la méthode ERT est suffisante pour identifier cette limite vers 15-16 m ; l'approche jointe ERT-AMT permet d'en préciser la résistivité à plus grande profondeur.

CONCLUSIONS

Les premiers résultats de l'étude en termes de résistivité électrique permettent de préciser les profondeurs du seuil de 400 Ωm associé au front d'altération / base du régolite. Notre travail continue en abordant d'une part l'incertitude et les équivalences entre modèles, mais aussi la comparaison avec les saisons : on s'attendrait à associer les périodes de haut niveau piezométrique avec des faibles résistivités mais on observe l'inverse sur le site FT avec un seuil de 400 Ωm moins profond en période humide (26 m en 2019) qu'en période plus sèche (42 m en 2022). Un travail complémentaire est en cours sur l'inversion jointe avec aussi des données de sismique réfraction qui permettront entre autres, avant une modélisation hydrogéologique, de préciser les propriétés physiques du régolite et le seuil de 400 Ωm utilisé pour en définir la base.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRAUN J.-J., DESCLOITRES M., RIOTTE J., FLEURY S., BARBIÉRO L., BOEGLIN J.-L., VIOLETTE A., LACARCE E., RUIZ L., SEKHAR M., MOHAN KUMAR M.S., SUBRAMANIAN S., DUPRÉ B., 2009** – Regolith mass balance inferred from combined mineralogical, geochemical and geophysical studies: Mule Hole gneissic watershed, South India. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(4), 935-961.
- FLEURY S., 2005** – Determination of the weathered thickness at Moole Hole and Maddur watersheds using 2D electrical imaging, EOST engineering Diploma, 67 p.
- LAJAUNIE M., GANCE J., SAILHAC P., MALET J.-P., WARDEN S., LARNIER H., 2023** – Hydrogeological structure of a granitic mountain catchment inferred from multi-method electrical resistivity datasets. *Near Surface Geophysics* (under review)
- MONTEIRO SANTOS F.A., AFONSO A.R.A., DUPIS A., 2007** – 2D joint inversion of dc and scalar audio-magnetotelluric data in the evaluation of low enthalpy geothermal fields. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(1), 53-62
- PARATE H.R., MOHAN KUMAR M.S., DESCLOITRES M., BARBIERO L., RUIZ L., BRAUN J.J., SEKHAR M., KUMAR C. 2011** – Comparison of electrical resistivity by geophysical method and neutron probe logging for soil monitoring in a forested watershed. *Current Science*, 100(9), 1405-1412.
- SMAÏ F., WAWRZYNIAK P., 2020** – Razorback, an open source Python library for robust processing of magnetotelluric data. *Frontiers in Earth Science*, 8, doi://10.3389/feart.2020.00296
- SASAKI Y., MEJU M.A. 2006** – Three-dimensional joint inversion for magnetotelluric resistivity and static shift distributions in complex media. *J. Geophys. Res.*, 111, B05101, doi:10.1029/2005JB004009
- SPITZER K. 2001** – Magnetotelluric static shift and direct current sensitivity. *Geophys. J. Int.*, 144(2), 289-299.

CALIBRATION D'UN MODELE HYDROLOGIQUE A L'AIDE DE MESURES DE RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE

GRU G.¹, LEPARRE N.¹, ACKERER P.¹, BELFORT B.¹, GIRARD J.F.¹

¹ Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg/EOST/ENGES, CNRS UMR 7063, 5 rue Descartes, Strasbourg F-67084, France

gru@unistra.fr, lesparre@unistra.fr, ackerer@unistra.fr, belfort@unistra.fr, jf.girard@unistra.fr.

RESUME

Des mesures de résonance magnétique protonique ont été acquises de manière répétée lors d'un suivi de fonte de neige sur le bassin versant du Strengbach (site de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement, Vosges) pendant l'hiver 2021. Nous utilisons ces mesures géophysiques pour caractériser les propriétés de la zone vadose, en estimant les paramètres d'un modèle hydrologique unidimensionnel (Richards 1D) grâce à une approche de modélisation couplée hydrologique et géophysique. La méthode d'estimation de paramètres choisie (inférence bayésienne) permet à la fois d'estimer les paramètres du modèle et de quantifier l'incertitude sur cette estimation.

Mots clés : résonance magnétique protonique, modèle hydrologique 1D, problème inverse, inférence bayésienne

HYDROLOGIC MODEL CALIBRATION USING MAGNETIC RESONANCE SOUNDING MEASUREMENTS

ABSTRACT

Magnetic resonance sounding data were repeatedly acquired during the follow-up of a snowmelt event on the Strengbach catchment (Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement, Vosges mountains) during the winter 2021. We use these geophysical measurements to characterize the vadose zone properties by inferring the parameters of a hydrologic 1D model (Richards 1D) through a hydrologic and geophysical coupled modeling approach. The parameter inference method chosen (Bayesian inference) also quantifies the uncertainty on the estimated parameters.

Key words: magnetic resonance sounding, 1D hydrologic model, inverse problem, Bayesian inference

INTRODUCTION

La ressource en eau en montagne est primordiale à la fois pour les écosystèmes locaux et pour un certain nombre d'activités anthropiques (Viviroli et al., 2011). Le dérèglement climatique pourrait avoir un impact négatif sur la ressource en eau disponible. Il est impératif de réduire les incertitudes sur les prédictions d'évolution de cette dernière. L'objectif du travail présenté est d'utiliser des mesures géophysiques pour apporter une information sur le stock d'eau contenu dans la sub-surface. Cette information est utilisée dans des méthodes de calibration automatique appliquées à des modèles hydrologiques. Nous avons effectué le couplage d'un modèle d'écoulement unidimensionnel basé sur l'équation de Richards et d'un modèle d'estimation de signaux de résonance magnétique protonique (RMP) à partir de distributions de teneur en eau. Nous utilisons cette modélisation couplée pour estimer les paramètres du modèle hydrologique avec des méthodes d'inférence bayésienne.

DESCRIPTION DU SITE

Le lieu d'étude sur lequel les données utilisées ont été récoltées est le bassin versant expérimental du Strengbach (carte du bassin versant avec les stations de mesures : **Fig. 1**). Ce site de 80 ha est localisé dans le massif vosgien entre 800 et 1100 mètres d'altitude. L'exutoire du bassin versant est situé à l'Est

au niveau de la station de suivi du débit sur la limite du bassin versant. Ce bassin versant expérimental est le site d'étude de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE). Des données météorologiques, hydrologiques et géochimiques y sont acquises depuis 1986. Cet observatoire étudie les modifications à long-terme des écosystèmes dues à des perturbations naturelles ou anthropiques (Pierret et al., 2018).

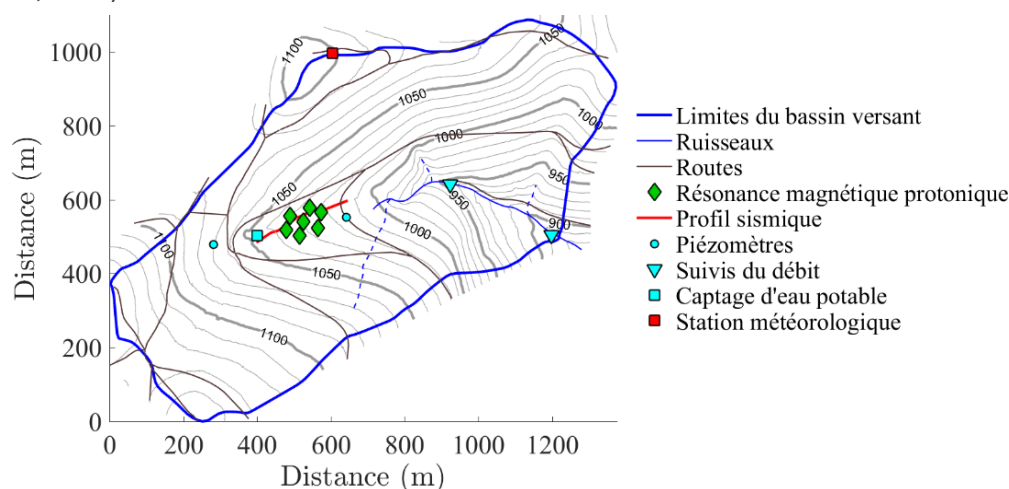


Fig. 1 – Carte du bassin versant du Strengbach et localisation des stations de mesures.

MATERIEL ET METHODES

Données météorologiques et hydrologiques

Nous utilisons des mesures hydrologiques et météorologiques pour imposer les conditions aux limites de nos simulations (cf. **Fig. 2**). La condition limite supérieure de flux est déduite des précipitations mesurées à la station météorologique. La condition limite inférieure en pression est quant à elle imposée par la mesure de hauteur de nappe effectuée au piézomètre situé en aval de la station de mesure RMP. La fréquence d'acquisition est d'une mesure toutes les 10 minutes.

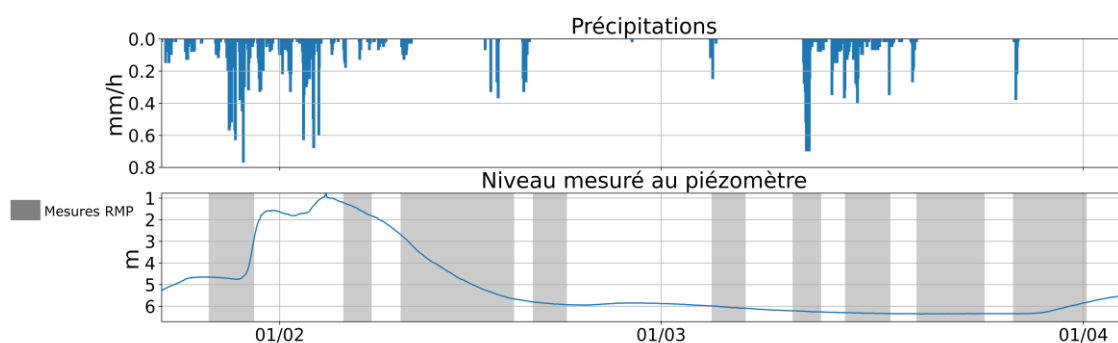


Fig. 2 – Chroniques de précipitations et de niveau piézométrique (aval).

Modélisation hydrologique

Le modèle d'écoulement unidimensionnel avec lequel nous travaillons est basé sur l'équation de Richards et les modèles de Mualem et Van Genuchten. Le code numérique utilisé pour les simulations, WAMOS (WATER MOvement in Soil), est basé sur une discrétisation de l'équation de Richards et une résolution de l'équation discrète par la méthode de Newton-Raphson (Maina et Ackerer, 2017). Les

paramètres des modèles de Mualem et Van Genuchten sont les suivants : $(K_s, \theta_s, \theta_r, L, \eta, h_0)$. K_s est la conductivité hydraulique à saturation, θ_s et θ_r respectivement la teneur en eau à saturation et la teneur en eau résiduelle. Les paramètres L, η et h_0 sont quant à eux des paramètres d'échelle. Dans un premier temps les paramètres que nous estimons sont K_s, θ_s, η et h_0 .

Mesures de résonnance magnétique protonique

Nous utilisons des données de mesures RMP. Le principe de cette méthode est d'introduire un champ électromagnétique qui va dévier les dipôles magnétiques des atomes d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau du sol et du sous-sol de leur état d'équilibre. Puis la réponse du milieu est observée sous forme d'un signal électrique dont l'intensité ($[nV]$) est (Legchenko et Valla, 2002)

$$V(t, q) = \int_z \kappa(q, z) \theta_{RMP}(z) e^{-\frac{t}{T_2^*(z)}} dz . \quad (4)$$

Où q ($[A.ms]$) est le pulse injecté, κ ($[nV.m^{-1}]$) est la fonction de sensibilité RMP qui dépend de la géométrie du système d'acquisition et du champ magnétique terrestre local et T_2^* ($[s]$) est le temps de relaxation caractéristique. On note $V_0(q) = V(t = 0, q)$. La profondeur sondée par une mesure RMP augmente avec le pulse injecté q .

Expérience RMP répétée sur du socle

L'objectif du sondage RMP était de vérifier si cette méthode de mesure est assez sensible pour détecter les variations de teneur en eau sous la surface dues à la fonte de neige. L'année pendant laquelle ces mesures ont été effectuées (2021) était une année exceptionnelle en terme de chute de neige. Quand l'appareil de mesure (Numis^{plus}, IRIS instruments) a été installé, une couche de 80cm de neige était présente sur le site. Quelques jours après l'installation de l'expérience une pluie intense a déclenché une fonte de neige et quelques semaines plus tard une chute de neige plus faible a eu lieu. De cette manière deux évènements d'infiltration avec des caractéristiques différentes ont pu être suivis. Les acquisitions ont été réalisées pour 30 valeurs de pulse et 800 stacks. Habituellement les acquisitions sont réalisées pour moins de 10 pulses et environ 200 stacks. Nous avons choisi d'augmenter le nombre de pulse et de stacks dans le but d'allonger la durée de la mesure pour observer l'évolution temporelle du contenu en eau du milieu. Nous avons limité la valeur maximale du pulse injecté à **2260 A.ms** pour sonder la partie superficielle du milieu. La particularité de cette expérience, outre le fait que les mesures aient été acquises de manière répétée, est la nature du milieu sondé : du socle. Les études RMP en time-lapse ont en effet principalement été effectuées en milieux calcaires (Mazzilli et al., 2020).

Méthodologie d'estimation de paramètres

Pour l'estimation des paramètres du modèle hydrologique nous utilisons une méthode d'inférence bayésienne : Markov Chain Monte Carlo (MCMC). L'intérêt de cette méthode est de fournir des informations sur l'incertitude des paramètres estimés.

RESULTATS PRELIMINAIRES

Couplage des modèles

Nous avons couplé les modèles décrits ci-dessus, de manière à utiliser les distributions de teneurs en eau obtenues par simulation pour estimer les signaux RMP correspondants. Ce couplage est utilisé pour comparer les signaux mesurés lors de l'expérience de terrain et les signaux simulés pour un jeu de paramètres donné (cf. **Fig.3**).

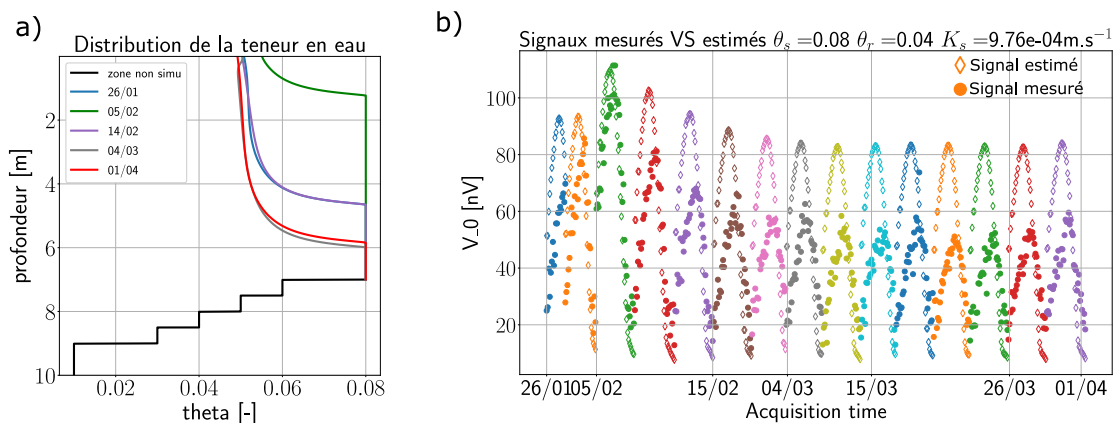


Fig. 3 – a) Distribution de teneurs en eau, résultat de la simulation WAMOS - b) Comparaison des signaux RMP mesurés et simulés sur toute la période d’acquisition.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le couplage des modèles hydrologique et géophysique est fonctionnel et fournit des résultats cohérents. Nous avons choisi la mesure de divergence entre les données simulées et mesurées : le χ^2 . Pour poursuivre le travail, il s’agira d’utiliser cette modélisation couplée dans un schéma d’inférence statistique de type MCMC.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Rohianuu Moua et Alain Hernandez pour leur participation à la mise en place de l’expérience. L’expérience de terrain a bénéficié d’un financement de l’EQUIPEX CRITEX. Le programme Idex-Unistra W16RPD19 a financé l’appareil d’acquisition. Nous remercions l’Institut Terre et Environnement de Strasbourg pour le financement du stage de fin d’études de Guillaume Gru.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hassane Maina, F., & Ackerer, P. (2017)** – Ross scheme, Newton–Raphson iterative methods and time-stepping strategies for solving the mixed form of Richards' equation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2667-2683.
- Legchenko, A., & Valla, P. (2002)** – A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 50(1-2), 3-19.
- Mazzilli, N., Chalikakis, K., Carrière, S. D., & Legchenko, A. (2020)** – Surface Nuclear Magnetic Resonance Monitoring Reveals Karst Unsaturated Zone Recharge Dynamics during a Rain Event. *Water*, 12 (11), 3183.
- Pierret, M. C., Cotel, S., Ackerer, P., Beaulieu, E., Benarioumlil, S., Boucher, M., et al., & Probst, A. (2018)** – The Strengbach catchment: A multidisciplinary environmental sentry for 30 years. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-17.
- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F. et al. & Woods, R. (2011)** – Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471-504.

APPORT DES MÉTHODES RMP ET TDEM Á L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DISPONIBLES POUR L'IRRIGATION EN CLIMAT SEMI-ARIDE – CAS DE BIRNI N'KONNI

NOUHOU CHAWEYE Y.¹, BOUCHER M.², NAZOU MOU Y.¹, FAVREAU G.², ABDOU MAHAMAN R.¹, ISSOUFOU OUSMANE B.¹, LEGCHENKO A.²

¹ Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger, chaweye1993@gmail.com, nazoumou@gmail.com.

² Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, INRAE, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France, marie.boucher@ird.fr, Guillaume.favreau@ird.fr, anatoly.legtchenko@ird.fr.

RESUME

Le périmètre irrigué de Birni N'Konni au Niger s'est développé grâce à des barrages sur la rivière Maggia. Il a été investigué par des sondages géophysiques RMP et TDEM. Les résultats montrent que l'aquifère libre superficiel représente une ressource en eau importante (~ 55 millions de m³ utiles) et facilement mobilisable (niveau statique à ~9 m, transmissivité de ~ 2.10⁻³ m²/s). Cette ressource en eau souterraine est en partie rechargée par un flux d'eau de la réserve de Tyérassa estimé à 22,8 m³/h. Elle permet de pallier aux aléas des ressources en eau de surface qui sont plus sensible à la variabilité climatique.

Mots clés : Aquifère sédimentaire, Résonance Magnétique des Protons (RMP), Electro-Magnétisme en Domaine Temporel (TDEM), périmètre irrigué, Sahel.

CONTRIBUTION OF MRS AND TDEM GEOPHYSICAL METHODS FOR ASSESSING AVAILABLE FOR IRRIGATION WATER RESOURCES IN SEMI-ARID CLIMATE – CASE OF BIRNI N'KONNI

ABSTRACT

The irrigated perimeter of Birni N'Konni in Niger has been developed thanks to dams on Maggia River. It has been investigated using MRS and TDEM geophysical methods. The results show that the shallow aquifer represents an important water resource (~ 55 million useful m³) that can be easily mobilized (static level ~9 m, transmissivity ~ 2.10⁻³ m²/s). This groundwater is partly recharged by a flux from the Tyerassa dam that is estimated at 22.8 m³/h. It makes it possible mitigating the surface water resources hazard, which are more sensitive to climate variability.

Keywords: Sedimentary aquifer, Magnetic Resonance Sounding (MRS), Time Domain Electro-Magnetism (TDEM), irrigated area, Sahel.

INTRODUCTION

Dans un contexte de forte croissance démographique et de changement climatique défavorable à l'agriculture pluviale, l'Etat du Niger a mis en avant le développement de l'agriculture irriguée dans les régions où les potentialités en eau existent. Dans la région de Birni N'Konni, un périmètre irrigué a été mis en place (**Fig. 1**) pour contribuer à améliorer la sécurité alimentaire de la région. Ce périmètre est exploité par ~ 3400 agriculteurs au cours de deux campagnes par an (en saison sèche et en saison humide). Il est alimenté à partir des eaux de la rivière Maggia collectées dans un réservoir artificiel d'une capacité de 1,2 Mm³, placé à Tyérassa (**Fig. 1**). Cette ressource en eau de surface est facilement accessible, mais sensible à la variabilité climatique particulièrement importante en climat sahélien. Les eaux souterraines constituent une alternative à condition d'une gestion intégrée et durable (Nazoumou et al., 2016). Dans l'optique d'accroître la résilience du périmètre irrigué de Birni N'Konni, une étude hydrogéophysique a été menée pour évaluer les ressources en eau souterraines de la zone. Cette étude basée sur des sondages géophysiques par

résonance magnétique des protons (RMP) et électromagnétisme en domaine temporel (TDEM), associés à l'analyse de données de puits et forages a pour objectif de déterminer le stock d'eau et les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère superficiel autour du périmètre irrigué.

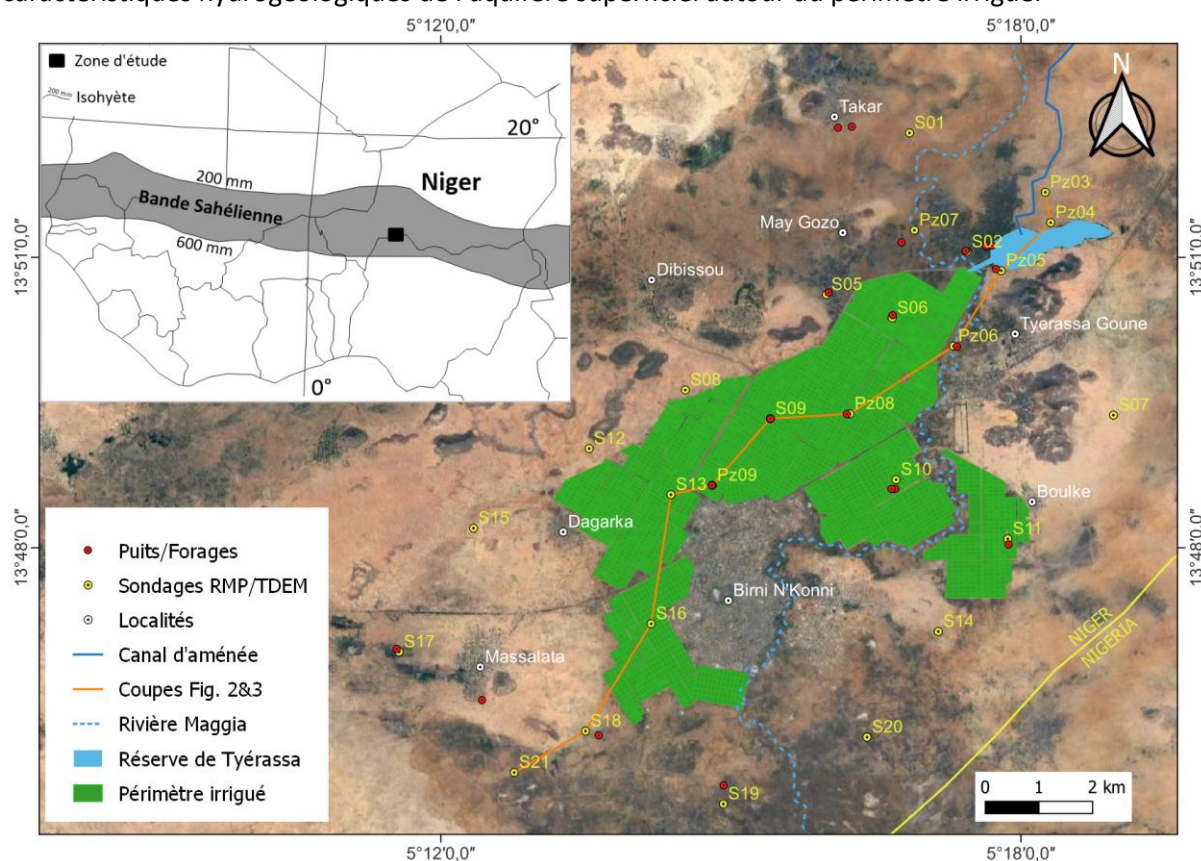


Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude et des sites de sondages

MATERIEL ET METHODES

Une synthèse géologique a été effectuée pour identifier les compartiments potentiellement aquifères. Un total de 26 sondages RMP et 29 TDEM a été réalisé autour du périmètre irrigué pour cartographier l'aquifère superficiel. Les caractéristiques des boucles de mesures, les équipements de mesures et les logiciels d'inversion utilisés sont résumés dans le **Tab. 1**. Une coupe géophysique 2D de 16,5 km basée sur 11 sondages RMP et 11 sondages TDEM a été tracée à travers le périmètre irrigué (cf. localisation en **Fig. 1**). Elle permet d'illustrer la variabilité des caractéristiques géophysiques et d'appréhender les échanges entre l'aquifère et la réserve de Tyérassa. Des données complémentaires composées des logs de forages et des niveaux piézométriques mesurés dans les puits et forages ont été utilisées pour compléter et améliorer l'interprétation des résultats RMP et TDEM. Le stock d'eau souterrain a été estimé en intégrant la teneur en eau RMP sur l'épaisseur mouillée de l'aquifère.

Méthodes	Dispositif de mesure	Nombre de sondages	Equipements	Logiciels d'inversion
TDEM	Coïncident 25×25 m ²	2	TEM FAST 48HPC	TEM-RES
	Coïncident 50×50 m ²	27		
RMP	Forme en Huit 50×50 m ²	26	NUMIS ^{Auto}	SAMOVAR_11.6

Tab. 1 – Caractéristiques des mesures géophysiques

RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse géologique montre que le périmètre irrigué est situé dans les alluvions quaternaires de la Maggia. Ces alluvions reposent sur la série sédimentaire du bassin des Iullemmeden qui se compose localement de haut en bas : des grès du Continental terminal (Ct), de la série marine du Paléocène (marne et calcaire) ; et des formations marines du Crétacé.

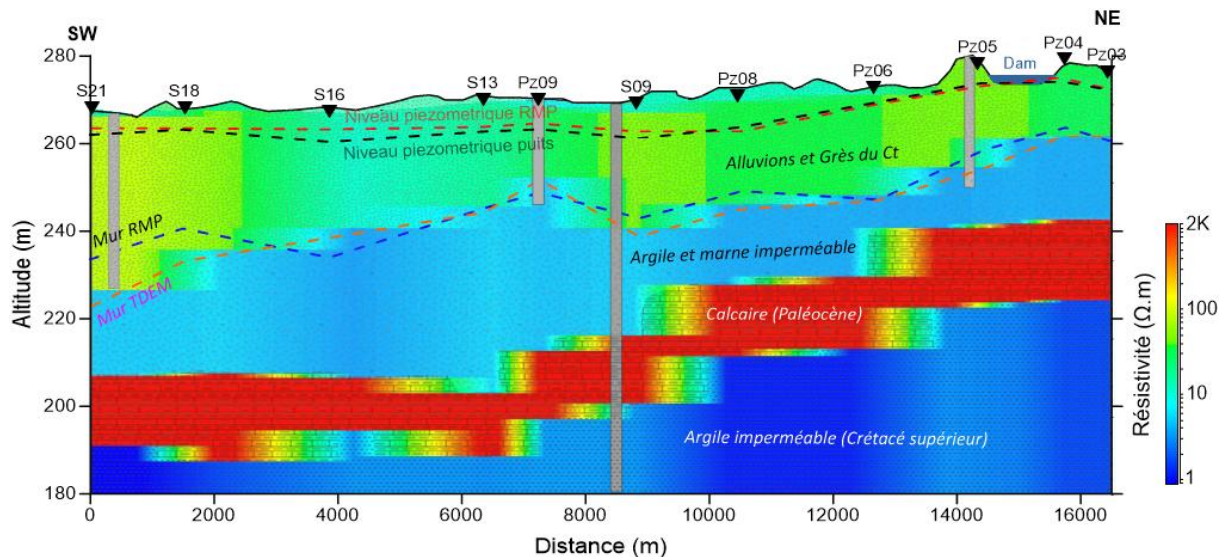


Fig. 2 – Coupe de résistivité électrique TDEM à travers le périmètre et interprétation géologique

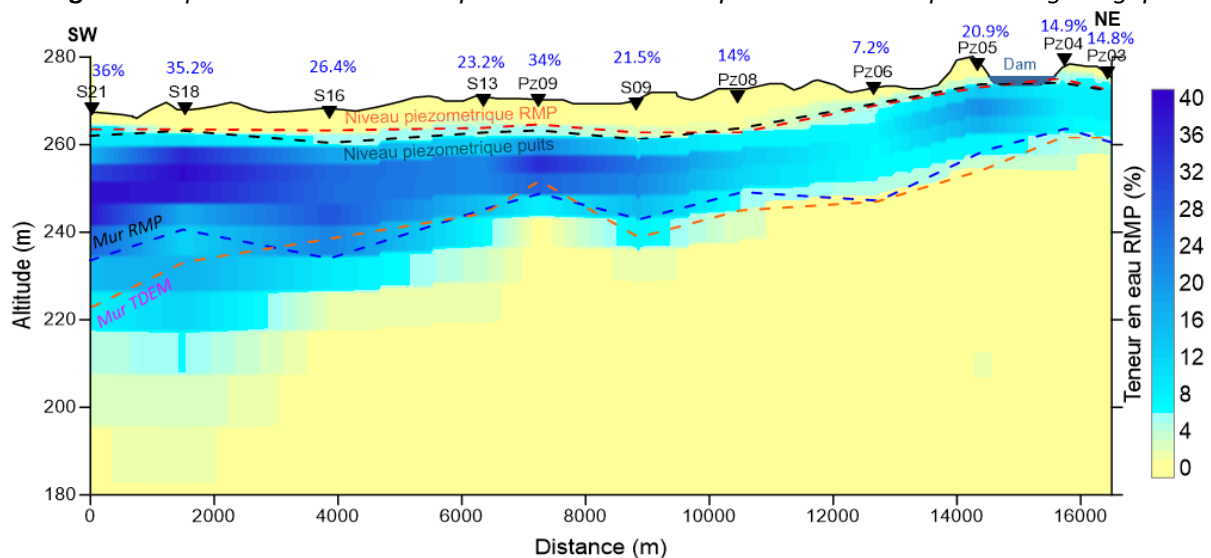


Fig. 3 – Coupe de teneur en eau RMP à travers le périmètre irrigué

Les figures 2 et 3 illustrent les résultats géophysiques. Les résultats TDEM (**Fig. 2**) délimitent quatre couches de résistivité qui sont de haut en bas : un premier terrain relativement résistant (11 à 100 Ohm.m) dont l'épaisseur (13 à 40 m) augmente du nord-est vers le sud-ouest ; un terrain conducteur (2 à 5 Ohm.m) d'épaisseur variant également de 13 à 40 m ; un troisième terrain de ~15 m d'épaisseur très résistant (500 à 2000 Ohm.m) ; et un dernier terrain très conducteur (1 à 3 Ohm.m). La comparaison avec les données de forages permet d'identifier la première couche comme les alluvions quaternaires et les formations du Continental terminal ; la deuxième couche correspond à des formations argileuses incluant les marnes du Paléocène supérieur qui constituent un écran imperméable entre l'aquifère superficiel et les aquifères sous-jacents ; la troisième couche est le niveau calcaire du Paléocène et la dernière couche correspond au sommet argileux des formations marines du Crétacé supérieur.

Les sondages RMP ne détectent qu'un seul aquifère (**Fig. 3**). Le toit de l'aquifère saturé mesuré par RMP est cohérent avec les niveaux d'eau mesurés dans les puits ; le mur de l'aquifère estimé par RMP correspond au passage entre la première couche résistante détectée par TDEM et la couche conductrice argileuse (**Fig. 2 et 3**). Les alluvions et les grès du Ct forment donc un aquifère libre et unique.

Les gammes des paramètres hydrodynamiques estimés par RMP sont indiquées dans le **Tab. 2**. La transmissivité moyenne de l'aquifère est estimée à 2.10^{-3} m²/s et le niveau piézométrique varie de 5 à 13 m, ce qui indique une bonne capacité de l'eau souterraine à être mobilisée par pompage. Les résultats des 11 sondages RMP représentés sous forme de profil (**Fig. 3**) montrent un stock d'eau plus important au sud-ouest du périmètre irrigué avec des teneurs en eau pouvant atteindre 40%. Le stock d'eau souterrain cartographié à l'échelle du périmètre irrigué montre également des conditions plus favorables au sud-ouest du périmètre. Cette variation du stock intégrée sur la superficie du périmètre a permis d'évaluer le stock d'eau total sous le périmètre à environ 110 Mm³, dont la moitié à moins de 20 mètres de profondeur (limite de prélèvement avec les moyens techniques habituels qui consiste en une pompe par aspiration installée dans un contre-puits).

Dans la partie nord-est, les niveaux piézométriques à proximité de la réserve de Tyérassa montrent un gradient hydraulique qui met en évidence l'existence d'un flux d'eau depuis la réserve de Tyérassa vers la nappe superficielle. La loi de Darcy a été utilisée pour estimer ce flux d'eau à environ 22,8 m³/h.

Propriétés	W_{RMP} (%)	T_{RMP} (m ² /s)	T1 (ms)	RES (Ohm.m)	Niv. Piezo (m)	Stock d'eau (m ³ /m ²)
Max	40	9.10^{-3}	310	550	13	14
Moy	20	2.10^{-3}	225	85	9	6
Min	7	3.10^{-3}	170	11	5	2

Tab. 2 – Caractéristiques hydrogéophysiques de l'aquifère superficiel et stock d'eau estimé

W_{RMP} : Teneur en eau RMP ; T_{RMP} : transmissivité RMP ; T1 : temps de relaxation ;

RES : résistivité TDEM ; Niv. Piezo : Niveau piézométrique

CONCLUSION

Les résultats ont montré une continuité hydraulique entre les alluvions quaternaires et les formations du Continental terminal qui forment un aquifère libre et unique. Les méthodes géophysiques RMP et TDEM ont permis de cartographier la géométrie de cet aquifère superficiel, de déterminer ses paramètres hydrodynamiques et d'évaluer son potentiel en eau. Ce potentiel est non négligeable et peut-être utilisé pour compléter l'irrigation sans influencer les nappes sous-jacentes (substratum imperméable). Cette étude démontre la pertinence des outils géophysique RMP et TDEM pour caractériser les ressources en eau souterraine afin d'optimiser l'irrigation en climat semi-aride.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une expertise menée par la compagnie CACG. Elle s'inscrit dans une thèse financée par l'Etat du Niger, l'Ambassade de France au Niger et l'IRD.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NAZOU MOU Y., FAVREAU G., ADAMO M. M., MAINASSARA I., 2016 – La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger ? Cahiers Agricultures, 25 :15003, <https://doi.org/10.1051/cagri/2016005>.

PREDICTION DE LA PROFONDEUR DES EAUX SOUTERRAINES POUR L'OPTIMISATION DES OUVRAGES D'HYDRAULIQUE PASTORALE DANS LE SAHEL : APPLICATION DES METHODES GEOPHYSIQUES RMP ET TDEM

ISSOUFOU OUSMANE B.¹, ABDOU MAHAMAN R.¹, BOUCHER M.^{1,2}, NOUHOU CHAWEYE Y.¹, FAVREAU G.², ABDOU BABAYE M. S.³, NAZOU MOU Y.¹, LEGCHENKO A.²

¹Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger. boukari086@gmail.com

²Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

³Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, UMR SERMUG, Université Dan Dicko Dan Koulodo, Maradi, Niger

RESUME

Le pastoralisme est une activité économique majeure au Sahel. Pour garantir sa durabilité, des ouvrages hydrauliques d'accès aux eaux souterraines sont nécessaires, car les eaux de surface deviennent de plus en plus insuffisantes et limitées dans l'espace et dans le temps à cause de la variabilité climatique. Cette étude, basée sur l'application des méthodes géophysiques RMP et TDEM, vise à estimer la profondeur de la nappe et le volume accessible dans le nord-ouest du Niger afin d'optimiser la réalisation des ouvrages hydrauliques pastoraux. Les résultats montrent que la profondeur de la nappe est estimée avec une précision de ± 3 m ; et une mise en eau normale est généralement suffisante pour les puits pastoraux.

Mots clés : Pastoralisme, infrastructures hydrauliques, Sahel, RMP&TDEM

PREDICTION OF GROUNDWATER DEPTH FOR OPTIMIZATION OF PASTORAL HYDRAULIC INFRASTRUCTURE IN THE SAHEL: APPLICATION OF MRS AND TDEM GEOPHYSICAL METHODS

ABSTRACT

Pastoralism is a major economic activity in the Sahel. To ensure its sustainability, hydraulic infrastructures to access for groundwater are necessary, because surface water are highly variable and limited in space and time, due to effects of climate change. This study, based on the application of MRS and TDEM geophysical methods, aims to estimate groundwater depth and accessible volume in north-western Niger in order to optimize the realization of pastoral hydraulic infrastructures. The results show that groundwater depths are estimated with an accuracy of ± 3 m, and normal watering is generally sufficient for pastoral wells.

Key words: Pastoralism, hydraulics infrastructure, Sahel, MRS&TDEM

INTRODUCTION

Au Sahel, le pastoralisme est une activité économique majeure et un moyen de subsistance essentiel de plus de 20 millions de personnes, et contribue à environ 15% du produit intérieur brut (PIB) (CIWA, 2023) (Cooperation in International Waters in Africa). Cependant, en raison de leur mode de vie itinérant, les communautés pastorales et leur bétail sont extrêmement vulnérables à la variabilité climatique caractérisée par des sécheresses qui entraînent une pénurie des eaux de surface facilement accessibles. Les ressources en eau souterraine, moins sensibles aux effets du climat et disponibles tout au long de l'année, peuvent constituer une alternative pour garantir la pérennité du pastoralisme.

Les zones pastorales sahéliennes sont peu couvertes par des ouvrages hydrauliques permettant l'accès à l'eau souterraine, car il s'agit de zones nomades avec très peu de villages permanents (Toure et al., 2019). Les ouvrages hydrauliques sont mal répartis dans l'espace, ce qui entraîne un déséquilibre bétail/pâturage qui se traduit par une forte concentration de bétail, qui à son tour dégrade le couvert végétal par le surpâturage autour des points d'eau. La CIWA, 2023 estime que plus de 3 000 puits et forages pastoraux supplémentaires sont nécessaires au Sahel pour couvrir les besoins en eau des communautés pastorales.

La rareté et la mauvaise répartition des ouvrages hydrauliques dans les zones pastorales sahéliennes rendent difficile la prévision de la profondeur de la nappe pendant la planification des projets d'hydraulique pastorale, ce qui ne permet pas d'optimiser les financements, car la profondeur est généralement surestimée. Sans une bonne estimation de la profondeur de la nappe et du volume d'eau accessible dans les aquifères, l'optimisation de la réalisation des ouvrages hydrauliques durables reste une question délicate.

Les méthodes géophysiques de résonance magnétique des protons (RMP) et électromagnétique dans le domaine temporel (TDEM) se sont avérées efficaces pour estimer la profondeur des eaux souterraines et les propriétés de stockage des aquifères (Boucher et al., 2009 ; Issoufou Ousmane et al., 2023). Dans ce sens, une étude de cas a été réalisée dans les zones pastorales du nord-ouest du Niger (Fig.1).

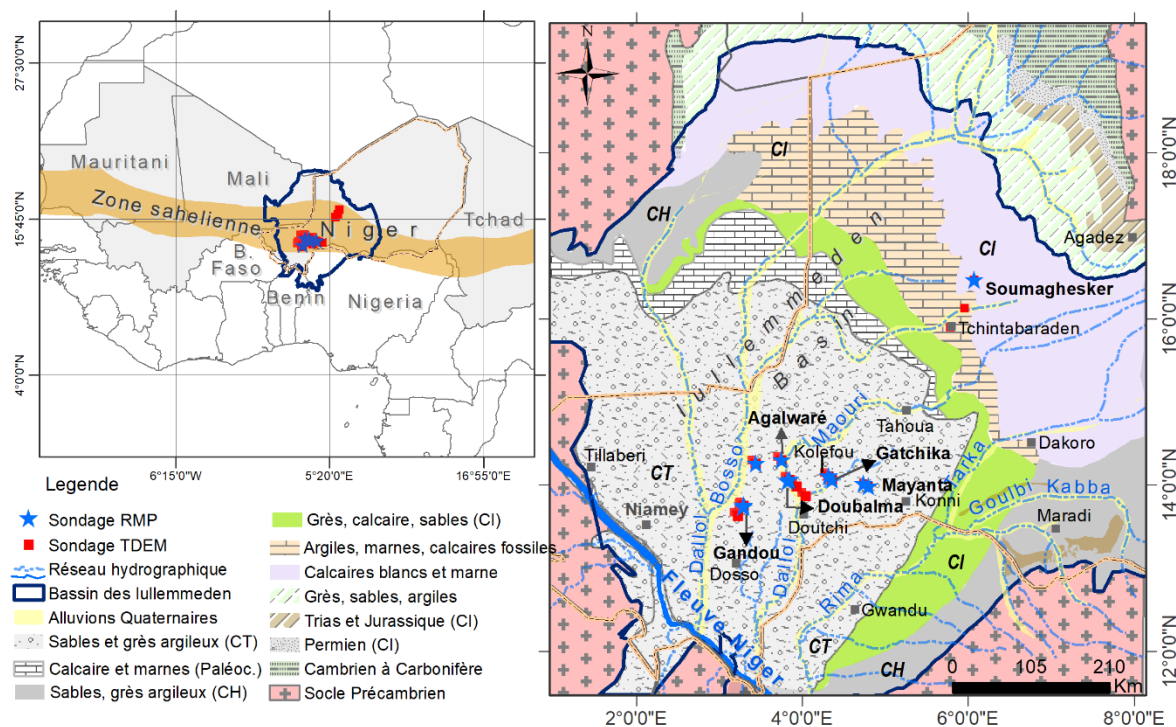


Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude

MATERIEL ET METHODES

Dans le cadre de cette d'étude, 18 sondages TDEM et douze (12) sondages RMP ont été réalisés. Les équipements géophysiques utilisés, les dimensions des boucles et les logiciels d'inversion sont indiqués dans le **Tab. 1**. Six (6) sondages pour chacune de ces méthodes ont été réalisés sur des sites cibles, tandis que les autres sondages ont été réalisés sur des sites témoins à proximité d'un puits ou forage. En outre, pour tester la fiabilité des résultats RMP et TDEM, les données techniques (logs lithologiques, plans d'équipement et niveaux statiques) des sites témoins ont été collectées auprès des directions départementales de l'hydraulique et de l'assainissement concernées. La qualité de

l'eau a été testée par des mesures in situ de la conductivité, de la température de l'eau et du niveau statique de l'eau dans les puits et les forages.

Méthode	Dispositifs de mesure	Equipement	logiciel d'inversion
TDEM	Coïncidente 150x150	TEM FAST 48HPC	TEM-RES
RMP	Carrée 75x75 m ² , câble doublé	NUMIS ^{Auto}	SAMOVAR_V11.6

Tab. 1 - Méthode, équipement et logiciel d'inversion.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

La **Fig.2** montre l'exemple typique des résultats TDEM et RMP comparés aux données techniques d'ouvrages hydrauliques sur les sites témoins de Kolefou et de Gandou. Le modèle de résistivité établi à partir du TDEM montre une bonne corrélation avec la description lithologique du forage. Il s'agit d'un terrain très résistant (2000 Ω m) de 0 à 10 m correspondant au dépôt du sable éolien ; un terrain conducteur (18.6 Ω m) de 10 à 160 m correspondant au CT3 et CT2 composés des grès argileux, sables argileux et argiles sableuses et un terrain encore plus conducteur (8.3, 6.7 Ω m) de 160 à 300 m correspondant plus aux faciès argileux du CT1. Le sondage RMP sur le site témoin de Gandou a été réalisé à 100 m d'un puits cimenté dont le niveau statique (NS) mesuré est de 21.6 m. Les résultats RMP montrent que le niveau statique est à 17.5 m avec une distribution de teneur en eau de 5% de 25-45 m, puis 18% de 45-80 m (limite d'investigation du matériel) et les valeurs de temps de relaxation T_1 correspondantes sont 227 et 152 ms, respectivement. Toutefois, la légère différence entre le niveau statique RMP moins profond que celui du PC s'explique par le fait que la RMP est parfois capable de détecter de l'eau capillaire dans la zone non saturée. Ainsi, il y'a une bonne corrélation entre le NS dans le puits et celui fourni par la RMP.

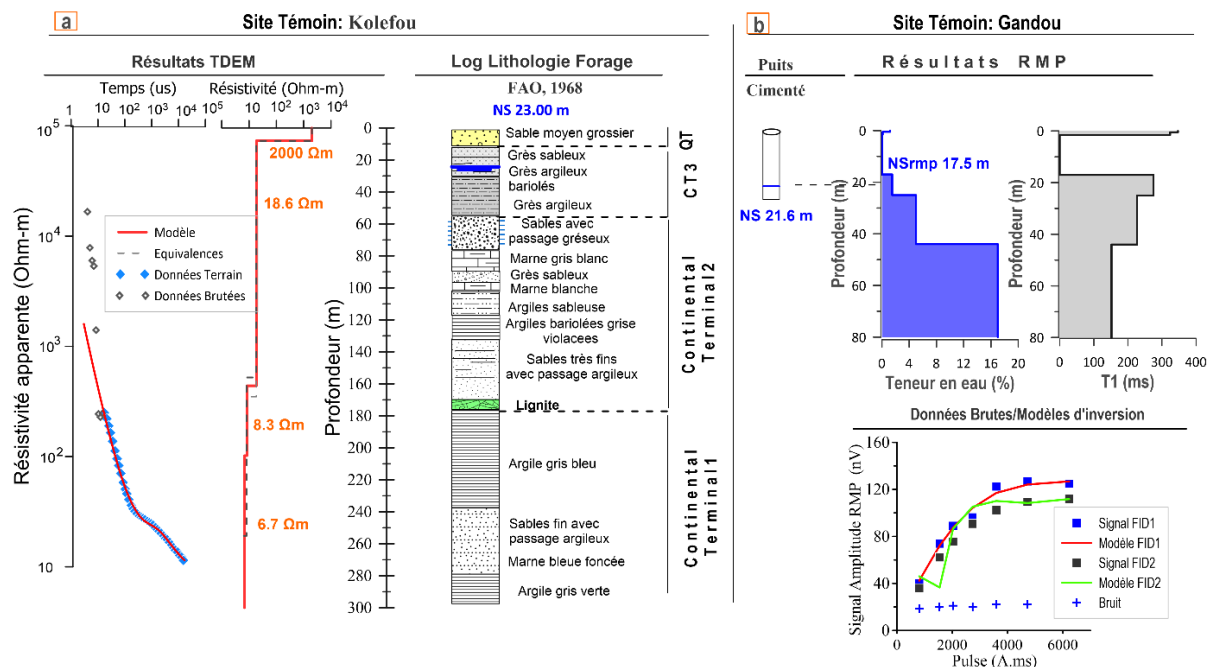


Fig. 2 – Exemple typique des résultats géophysiques comparés aux données aux données techniques ouvrages hydrauliques

Le même traitement a été effectué sur tous les sites étudiés, et les résultats comprenant la profondeur estimée de la nappe, la profondeur totale prévue de l'ouvrage, la conductivité de l'eau

estimée et le type d'aquifère sont énumérés dans le **Tab. 2**. Les teneurs en eau RMP et les valeurs de résistivité sont également prises en compte.

Site/type d'ouvrage	NS prévi. (m)	Incert. NS (m)	Prof. totale prévi. (m)	Cond. (μS/cm)	Θ RMP (%)	Res. TDEM (Ωm)	Mise en eau à prévoir	Aquifère ciblée
Soumagesker (F)	46	± 3	130 à 240	-	6 (en surface)	16 à 50	-	CI/CH
Mayanta (PC)	33	± 3	42	50 à 100	6 à 13	60	Normale	CT3
Gatchika (F)	73	± 2	130	80 à 100	no data	27	-	CT3/CT2
Gatchika (PC)			80				Normale	
Doubalma (PC)	60	± 3	72	80 à 100	2.5	23	10 m*	CT3
Gandou (PC)	47	± 2	52	50 à 100	10	330	Normale	CT3
Agalwaré (PC)	65	± 2	70	50 à 100	no data	no data	Normale	CT3

Tab. 2 - Récapitulatif des prévisions. NS = Niveau Statique ; Incert. = Incertitude ; Prof. = Profondeur ; Prévi. = Prévisionnel ; Cond. = Conductivité électrique ; Θ = teneur en eau, Res. = Résistivité électrique de l'aquifère

CONCLUSION ET PRESPECTIVES

Les sondages géophysiques RMP et TDEM ont permis d'estimer la profondeur de la nappe avec une précision de ± 3 m. Compte tenu de la teneur en eau des aquifères, généralement supérieure ou égale à 6 %, une mise en eau normale est suffisante pour les puits cimentés. En perspective, les mesures RMP et TDEM doivent être poursuivies sur l'ensemble des zones pastorales sahéniennes, particulièrement où les ouvrages hydrauliques sont rares. Cela permettra de disposer d'une carte de profondeur de la nappe et de la teneur en eau des aquifères.

REMERCIEMENTS

L'étude a été réalisée dans le cadre du projet REPO (Résilience agro-sylvo-pastorale Ouest-Niger) financé par ENABEL (Coopération Belge).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Boucher, M., Favreau, G., Vouillamoz, J. M., Nazoumou, Y., & Legchenko, A., 2009. — Estimating specific yield and transmissivity with magnetic resonance sounding in an unconfined sandstone aquifer (Niger). *Hydrogeology Journal*, 17(7), 1805–1815. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0447-X>

CIWA, 2023 — Harnessing the potential of groundwater to enhance pastoral productivity in the Sahel. *Learning notes*

Issoufou Ousmane B., Nazoumou Y., Favreau G., Abdou Babaye M.S., Abdou Mahaman R., Boucher M., Issoufa I., Lawson F.M.A., Vouillamoz J.-M., Legchenko A. & Graham Taylor R., 2023 — Changes in aquifer properties along a seasonal river channel of the Niger Basin: Identifying groundwater recharge pathways in a dryland environment. *Journal of African Earth Sciences*, 104742. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104742>

Toure I., Yaro Botoni E., Ba Diao M., Ickowicz A., 2019 — Quelle stratégie d'hydraulique pastorale pour un aménagement durable de l'espace et des ressources naturelles au Sahel ? Montpellier : CIRAD, 2019

ÉVALUATION PRELIMINAIRE PAR TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE DE LA CONTINUITE DES BANCS DE GRES ET DU POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE ASSOCIÉ AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT DE KAMECH (TUNISIE)

MONTASSAR HAMROUNI^{1,2}, MOHAMED HAMROUNI^{1,2}, HAKIM GABTNI¹, GUILLAUME COULOUMA³,
HAJER AZAIEZ¹, DAMIEN RACLOT³, OUSSAMA KORTAS¹, RADHOUE HAMDI³

¹ Laboratoire de Géoressources, Centre de Recherches et des Technologies des Eaux, CERTE, BP 273, Soliman, 8020, Tunisie

² Faculté des Sciences de Tunis, Université Tunis El Manar, Tunis, Tunisie

³ UMR LISAH, INRAE, IRD, Univ Montpellier, Institut d'Agro, Montpellier, France.

RESUME

Le bassin versant de Kamech, situé au Nord-Est de la Tunisie, fait partie d'un observatoire franco-tunisien porté sur l'évolution des ressources en eau et en sol dans les paysages cultivés méditerranéens. Il présente principalement des dépôts marins côtiers intercalés entre des bancs de grès fracturés du Serravallien-Tortonien. Les bancs de grès ont un pendage important et leur continuité, leur état de fracturation et leur profondeur dans le versant sont essentiels pour comprendre les transferts d'eau à l'échelle du versant. La formation de ravines dans la région revêt une importance particulière, car elle offre des informations précieuses sur les variations spatiales des couches de grès, qui sont d'une grande importance hydrogéologique. De plus, il est nécessaire de prendre en compte l'impact des mouvements de masse et du processus de formation des ravines dans la région. Trois profils de Tomographie de résistivité électrique parallèles ont été acquis, analysés et interprétés. Une inversion en 2D mais aussi en 3D a été réalisée. Le modèle 3D de résistivité électrique élaboré a pu mettre en évidence la géométrie des bancs de grès, les discontinuités associées et les voies de circulation d'eau souterraine

Mots clés : Tomographie électrique, aquifère, inversion, Tunisie

ABSTRACT

The Kamech watershed, situated in northeastern Tunisia, is part of a Franco-Tunisian observatory dedicated to studying the changes in water and soil resources within cultivated Mediterranean landscapes. It primarily consists of alluvial deposits that are interlayered between fractured Serravallian-Tortonian sandstone beds. The sandstone beds have a significant dip, and their continuity, fracture state, and depth within the slope are essential for understanding water transfers at the watershed scale. The formation of gullies in the region is of particular importance, as it provides valuable insights into the spatial variations of the sandstone beds, which are of great hydrogeological significance. Moreover, the impact of mass movements and the gully formation process in the area must be considered. Three parallel electrical resistivity profiles with different lengths were acquired, analyzed, and interpreted. Both 2D and 3D inversions were performed to generate a comprehensive understanding of the subsurface. The resulting 3D resistivity model successfully revealed the shape and dimensions of the sandstone beds, as well as the associated discontinuities. Furthermore, it provided valuable information about the pathways through which groundwater circulates.

Key Word: Electrical tomography, aquifer, inversion, Tunisia

INTRODUCTION

La géologie du Cap-Bon (Nord-Est de la Tunisie) (Fig.1) a été étudiée par Ben Salem (1989) et Ben Salem (1992) cartographiant ainsi les différents bancs de grès fracturés à fort intérêt hydrogéologique (Fig.2) et les niveaux argileux du Serravallien-Tortonien. En effet, le bassin versant de Kamech présente une structure composée de bancs de grès intercalées avec des argilites fortement érodées. Les sols prédominants dans la

région sont argileux, et lors des périodes sèches, des fentes de retrait apparaissent (Inoubli et al., 2016). Dans ce bassin, les grès et les argilites s'érodent progressivement, formant des zones de dépôts significatives aux points où les principaux axes d'érosion se déversent, remplissant souvent d'anciens ravins (Coulouma et al. 2018). La méthode de tomographie de résistivité électrique (ERT) a été choisie pour mieux comprendre la variabilité spatiale des grès du Serravallien-Tortonien, et en explorer la continuité en profondeur.

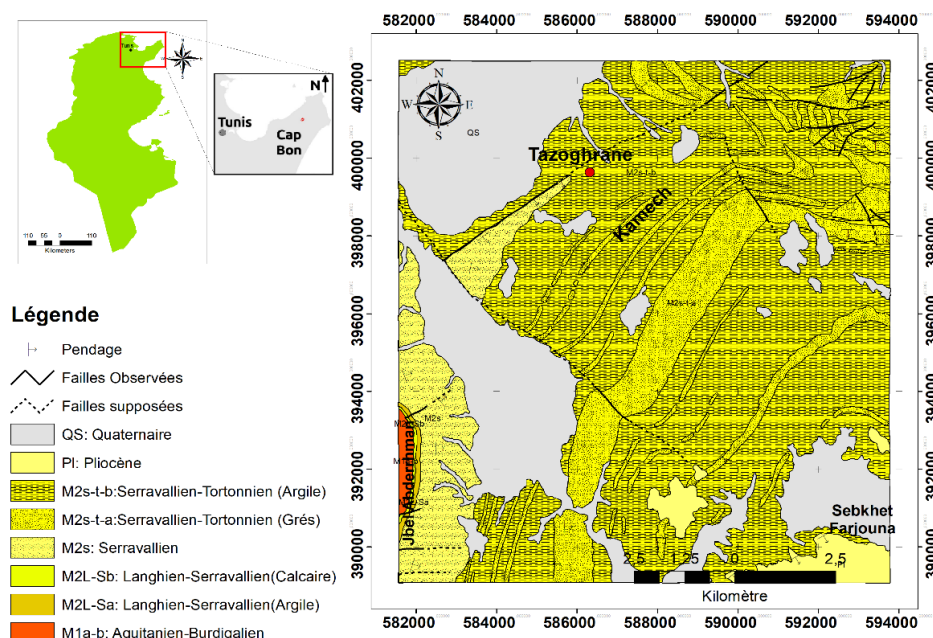


Figure 1 : Localisation du bassin versant de Kamech (Nord-Est de la Tunisie) et carte géologique associée (inspirée de Ben Salem 1989). Coordonnées en UTM WGS84.

MATERIEL ET METHODES

Les trois profils électriques ERT 1, ERT 2 et ERT 3 (Fig.2) traversent le versant NW de Kamech en allant des abords des affleurements des grès du Serravallien-Tortonien jusqu'au cour d'eau existant. L'acquisition a été réalisée par un équipement de type ABEM SAS4000. Faisant suite à plusieurs essais, le dispositif Wenner-Schlumberger a été adopté garantissant une bonne résolution horizontale et verticale, ainsi qu'un bon rapport signal/bruit (Lamouchi et al. 2021). Les profils ERT1, ERT2, et ERT3 ont un espacement inter-électrode de 10 m et des longueurs respectivement de 630m, 470m et 470m.

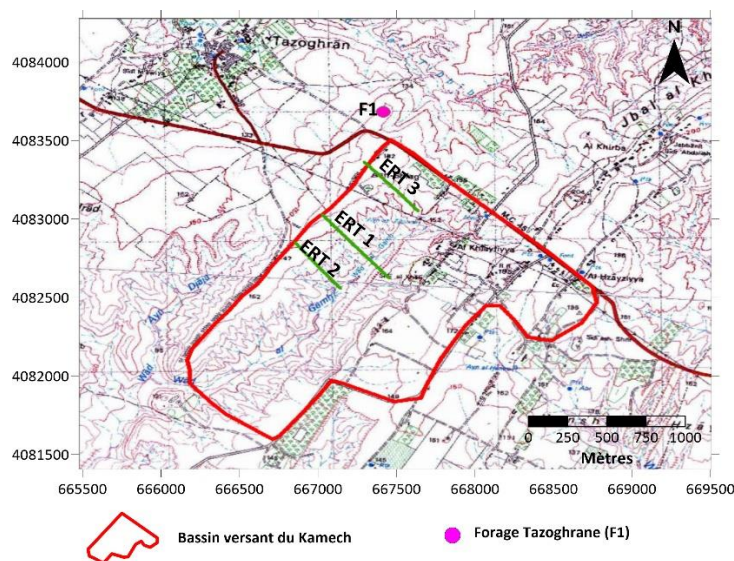


Figure 2 : Localisation des profils ERT dans le bassin versant de Kamech.

Les données en 2D recueillies ont été filtrées à l'aide du logiciel X2IPI (Ritz et al. 1999) puis inversées en utilisant l'algorithme d'inversion Occam (Constable et al. 1987) du logiciel ZondRes2D (Kaminsky 2018) pour produire des modèles de résistivité compatibles (aux équivalences et erreurs près) avec les mesures de terrain corrigées topographiquement.

L'inversion 3D a été réalisée en utilisant l'algorithme "Smoothness Constrained" (Yang et LaBrecque 2018) du logiciel ZondRes3D (Kaminsky 2018).

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les modèles de résistivités calculées obtenus montrent des variations de résistivité allant de 1 Ωm à 25 Ωm . Ces fluctuations de résistivité se rapportent à l'hétérogénéité lithologique du bassin versant de Kamech associée aux argiles et aux grès fracturés du Serravallien-Tortonien. La présence d'une zone relativement résistante en profondeur a été interprétée par l'enracinement de la barre gréseuse ayant un pendage moyen mesuré en surface de 35° vers le SE. Des niveaux gréseux intercalés avec les argiles sont aussi mis en évidence. Au centre des profils ERT, les faibles résistivités reconnues (entre 3 Ωm et 9 Ωm), correspondent probablement à la présence d'argiles altérées en surface, des argilites et des argiles saines en profondeur (Fig.3). Les profils ERT réalisés ont fourni des informations importantes sur la structure du sous-sol du versant NW du site de Kamech.

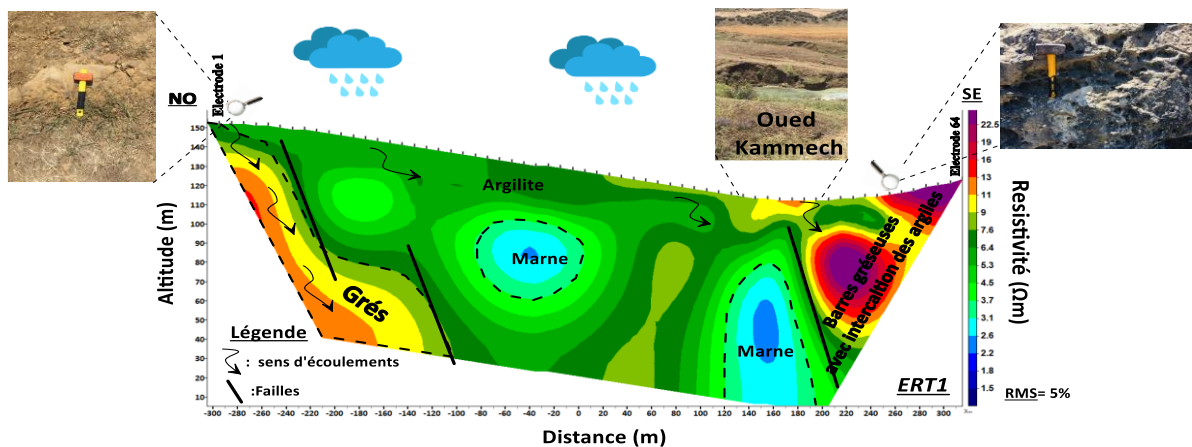


Figure 3 : Interprétation du modèle 2D au niveau de ERT1

Un modèle ERT 3D (Fig.4) est représenté sous forme de tranches de profondeur coupées approximativement aux positions de la ligne ERT pour faciliter la comparaison avec les modèles 2D. Cela permet de localiser les différentes anomalies dans l'espace et en profondeur, offrant une meilleure relation avec la géologie déjà connue. Il a permis de dévoiler des aires résistantes en profondeur associées aux barres gréseuses fissurées et d'autres conductrices liées aux dépôts argileux. Ce modèle a permis aussi de déceler la présence d'une discontinuité majeure affectant les barres gréseuses à plus de 50m de profondeur. Cette structure discontinue est associée à l'implication de plusieurs rameaux de failles, reconnus par ailleurs en affleurement, dans une logique de tectonique cassante ayant affectée la région. Ces barres de grès assurent aussi des transferts préférentiels d'eau souterraine. Ce phénomène a fortement influencé l'ossature du paysage du bassin de Kamech. Les dépôts argileux présentent eux aussi des aires de résistivités différentes dénotant de la variabilité lithologique de la série post-barre gréseuse.

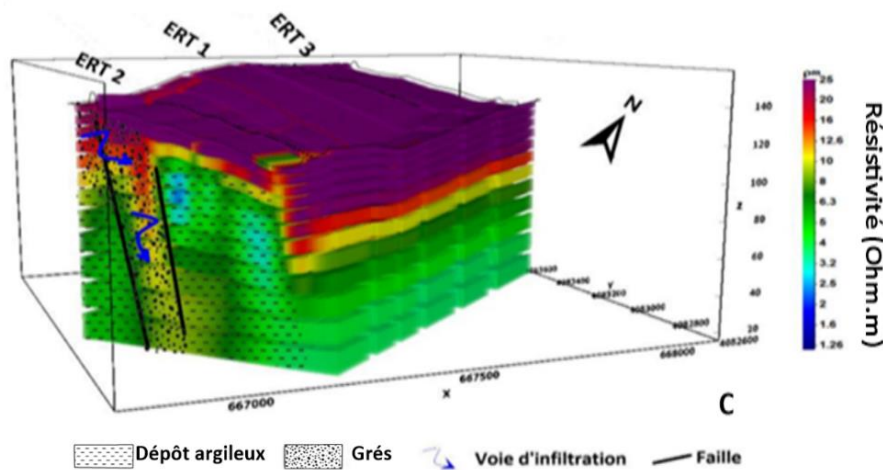


Figure 4 : Interprétation du modèle 3D de résistivité au niveau de la zone étudiée du bassin de Kamech

CONCLUSIONS

Cette étude présente les résultats d'une approche géophysique adaptée à un contexte géologique local caractérisant le bassin de Kamech (Nord-Est de la Tunisie). Elle a permis de caractériser la géométrie de la structure encaissante des dépôts ravinaires à grande échelle de profondeur (80-100m) et des barres gréseuses qui facilitent les transferts préférentiels d'eau souterraine. La tomographie de résistivité électrique 2D a permis de révéler une spécification détaillée de la géométrie des niveaux résistants (grès) et ceux conducteurs (dépôts argileux) ainsi que la présence d'une discontinuité majeure affectant les barres gréseuses à une profondeur de plus de 50 mètres. L'inversion 3D fournit une appréciation spatiale et en profondeur quantitative de la géologie de subsurface. Elle nous permet entre autres de mieux caractériser les barres gréseuses et les niveaux argileux ainsi que les discontinuités. Ces observations montrent que le bassin de Kamech a alterné plusieurs cycles sédimentaires et paléogéographiques depuis le Miocène ainsi qu'une activité tectonique prépondérante.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ben Salem H., 1989** - Carte géologique de Tazoghrane 1/50000. Département de géologie office national des mines, Tunis, n15.
- Ben Salem H., 1992** – Contribution à la connaissance de la géologie du Cap Bon : stratigraphie, tectonique et sédimentologie. Contribution to the study of the geology of Cape Bon: stratigraphy, tectonic and sedimentology) PhD thesis, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisia.
- Constable SC., Parker RL., Constable CG., 1987** – Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* 52(3):289-300.
- Coulouma G., Raclot D., Hamdi R., 2018** – Reconstitution historique de la géométrie d'une ravine au Cap Bon (Tunisie), tentative d'utilisation de la tomographie de résistivité en milieux argileux. 11^{ème} Colloque GEOFCAN 20 et 21 novembre 2018, Antony, 1-4.
- Inoubli N., Raclot D., Moussa R., Habaieb H., Le Bissonnais Y., 2016**- Soil cracking effects on hydrological and erosive processes: a study case in Mediterranean cultivated vertisols. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10928>.
- Kaminsky A., 2018** - Zond Software ©, <https://zond-geo.ru>
- Lamouchi, I., Azaiez, H., & Gabtni, H. 2021**- Assessment of deep groundwater potential associated with Khaled Fault Zone (Northwestern Tunisia, North Africa) using an integrated geophysical approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07786-w>
- Ritz, M., Robain, H., et al. 1999** - Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical prospecting*, 47(2), 85-101. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1999.00122.x>
- Yang X., LaBrecque DJ., 2018** Stochastic Inversion of 3D ERT Data Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. p221-228.

MESURER LE POTENTIEL SPONTANÉ ÉLECTRIQUE EN MILIEU FORESTIER POUR OBSERVER LES ÉCHANGES HYDRIQUES DANS LE CONTINUUM SUBSURFACE-VEGETATION-ATMOSPHERE

LESPARRE N.¹, MATTHEY P.D.², HERNANDEZ A.¹, BONAL D.², CARRIERE S.D.³, KOFFI H.E.B.¹, ACKERER P.¹, MARQUIS G.¹, JOUNIAUX L.¹, JOUGNOT D.³, BELFORT B.¹

¹ Université de Strasbourg, CNRS, EOST, ENGEES, Institut Terre et Environnement de Strasbourg, UMR 7063, 5 rue Descartes, Strasbourg F-67084, France, lesparre@unistra.fr

² Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France

³ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 75005 Paris, France

RESUME

Les mesures de potentiel spontané électrique sont influencées par la variation des flux hydriques circulant dans le sol et au sein des arbres. Nous étudions ici comment ces données acquises en milieu forestier sont sensibles aux différents processus de transferts hydriques qui ont lieu dans le continuum subsurface-végétation-atmosphère. Pour cela, nous avons conçu et installé une expérience de mesures de potentiel spontané sur le tronc et au pied de plusieurs arbres d'une même parcelle forestière et complété ces mesures par des observations des variables environnementales.

Mots clés : potentiel spontané électrique, circulations hydriques, continuum subsurface-végétation-atmosphère, milieu forestier, mesures environnementales

MEASURING THE ELECTRICAL SELF-POTENTIAL IN A FOREST ENVIRONMENT TO MONITOR THE WATER EXCHANGES IN THE CONTINUUM SUBSURFACE-VEGETATION-ATMOSPHERE

ABSTRACT

The electrical self-potential measurements are influenced by the variation of the water flowing in the soil and in tree trunks. We study here how such data acquired in a forest environment are sensitive to the different processes of water transfers occurring in the continuum subsurface-vegetation-atmosphere. In that goal, we designed and installed an experiment of electrical self-potential measurements on several tree trunks and roots and in the soil in a forest plot. Those measurements are completed with observations of the environmental variables.

Key words: electrical self-potential, water flow, continuum subsurface-vegetation-atmosphere, forest environment, environmental measurements

INTRODUCTION

La circulation de l'eau dans la sub-surface joue un rôle clef dans le développement de la forêt. Elle influence la variabilité de la distribution de la ressource hydrique et sa disponibilité et contraint la demande en eau de la végétation (Silva et al., 2022). Cependant les processus de circulation hydrique dans le continuum subsurface-végétation-atmosphère demeurent difficiles à observer et à déconvoluer. Les capteurs ponctuels fournissent une information sur les dynamiques locales (échelle centimétrique). Les mesures de flux de sève effectuent une mesure intégrée sur une section du tronc de la transpiration. Par ailleurs, les tours à flux apportent une mesure de l'évapotranspiration à une échelle d'environ 10³m². En revanche, il y a un manque de mesures intégratives pour décrire la dynamique des échanges en eau dans le sol et à l'échelle de l'arbre.

Le potentiel spontané électrique (PSE) est fortement impacté par les transferts hydriques car les ions transportés par les écoulements d'eau peuvent générer un signal électrique d'origine électrocinétique.

Par conséquent, les variations du flux hydrique entraînent des fluctuations du PSE. Cependant, d'autres processus influencent le PSE, comme la redistribution des charges liées à des changements de contenu en eau, à des fluctuations de concentration en ions ou des variations de température. La réalisation de mesures complémentaires au PSE permet d'étayer l'interprétation des signaux de PSE pour localiser et quantifier les flux hydriques (Jouniaux et al., 2009).

Les mesures continues de PSE peuvent être acquises avec une résolution temporelle relativement fine et de manière autonome. Ces mesures sont intégratives et représentent la dynamique du milieu dans l'espace situé entre deux électrodes. Cette méthode est peu invasive si l'on compare l'insertion d'électrodes par rapport à l'excavation de fosses réalisées pour insérer des capteurs hydrologiques. Jusqu'à présent, les applications de mesures de PSE pour étudier les processus de la zone vadose liés au fonctionnement de la végétation sont caractérisées par des mesures effectuées soit sur des arbres (Hao et al., 2021), soit dans le sol (Voytek et al., 2019). Nous formulons l'hypothèse que les mesures de PSE acquises simultanément dans le sol et dans l'arbre sont susceptibles de présenter des caractéristiques distinctes et peuvent ainsi apporter des informations complémentaires sur les processus d'échanges hydriques dans le continuum subsurface-végétation-atmosphère.

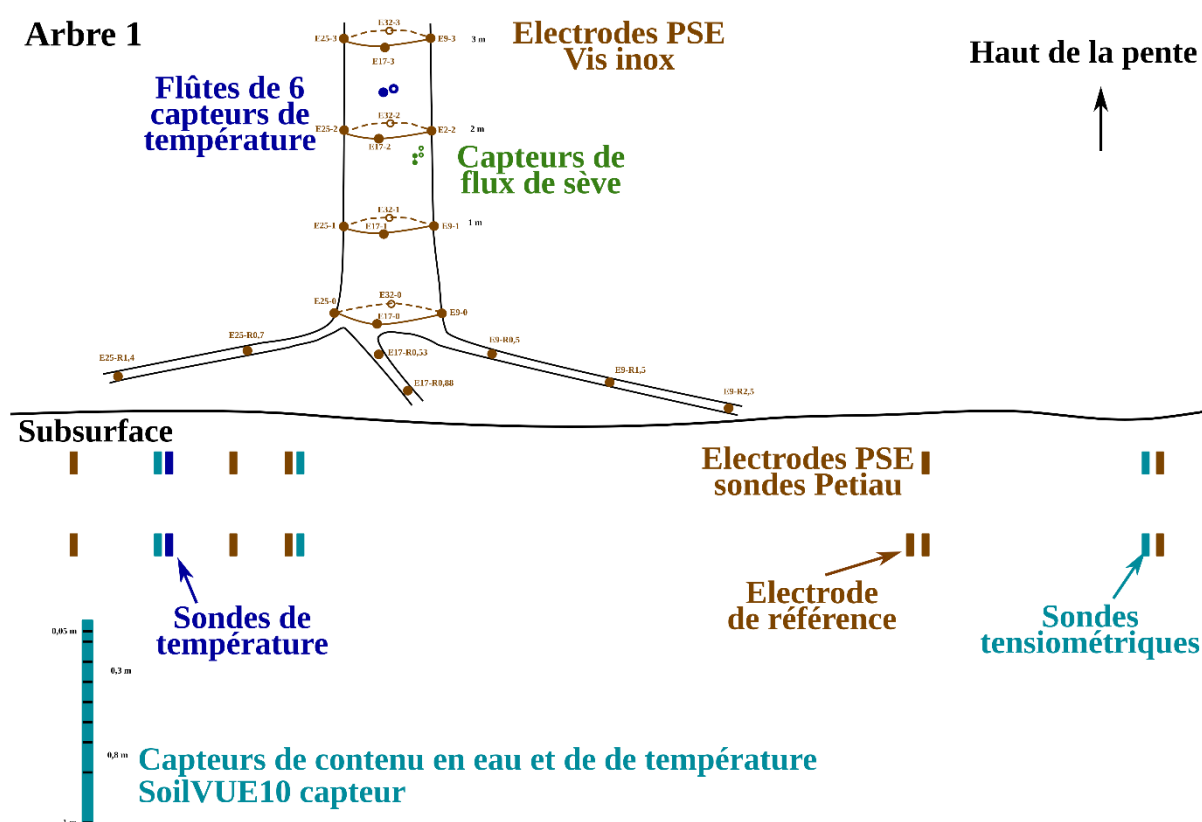


Fig. 1 – Schéma des équipements installés sur et autour d'un arbre pour observer les échanges hydriques entre les compartiments de la subsurface, la végétation et l'atmosphère.

MATERIEL ET METHODES

Nous réalisons depuis mai 2021 une expérience de mesures du PSE dans une parcelle de jeunes épicéas située sur le site de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement ([OHGE](#) - [OZCAR](#), Pierret et al., 2018). Cet observatoire est situé entre 850 et 1150 m d'altitude et son climat est tempéré avec des influences océaniques et montagnardes. L'observatoire correspond au bassin versant du Strengbach dont la surface de 80 ha est couverte par un sol acide d'une épaisseur variant 50 cm et 5 mètres. La roche mère sous-jacente est de type granitique et sa partie altérée présente une épaisseur variant

entre 1 et 12 m. La forêt occupe 80% du bassin versant, dont 80% d'épicéas (*Picea abies*) et 20% de hêtres (*Fagus sylvatica*). Cependant le couvert forestier évolue avec les travaux forestiers, les tempêtes, les épisodes de sécheresse et les attaques de scolytes (*Dendroctonus micans*), tous ces éléments ayant été particulièrement virulents ces dernières années.

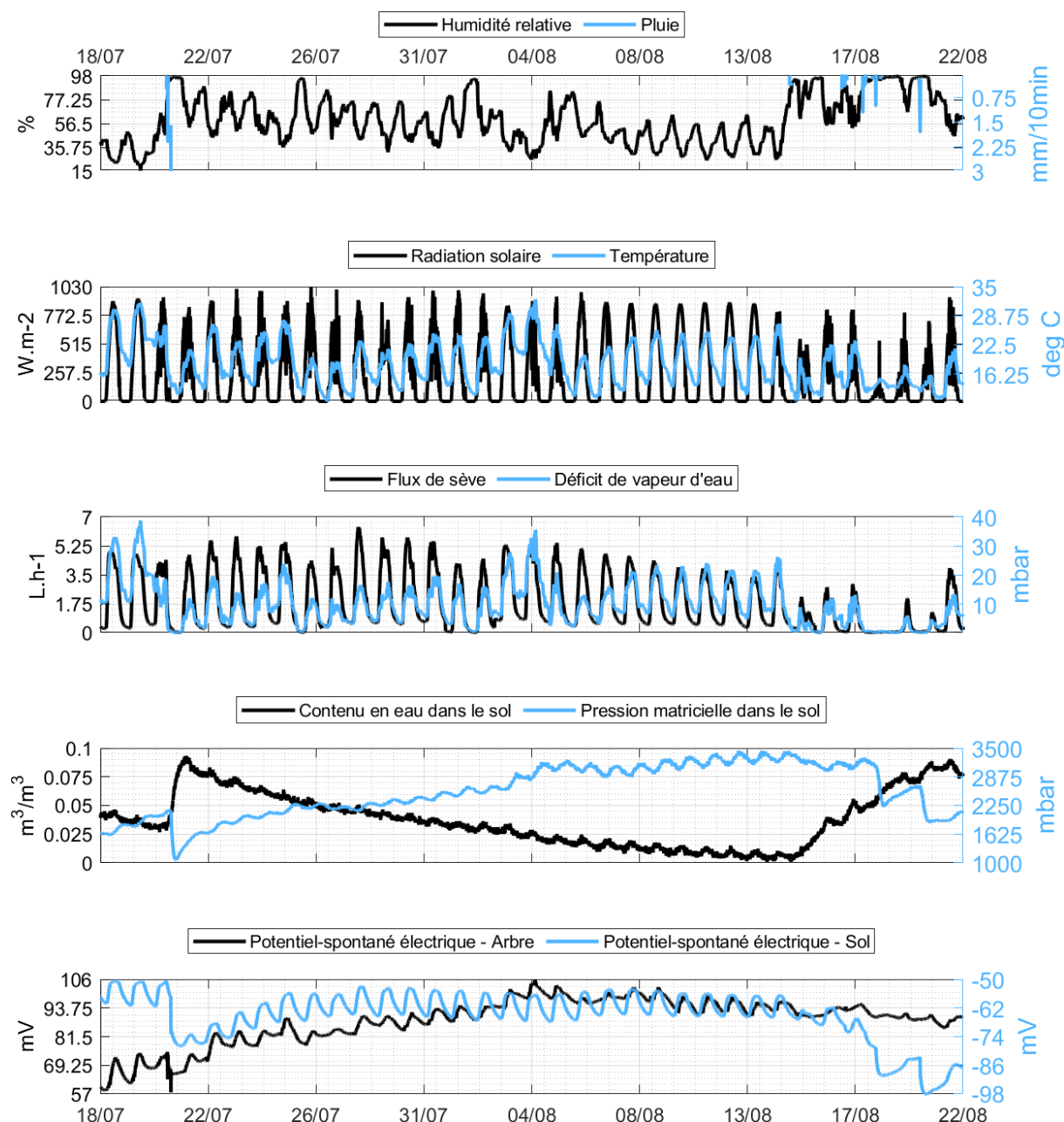


Fig. 2 –Données environnementales et de PSE acquises sur le bassin versant du Strengbach entre le 18 juillet et le 22 août 2022. Le capteur de contenu en eau est à 5 cm de profondeur celui de potentiel matriciel à 30 cm. Les mesures de PSE correspondent à des variations entre des dipôles verticaux.

Pour comprendre comment les différents processus de transferts hydriques dans le sol, la végétation et l'atmosphère influencent les mesures de PSE, nous avons également mesuré simultanément :

- La quantité de pluie et de pluviollessivats (observations fournies par l'OHGE),
- Le gradient hydraulique dans le sol (sondes tensiométriques à différentes distances d'un arbre),
- Les variations de contenu en eau dans le sol (sonde SoilVue10 équipée de 9 capteurs de réflectométrie en domaine temporel réparties entre 5 cm et 1 m de profondeur),
- La transpiration des arbres (sondes thermiques).

Ces données sont destinées à distinguer les contributions liées à l'infiltration, l'évaporation et l'absorption racinaire sur le signal de PSE. Les données météorologiques sont mesurées à la station météorologique de l'OHGE à 300 m de la parcelle suivie. Les mesures de déficit de vapeur d'eau sont calculées à partir de la température et de l'humidité relative. Elles indiquent la différence entre l'état actuel de la pression de vapeur et la saturation en vapeur correspondant à la température observée.

Les mesures de PSE sont réalisées sur 4 arbres et dans le sol à différentes distances d'un des arbres (Fig. 1). Sur les arbres les électrodes sont installées à différentes hauteurs et suivant 4 orientations pour observer comment ces paramètres influencent la mesure. Des électrodes sont également installées sur les racines d'un des arbres.

RESULTATS – PREMIERES OBSERVATIONS

Quelques mesures de PSE acquises durant la sécheresse 2022 sont représentées Fig. 2. Les mesures de PSE acquises dans l'arbre correspondent à la différence entre les signaux mesurés à 3 m et 2 m avec les électrodes situées au nord de l'arbre. Celles acquises dans le sol représentent la différence entre les signaux acquis entre 30 cm et 80 cm de profondeur, à une distance de 50 cm de l'arbre. Toutes ces mesures de PSE sont liées à la même électrode de référence. L'événement pluvieux du 20 juillet est suivi par un épisode de sécheresse jusqu'au 14 août. Cette sécheresse impacte les mesures d'humidité de l'air et de déficit de vapeur d'eau, notamment entre le 4 et le 14 août. La sécheresse influence également le flux de sève dont le maximum journalier décroît jusqu'au 14 août et présente des valeurs non nulles les nuits précédant le 14 août. Les mesures de teneur en eau dans le sol restent faibles (<10%), ces mesures et celles de potentiel matriciel sont fortement marquées par les épisodes pluvieux et par la sécheresse qui entraîne une diminution régulière du contenu en eau et une croissance de la pression matricielle. Les mesures de PSE dans l'arbre et dans le sol montrent une cyclicité journalière, ces signaux sont perturbés suite aux pluies et l'amplitude de variation journalière diminue après les pluies. L'influence de la sécheresse sur ces données est en revanche moins évidente.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'ensemble des mesures acquises dans une forêt d'épicéas nous montrent que les mesures de PSE oscillent avec une fréquence journalière durant la période estivale dans l'arbre et au pied de l'arbre. La cyclicité de ces mesures est perturbée suite aux épisodes de pluie. Ces observations doivent maintenant être comparées à celles déjà publiées. L'analyse de ces mesures sera approfondie de manière à distinguer quels paramètres environnementaux influencent la cyclicité des mesures de PSE.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- HAO Z., LI W., HAO X., 2021** - Variations of electric potential in the xylem of tree trunks associated with water content rhythms. *J. Exp. Bot.*, 72 (4), 1321-1335.
- JOUNIAUX L., MAINEULT A., NAUDET V., PESSER M., SAILHAC P. 2009** - Review of self-potential methods in hydrogeophysics. *C. R. Geoscience*, 341 (10-11), 928-936.
- PIERRET M.-C., COTEL S., ACKERER P., et al., PROBST A., 2018** - The Strengbach Catchment: A Multidisciplinary Environmental Sentry for 30 Years. *Vadose Zone J.*, 17 (1), 180090.
- SILVA M., MATHENY A.M., PAUWELS V.R.N., TRIADIS D., MISSIK J.E., BOHRER G., DALY E., 2022** - Tree hydrodynamic modelling of the soil-plant-atmosphere continuum using FETCH3. *Geosci. Model Dev.*, 15 (6), 2619-2634.
- VOYTEK E.B., BARNARD H.R., JOUGNOT D., SINGHA K., 2019** - Transpiration and precipitation induced subsurface water flow observed using the self-potential method. *Hydrol. Process.*, 33(13), 1784-1801.

PROFONDEUR DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE A PARTIR DU TIME DOMAIN ELECTROMAGNETISM (TDEM) ET DE L'APPROCHE HYDROSTATIQUE DE GHYBEN-HERZBERG AU SUD DU PLATEAU DE SAKETE ET DE SA PLAINE LITTORALE (BENIN)

N'TCHA T¹., YALO N¹., ALASSANE A¹., BOUCHER M²., ALLE C³., ELEGBEDE B³.

¹Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA),

²Institut de Recherche et de Développement (IRD)

³Institut National de l'Eau, Benin.

chantipentcha@gmail.com / tchantipn29@yahoo.com

RESUME

Pour caractériser l'interface entre l'eau douce et l'eau salée sur le Plateau de Sakété et sur la Plaine littorale, l'approche géophysique Time Domain Electromagnetism (TDEM) a été utilisée. 12 sondages TDEM ont été réalisés à cet effet à des endroits cibles de la zone d'étude. La mesure des niveaux statiques pour l'estimation de la profondeur du front salin selon l'approche hydrostatique de Ghyben-Herzberg s'est effectuée durant le mois d'Août (période des basses eaux) sur 221 forages et puits. La profondeur des nappes varie entre 0,9 à 2,9 m sur l'aquifère du Quaternaire dans la plaine littorale et entre 4 à 25 m sur l'aquifère du Continental Terminal (CT) au Nord du Plateau. Les sondages TDEM ont confirmés par endroits la présence de l'interface eau douce-eau salée à des profondeurs comprises entre 15 et 50 m dans la plaine littorale au Sud du Plateau de Sakété. La carte des profondeurs de l'interface eau-douce/eau salée montre que le front salin est plus proche aux voisinages du Lac Nokoué, de la lagune de Porto-Novo et son chenal.

Mots clés : interface eau douce-eau salée, Continental Terminal (CT), Time Domain Electromagnetism (TDEM), Ghyben-Herzberg

DEPTH OF THE FRESHWATER-SALTWATER INTERFACE FROM TIME DOMAIN ELECTROMAGNETISM (TDEM) AND THE GHYBEN-HERZBERG HYDROSTATIC APPROACH AT THE SOUTH OF THE SAKETE PLATEAU AND ITS COASTAL PLAIN (BENIN)

ABSTRACT

To characterize the interface between fresh and salt water on the Sakété Plateau and the Coastal Plain, the Time Domain Electromagnetism (TDEM) geophysical approach was used. 12 TDEM surveys were conducted for This purpose at target locations in the study area. The measurement of static levels for the estimation of the depth of the salt front according to the hydrostatic approach of Ghyben-Herzberg was carried out during the month of August (period of low water) on 221 boreholes and wells vary between 0.9 to 2.9 m on the Quaternary aquifer in the coastal plain and between 4 to 25 m on the aquifer of the Continental Terminal (CT) in the north of the Plateau. TDEM boreholes confirmed by location the presence of a freshwater-saltwater interface at depths between 15 and 50 m in the coastal plain. The depth map of the freshwater/salt water interface shows an advance from Lake Nokoué, the Porto-Novo lagoon and its channel.

Key words : freshwater - saltwater interface, Continental Terminal (CT), Time Domain Electromagnetism (TDEM), Ghyben - Herzberg

INTRODUCTION

Les zones côtières sont définies comme les zones à terre dont l'environnement, le climat et l'économie sont fortement influencés par la présence proche de la mer ; plus de 60 % de la population mondiale vit dans ces zones littorales. Elles attirent les populations et les touristes, tant pour les conditions climatiques et la qualité de vie que pour le développement économique (transport maritime, import-export). Cependant, ces zones sont exposées aux risques de catastrophes naturelles (inondations, tsunamis) ou de pénurie en eau, en partie en raison des intrusions salines dans les réservoirs d'eaux

souterraines (Dorfliger, 2013). Hormis la forte densité relative de la population dans des agglomérations sujettes à une urbanisation accélérée et aux rejets des déchets et des polluants de tout genre, l'ouverture des plateaux méridionaux béninois dont le Plateau de Sakété, sur la plaine côtière cause un stress du fait de l'intrusion saline menaçante. Une étude chimique des eaux des fleuves Ouémé et Sô (complexe hydrographique en bordure Ouest du Plateau de Sakété) a révélé qu'il se produit une remontée d'eau salée dans ces fleuves pendant la période d'étiage (GIGG, 1983). La profondeur de pénétration de l'eau salée vers l'amont à partir de leurs exutoires respectifs est d'environ 25Km le long de l'Ouémé contre 30 km le long de la Sô. De même, des études menées par (Alassane, 2004) montrent sur le plateau de Sakété des valeurs de conductivité critiques supérieures à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les puits en bordure de lagune de Porto-Novo. La profondeur moyenne du biseau salé détectée par les sondages TDEM sur la plaine littorale de la commune de Sèmè-Kpodji passe de 23 à 45m (Yalo et al., 2020). Cette intrusion saline constitue une menace de pollution pour le grand champ de captage (Ouando), source d'alimentation en eau potable de la capitale administrative du Bénin.

MATERIEL ET METHODES

La zone d'étude est située dans le département de l'Ouémé, au Sud-Est du Bénin entre les latitudes $6^{\circ}21'36''$ et $6^{\circ}33'36''$ et les longitudes $2^{\circ}27'36''$ et $2^{\circ}44'24''$. Les niveaux statiques (NS) ont été mesurés à l'aide d'une sonde piézométrique sonore pendant le mois de Août (période des basses eaux) dans 221 forages et puits captant l'aquifère du Quaternaire de la plaine littorale et l'aquifère du Continental Terminal (CT) sur le Plateau. Les altitudes Z sont obtenues d'une part avec un GPS de $\pm 3\text{m}$ de précision dans la plaine littorale et d'autre part sur le plateau grâce à l'extraction dans QGIS (extension sample tools) à partir des points Géodésiques et un Model Numérique de Terrain (MNT) sélectionnée sur la base de la comparaison des critères ; RSR, coef-NASH et R^2 . Les niveaux piézométriques (NP) ont été calculés à partir de l'équation 2, la profondeur de l'interface eau douce-eau salée a été estimée à partir de la formule hydrostatique de Ghyben-herzberg (Figure1, Equation 1) et la spatialisation a été faite dans surfer 11 et Qgis (figure 3). Les sondages TDEM (11) (Figure 3) 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.

$$H = \rho_f / \rho_s - \rho_f * h = 40h \text{ (Équation 1)}$$

$$h = Z - NS \text{ (Équation 2)}$$

Les densités considérées sont de 1,025kg/l pour la nappe salée et de 1,000kg/l pour la nappe d'eau douce.

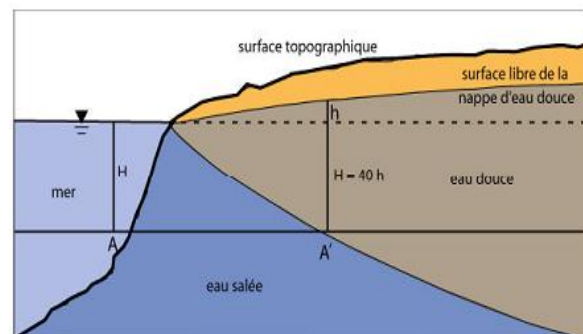
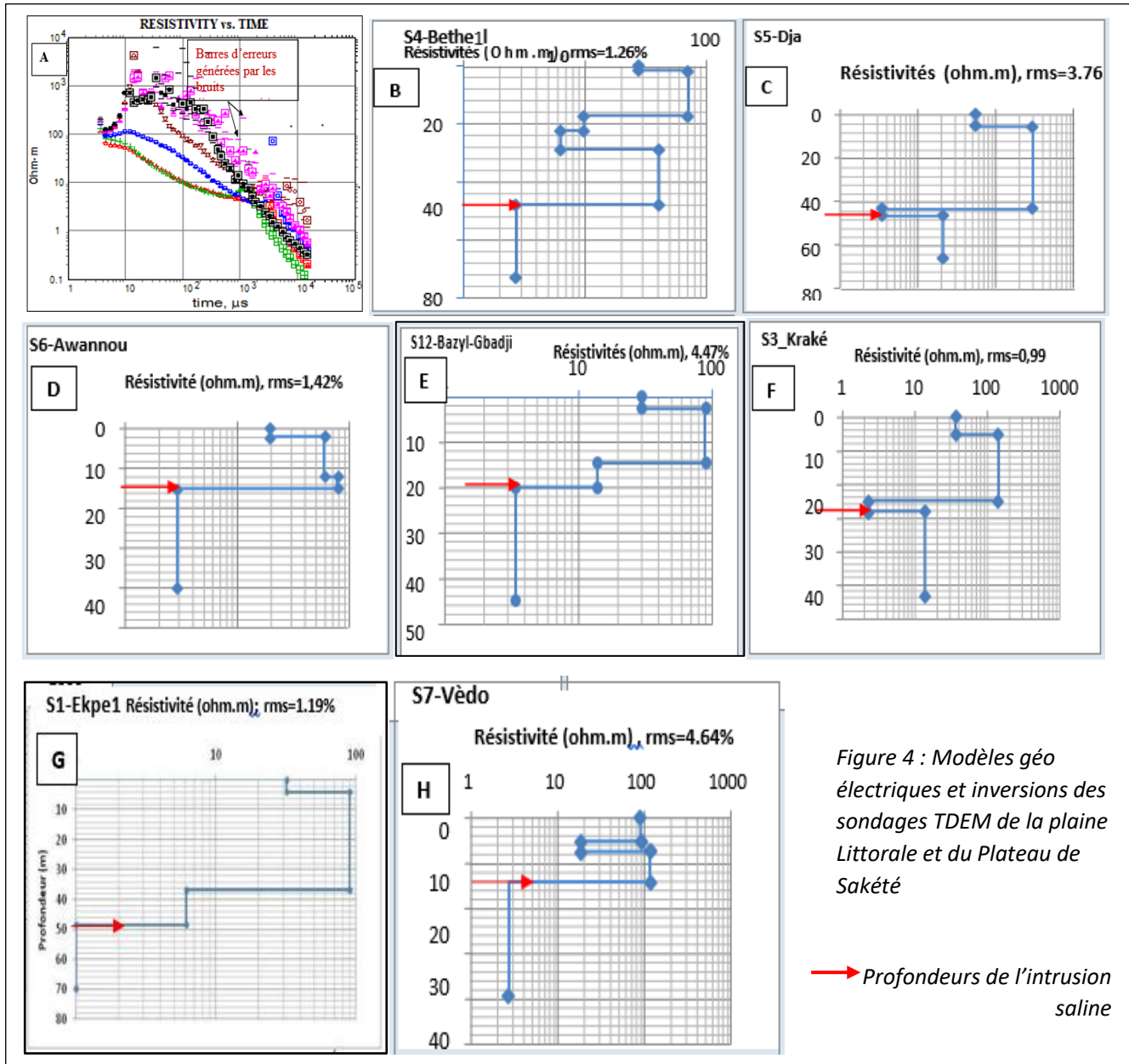


Figure 1 : Illustration de la coupe schématique perpendiculaire au Littoral selon Ghyben- Herzberg (FRISSANT N. et al, 2005)

RESULTATS ET DISCUSSION

Le front salin déduit de la Formule de Ghyben Herzberg permet de distinguer 2 zones ; la zone du plateau où le front est estimé entre 100 et 450m et la zone de la plaine et du delta où le front est estimé entre 50 et 100m (Figure 3). Les faibles valeurs s'observent en bordure du Lac Nokoué, de la Lagune de Porto-Novo et dans la partie Deltaïque qui correspondent aux zones de dépressions piézométriques (figure 2). Ces faibles profondeurs dans ces zones pourraient être dues au transit de l'eau de mer à travers le lac puis son infiltration à travers les formations géologiques comme l'avait signalé (GIGG, 1983). Par ailleurs les modèles de TDEM effectuées présentent généralement une succession de 4 couches d'épaisseurs variables avec des profondeurs d'investigations qui varient entre 40 et 75m. Les résistivités correspondantes à l'interface d'intrusion saline sont inférieures à 10 ohms.m. Cette interface se situe à des profondeurs comprises entre 15 et 50m (Figure 4). Ces valeurs confirment par endroits les profondeurs de l'interface déduite de la formule de Ghyben-Hezberg et sont proches de celles obtenues

par Yalo et al., 2020 sur la plaine de Sèmè-Kpodji à l'Ouest de notre zone d'étude. De la carte piézométrique et des différents sondages TDEM, il ressort que les zones où le front salin est proche correspondent aux zones de dépressions piézométriques. La piézométrie a donc une incidence sur la Géométrie du milieu. En confrontant les résultats des deux méthodes, on constate que la formule hydrostatique surestime à certains endroits la profondeur du front salin par rapport à la méthode TDEM. Une analyse conjointe avec les logs stratigraphiques des forages de proximité pourra permettre une validation des résultats.



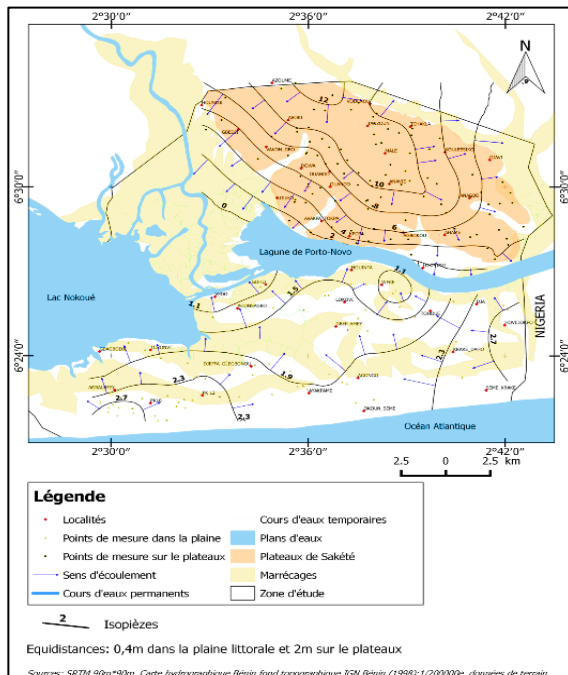


Figure 2 : Carte piézométrique des nappes superficielles de la plaine littorale et du plateau de Sakété

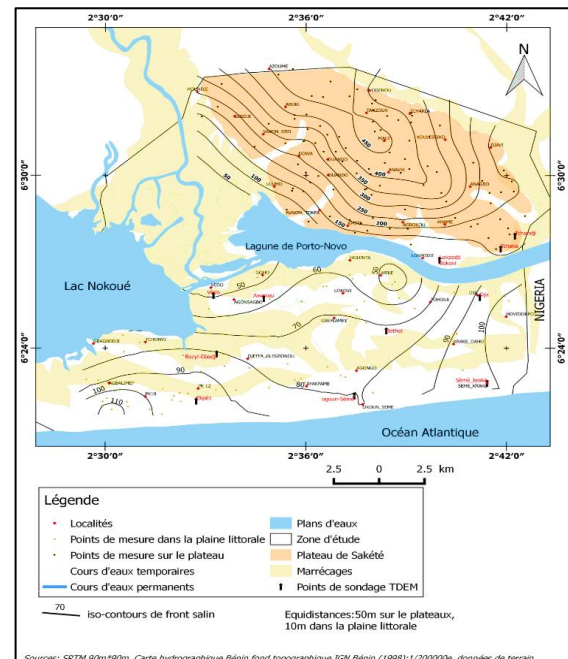


Figure 3 : Carte des profondeurs de l'interface eau douce-eau salée de la nappe superficielle du plateau de Sakété et de sa plaine littorale estimée par l'Approche de Ghyben- Herzberg et des sondage TDEM

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les aquifères superficiels du plateau de Sakété et de sa plaine littorale sont sensibles aux risques d'intrusion saline. Cette vulnérabilité peut être accentuée (1) à la suite d'un pompage intensif ou (2) en cas de remontée du niveau de la mer à cause du réchauffement climatique, (3) à la forte concentration de la population due à la mise en place de la zone balnéaire. Les sondages TDEM ont confirmés dans certaines zones les profondeurs de l'interface eau douce eau salée définies par la formule hydrostatique. L'intrusion saline proviendrait des plans d'eau reliés à l'Océan Atlantique. La plaine littorale semble plus vulnérable que le plateau partiellement protégé par sa topographie. En perspective, (1) le développement d'un modèle de compréhension de la géométrie et du fonctionnement de l'aquifère du Mio-Pliocène permettrait une gestion durable et optimale de la ressource en eau souterraine. (2) le développement d'un modèle hydrogéologique de transfert des solutés dans la nappe phréatique pourra aider à délimiter les périmètres de protection du champ de captage de Ouando à Porto-Novo.

REMERCIEMENTS

Laboratoire d'hydrologie Appliquée (LHA) ; Institut de Recherche Pour le Développement (IRD)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALASSANE A., (2004) Etude hydrogéologique du Continental Terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. THS. Doctorat ès-Science. Univ. C. A. Diop de Dakar. 160p + annexes.
- DORFLIGER N., (2013). ; Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral Géosciences, pp.74-81. « Hal01062271 »
- GIGG ou IGIP - GKW- GRAS, (1983)., Plan directeur alimentation en eau potable de la ville de Cotonou. Les ressources en eau. Ministère de l'industrie des Mines et de l'énergie SBEE"2 VOL.
- YALO E. Nicaise, R. CHODATON Hercule, KOUNIKA Elie, BOUCHER Marie et ALLE Christian (2020) : Délimitation géophysique de l'interface eau douce - eau salée dans les sables bruns de la plaine côtière de la commune de Sèmè-kpodji. Afrique SCIENCE 16(2) pp 206 – 216. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>.

Relier les propriétés géophysiques aux
paramètres physico-chimiques

MODELISATION PETROPHYSIQUE DES PROCESSUS DE BIODEGRADATION

ZOHORÉ U.L.^{1,2}, JOUGNOT D.¹, GUÉRIN R.¹, KESSOURI P.², DEPARIS J.²

¹ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 75005 Paris, France, zohore.urie@gmail.com

² BRGM, Service Géologique National, 45060 Orléans, France, zohore.urie@gmail.com

RESUME

Quelques articles scientifiques portent sur le développement de modèle permettant de décrire en courant alternatif la conductivité électrique des milieux poreux, d'une suspension colloïdale de bactéries et d'une suspension de bactéries en milieu poreux. Ces références permettent de poser les bases d'une étude des relations pétrophysiques reliant conductivité complexe (ou sa réciproque la résistivité complexe) et processus de biodégradation de polluants organiques.

Mots clés : Modélisation, polarisation provoquée, biodégradation, polluants organiques

ABSTRACT

A number of scientific articles have been published on the development of models describing the electrical conductivity of porous media, bacterial colloidal suspension and bacterial suspension in porous media in alternating current. These references lay the groundwork for a study of the petrophysical relationships between complex conductivity (or inversely complex resistivity) and biodegradation of organic pollutants.

Key words: Modeling, induced polarization, biodegradation, organic pollutants

INTRODUCTION

Les sols pollués sont le plus souvent la conséquence d'activités anthropiques plus ou moins récentes, et constituent des problèmes sociétaux majeurs. Une étude récente (Froger et al., 2021) estime que 30% de la superficie de la France présente des concentrations en HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) des sols supérieures à 100 µg.kg⁻¹. Les polluants une fois dans le sol représentent un risque pour les eaux souterraines et les captages d'alimentation en eau potable.

La polarisation provoquée (PP) est une extension de la méthode de la résistivité électrique en courant continu utilisée afin de mesurer la conductivité électrique complexe. Cette conductivité permet d'obtenir les propriétés de conduction et de chargeabilité du milieu. La PP peut être mesurée suivant deux manières (Ghorbani, 2007) : temporelle et fréquentielle (ou spectrale). La polarisation provoquée spectrale (PPS) mesure les paramètres électriques basse fréquence sur un spectre allant typiquement de 1 mHz à 10 kHz. Quoique de nombreux travaux aient souligné la sensibilité de la PPS à la croissance bactérienne, à la biodégradation, aux activités bactériennes telles que la production de minéraux et de biofilms (Abdel Aal et al., 2010, 2004 ; Atekwana et Slater, 2009 ; Davis et al., 2006 ; Kessouri et al., 2019 ; Ntarlagiannis et al., 2005 ; Personna et al., 2008 ; Slater et al., 2007 ; Zhang et al., 2014), toutes ces études se sont bornées à observer ces phénomènes sans les quantifier. A ce jour, très peu de travaux ont été menés pour étudier quantitativement les réponses PP des bactéries en milieu poreux. Dans le cadre du projet ANR IMAGE qui vise à étudier la réponse PP de la biodégradation sur plusieurs échelles de mesure allant de l'échelle du pore à l'échelle de la parcelle, cette étude quantitative va être menée. Avant de mener cette étude, nous présentons ici une revue d'articles portant sur le développement de modèle permettant de décrire en courant alternatif la conductivité électrique des milieux poreux, d'une suspension colloïdale de bactéries et d'une suspension de bactéries en milieu poreux.

MODELES PETROPHYSIQUES

Conductivité électrique en courant alternatif

Si la conductivité en courant continu fournit des informations utiles concernant le milieu poreux, la conductivité en courant alternatif est encore plus intéressante. En effet, différents mécanismes de nature physique ou chimique interviennent en fonction de la fréquence du signal émetteur, et peuvent donc être dissociés.

Debye (1929) a proposé un modèle qui a servi de point de départ utile pour l'étude des processus de polarisation de fluides dipolaires. Dans les fluides dipolaires, comme l'eau, la polarisation d'un milieu est essentiellement due à l'orientation des molécules à moment dipolaire permanent par rapport au champ électrique imposé. En étudiant les résultats expérimentaux de la polarisation de composés liquides tels que les glycols et la glycérine, Cole et Cole (1941) ont observé que ces résultats étaient difficilement représentés par un demi-cercle (résultats attendus selon la théorie de Debye, 1929) dans un diagramme d'Argand (partie imaginaire en fonction de la partie réelle des paramètres électromagnétiques complexes). Les auteurs ont donc proposé une meilleure approximation des données expérimentales qui tient compte de la largeur des temps de relaxation associés aux différents éléments polarisables dans le milieu. Après une étude des propriétés diélectriques de la glycérine, Davidson et Cole (1951) ont découvert que les propriétés diélectriques de la glycérine n'étaient pas circulaire (résultats attendus selon la théorie de Cole et Cole, 1941) mais asymétrique. Ils incluent un coefficient α qui permet d'introduire un comportement dissymétrique, observé lors des mesures. Le modèle de Cole-Cole généralisé est un modèle à 5 paramètres :

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{((1 + (i\omega\tau_0)^c)^\alpha)} \right) \right],$$

avec ρ_0 , la résistivité électrique en courant continu, m , la chargeabilité intrinsèque du modèle Cole-Cole, τ_0 , le temps de relaxation du système, c , l'exposant du modèle Cole-Cole et α une constante liée à la largeur de la distribution. Cette expression permet de retrouver plusieurs modèles empiriques en posant certains paramètres égaux à 1.

Conductivité électrique d'une suspension colloïdale de bactéries

Un nombre important d'études en chimie colloïdale ont mesuré puis modélisé plusieurs mécanismes de polarisation associés aux suspensions de bactéries à l'aide de la spectroscopie diélectrique (méthode analogue à la PPS). Dans le cas d'une suspension cellulaire, les différents mécanismes de polarisation sont considérablement influencés par les propriétés des organismes. Cette sensibilité a permis à la spectroscopie diélectrique de contribuer à la compréhension des structures cellulaires.

La polarisation de type Gamma se produit entre le GHz et le THz et résulte des contributions de la relaxation de l'eau liée autour de la surface de la cellule et de la différence de permittivité entre l'intérieur de la cellule et l'électrolyte (Grosse, 2002). La polarisation de type Delta se déroule dans les gammes hautes du MHz et dépend essentiellement de la conductivité intracellulaire et de la relaxation de l'eau liée aux macromolécules intracellulaires (Irimajiri et al., 1987). Ainsi, la polarisation de type Delta est dépendante de la taille de la cellule (Grosse, 2002 ; Irimajiri et al., 1987). La polarisation de type Bêta prend place aux basses gammes du MHz et est principalement liée à la structure diélectrique de la membrane cellulaire, ainsi dépendante de l'épaisseur de la membrane (Irimajiri et al., 1987; Prodan and Prodan, 1999). La polarisation de type Alpha se produit en dessous du kHz et résulte de la mise en place de la double couche électrique, soit l'accumulation de charges autour de la membrane cellulaire, qui ne se développe qu'à cette plage de fréquences (Atekwana et Slater, 2009 ; Dukhin et al., 1974 ; Grosse, 2002 ; Prodan et Prodan, 1999, van der Wal et al., 1997).

Revil et al. (2012) ont proposé un modèle pour décrire la polarisation basse fréquence d'une suspension bactérienne. Ils établissent une analogie entre la polarisation des particules d'argile, qui semble être liée à la formation de la double couche électrique plus particulièrement à la présence de la couche de Stern et celle des bactéries. De ce fait, la conductivité d'une suspension bactérienne est contrôlée par la quantité de bactéries dans le milieu et leurs conductivités de surface. Contrairement à l'approche de Revil et

al. (2012), Zhang et al. (2014) ont proposé un modèle linéaire décrivant la relation entre conductivité imaginaire et abondance bactérienne au lieu de modéliser la courbe de polarisation. Toutefois, il faut noter que ce modèle ne parvient à prédire que qualitativement la conductivité imaginaire en raison probablement d'une approche linéaire simplificatrice.

Conductivité électrique d'une suspension de bactéries dans un milieu poreux

Heenan et al. (2013) ont utilisé la méthode de la décomposition de Debye afin de suivre l'évolution temporelle de la chargeabilité. Dans leur cas d'étude, les auteurs ont mis en évidence le fait que les variations de chargeabilité étaient étroitement liées à celles de la conductivité imaginaire et donc à l'évolution bactérienne. Par ailleurs, Mellage et al. (2018) ont souligné le lien existant entre le temps de relaxation (obtenu après avoir fait correspondre un modèle Cole-Cole aux mesures de PPS) et les activités bactériennes. Ainsi, les auteurs indiquent que le temps de relaxation pourrait être lié aux conditions énergétiques du milieu ; conditions auxquelles sont soumis la croissance et l'activité bactérienne. Quoique Heenan et al. (2013) et Mellage et al. (2018) n'aient pas développé de modèle particulier pour l'interprétation quantitative des signaux électriques dans le cadre de processus biogéochimiques, ces auteurs ont utilisé des modèles préexistants (ex : type Cole-Cole) pour des applications à la modélisation de la réponse PPS de milieux contenant des bactéries. Suivant une tout autre approche, Zhang et Furman (2023) ont utilisé des méthodes statistiques pour établir des relations entre les processus biogéochimiques et les signaux géoélectriques. Revil et al. (2012), se basant sur l'approche décrite au paragraphe précédent, ont modélisé la réponse PPS de bactéries en milieu poreux. De plus, supposant une relation de proportionnalité entre la conductivité imaginaire macroscopique et la densité bactérienne, les auteurs ont proposé des formulations modélisant les phases de croissance et décroissance bactérienne. Finalement, Zhang et al. (2014) ont identifié une relation linéaire entre la conductivité imaginaire totale du milieu, la densité bactérienne et la conductivité imaginaire des minéraux constituant le milieu poreux.

CONCLUSIONS

Cette revue a présenté un ensemble de modèles décrivant la conductivité électrique complexe associée à différents milieux. Elle permet d'établir les bases de travaux futurs consacrés à l'étude des relations pétrophysiques reliant conductivité complexe et processus de biodégradation. Revil et al. (2012) et Zhang et al. (2014) se sont limités à établir une relation entre le signal PPS et la densité bactérienne. Suivant une approche en laboratoire et numérique, nous envisageons non seulement d'évaluer les modèles pétrophysiques existants mais aussi de les étendre afin de prendre en compte dans la formulation finale la teneur en polluants organiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel Aal G.Z., Atekwana E.A., Rossbach S., Werkema D.D., 2010** – Sensitivity of geoelectrical measurements to the presence of bacteria in porous media. *Geophysical Research Letters*. 115(G3).
- Abdel Aal G.Z., Atekwana E. A., Slater, L.D., Atekwana E. A., 2004** – Effect of different phases of diesel biodegradation on low frequency electrical properties of unconsolidated sediments. *Geophysical Research Letters*, 386–395.
- Atekwana E.A., Slater L.D., 2009** – Biogeophysics: A new frontier in Earth science research. *Reviews of Geophysics*, 47, RG4004.
- Cole K.S., Cole R.H., 1941** – Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 9, 341–351.
- Cosenza P., Ghorbani A., Camerlynck C., Rejiba F., Guérin R., Tabbagh A., 2009** – Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variables in geomaterials: a review. *Near Surface Geophysics* 7, 563–578.

- Davidson D.W., Cole R.H., 1951** – Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol, and n-propanol. *The Journal of Chemical Physics*, 19, 1484–1490.
- Davis C.A., Atekwana E., Atekwana, E., Slater, L.D., Rossbach S., Mormile M.R., 2006** – Microbial growth and biofilm formation in geologic media is detected with complex conductivity measurements: microbial growth and geophysics. *Geophysical Research Letters*, 33, L18403.
- Debye P.J.W., 1929** – Polar molecules. *Dover publications*.
- Dukhin S.S., Shilov V.N., Bikerman J.J., 1974** – Dielectric phenomena and double layer in disperse systems and polyelectrolytes. *Journal of the Electrochemical Society* 121, 154C.
- Froger C., Saby N., Jolivet C.C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., de Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A., 2021** – Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *Soil*, 7, 161–178.
- Ghorbani A., 2007** – Contribution au développement de la résistivité complexe et à ses applications en environnement. Mémoire de thèse de doctorat. *Université Pierre-et-Marie-Curie-Paris 6*.
- Grosse C., 2002** – Relaxation mechanisms of homogeneous particles and cells suspended in aqueous electrolyte solutions. *Interfacial electrokinetics and electrophoresis*, 106, 279–327.
- Heenan J., Porter A., Ntarlagiannis D., Young L.Y., Werkema D.D., Slater, L.D., 2013** – Sensitivity of the spectral induced polarization method to microbial enhanced oil recovery (MEOR) processes. *Geophysics*, 78, E261–E269.
- Irimajiri A., Asami K., Ichinowatari T., Kinoshita Y., 1987** – Passive electrical properties of the membrane and cytoplasm of cultured rat basophil leukemia cells. I. Dielectric behavior of cell suspensions in 0.01–500 MHz and its simulation with a single-shell mod. *Biochimica et Biophysica Acta Biomembranes*, 896, 203–213.
- Kessouri P., Furman A., Huisman J.A., Martin T., Mellage A., Ntarlagiannis D., Bucker M., Ehosioko S., Fernandez P., Flores-Orozco A., 2019** – Induced polarization applied to biogeophysics: recent advances and future prospects. *Near Surface Geophysics*, 17, 595–621.
- Mellage A., Smeaton C.M., Furman A., Atekwana E.A., Rezanezhad F., Van Cappellen, P., 2018** – Linking spectral induced polarization (SIP) and subsurface microbial processes: Results from sand column incubation experiments. *Environmental science & technology*, 52, 2081–2090.
- Ntarlagiannis D., Williams K.H., Slater L., Hubbard S., 2005** – Low-frequency electrical response to microbial induced sulfide precipitation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 110, G02009.
- Personna Y.R., Ntarlagiannis D., Slater L., Yee N., O'Brien M., Hubbard S., 2008** – Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113, G02020.
- Prodan C., Prodan E., 1999** – The dielectric behaviour of living cell suspensions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32, 335.
- Revil A., Atekwana E., Zhang C., Jardani A., Smith S., 2012** – A new model for the spectral induced polarization signature of bacterial growth in porous media. *Water Resources Research*, 48 (9), W09545.
- Slater L., Ntarlagiannis D., Personna Y.R., Hubbard S., 2007** – Pore-scale spectral induced polarization signatures associated with FeS biomineral transformations. *Geophysical Research Letters*, 34, L21404.
- van der Wal A., Norde W., Zehnder A.J., Lyklema J., 1997** – Determination of the total charge in the cell walls of Gram-positive bacteria. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 9, 81–100.
- Zhang C., Revil A., Fujita Y., Munakata-Marr J., Redden, G., 2014** – Quadrature conductivity: A quantitative indicator of bacterial abundance in porous media. *Geophysics*, 79, D363–D375.
- Zhang Z., Furman A., 2023** – Statistical analysis for biogeochemical processes in a sandy column with dynamic hydrologic regimes using spectral induced polarization (SIP) and self-potential (SP). *Geophysical Journal International*, 233, 564–585.

LE PROSPECTEUR DOIT-IL PRENDRE EN COMPTE LA POLARISATION ELECTRIQUE DANS LA GAMME DE FREQUENCE 10 KHZ– 100 KHZ ?

TABBAGH A.¹, SIMON F.-X.², VITALE Q.³

¹ Sorbonne-Université, UMR7619 Métis, Paris, France, alain.tabbagh@upmc.fr

² Inrap, UMR 6249 Chrono-Environnement, Dijon, France, francois-xavier.simon@inrap.fr

³ Éveha International, Université de Lyon, UMR5133-Archeorient, France, quentin.vitale@eveha.fr

RESUME

Les méthodes électromagnétiques et électrostatique adaptées à l'exploration du proche sous-sol utilisent la gamme de fréquence [10 kHz – 100 kHz] où la conductivité électrique et la susceptibilité magnétique sont habituellement prises en compte dans l'interprétation. Il faut aussi prendre en compte et cartographier la polarisation électrique, comme l'illustre les mesures EMI présentées ici.

Mots clés : Permittivité, gamme [10 kHz – 100 kHz], méthodes électromagnétique et électrostatique

ABSTRACT

In Near-Surface surveying, electromagnetic and electrostatic methods use the [10 kHz – 100 kHz] frequency range. There, the electrical conductivity and the magnetic susceptibility are commonly considered for interpretation. The presentation defends and illustrates the additional need for consideration of the electrical polarization.

Key words: Permittivity, [10 kHz – 100 kHz] range, electromagnetic & electrostatic methods

INTRODUCTION

La recherche de méthodes permettant de décrire la résistivité électrique des sols et formations superficielles de façon plus rapide et aisée qu'avec la prospection électrique traditionnelle par injection galvanique du courant, a conduit à utiliser d'une part la méthode électrostatique (CCR *Capacitively Coupled Resistivity*) et d'autre par des méthodes électromagnétiques (EMI *ElectroMagnetic Induction*). La profondeur de pénétration recherchée et les contraintes techniques liées à l'émission et à la mesure des champs électrique ou magnétique ont conduit à se focaliser sur la gamme de fréquence 10 kHz– 100 kHz.

Dans cette gamme, comme le montrent les équations de Maxwell, ce sont trois propriétés qu'il faut *a priori* prendre en compte, la conductivité électrique, σ , la permittivité diélectrique, $\epsilon_0\epsilon_r$ et la susceptibilité magnétique complexe, κ . Le rôle de cette dernière a été mis en évidence en prospection archéologique il y a plus de 50 ans et les conditions de sa mesure avec les instruments EMI sont aujourd'hui relativement bien définies. La permittivité diélectrique, qui correspond à l'existence d'une polarisation électrique dans le milieu étudié, se traduit en régime fréquentiel par l'existence du courant de déplacement, $i\omega\epsilon_0\epsilon_r E$ (où ω est la pulsation, E le champ électrique et $i^2=-1$), qui s'ajoute au courant de conduction σE . La méthode électrostatique étant souvent mise en œuvre dans des milieux résistants, la détermination des deux propriétés y a été pratiquée d'emblée. La preuve expérimentale de l'influence de la permittivité sur les mesures EMI n'a en revanche été apportée que récemment (Benech *et al.* 2016), alors que deux raisons concourent à sa prise en compte dans l'interprétation des mesures : (1) sa détermination est nécessaire à une évaluation correcte de la conductivité et de la susceptibilité, et (2) elle peut apporter une information inédite *a priori* non négligeable.

VALEUR DE LA PERMITTIVITE RELATIVE DANS LA GAMME 10 kHz – 100 kHz

Par la bibliographie

Le nombre de publications traitant du cas des fréquences « intermédiaires » est nettement plus faible que celui des fréquences plus faibles -où l'intérêt pour la polarisation provoquée (SIP, *Spectral Induced Polarisation*) a été renouvelé par les études environnementales- ou que celui des hautes fréquences où le radar-sol (GPR, *Ground Probing Radar*) et la mesure de la teneur en eau par TDR (*Time Domain Reflectometry*) ont été largement développés. Il a néanmoins été possible de montrer que les valeurs peuvent dépasser $\epsilon_r=10000$, qu'une corrélation existe avec les valeurs de conductivité et que la granularité et la teneur en eau jouent des rôles importants (Tabbagh *et al.* 2021).

Par mesure directe sur échantillon au laboratoire

Les mesures en laboratoire réalisées par notre équipe (Souffaché *et al.* 2021) avec des échantillons de volume représentatif de matériaux inhomogènes (500 cm³) ont confirmé l'ordre de grandeur de cette propriété. Ils ont permis de montrer une variation avec la teneur en eau différente de celle de la conductivité : Fig. 1.

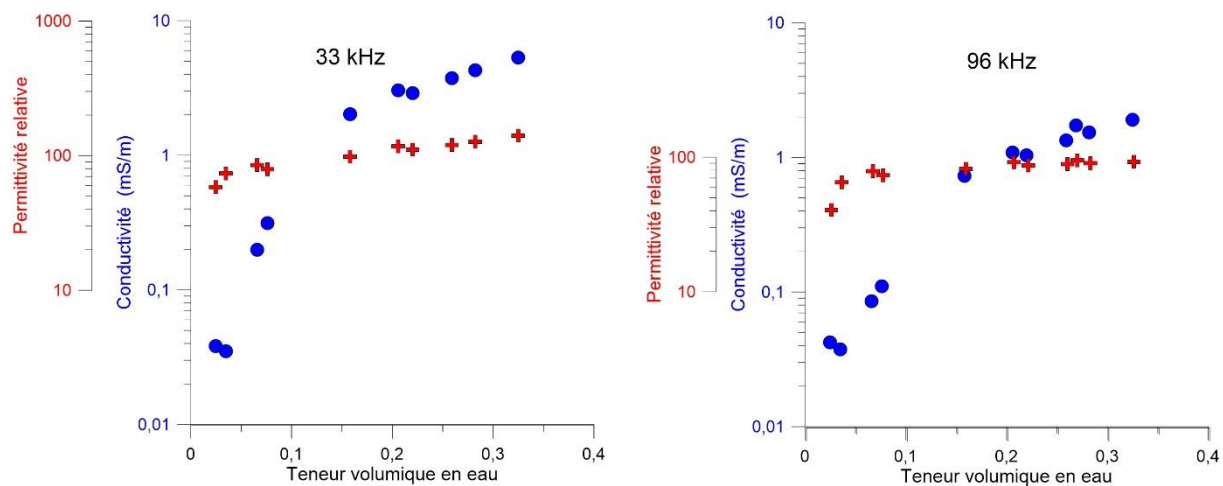


Fig. 1 –Variations de la conductivité électrique et de la partie réelle de la permittivité diélectrique relative avec la teneur volumique en eau pour un sol de limon aux fréquences de 33 kHz et 96 kHz.

EXEMPLES *IN SITU* AVEC DES APPAREILS 'EMI'

Réponses théoriques et cartographie des propriétés apparentes

La solution analytique du calcul de la réponse obtenue sur un terrain tabulaire (1D) avec un appareil EMI (émission par un dipôle magnétique, réception par un dipôle magnétique) est bien connue. Elle tient compte des trois propriétés, des paramètres géométriques et se présente sous la forme de transformées d'Hankel (Thiesson *et al.* 2014). Le calcul de ces transformées par filtrage est rapide. Il est toutefois intéressant d'utiliser une série d'approximations (sol homogène, susceptibilité magnétique nulle, altitude de mesure nulle, faible nombre d'induction) pour obtenir une expression simple permettant d'évaluer quelle propriété aura un rôle dominant et de le quantifier approximativement. La société Geonics (McNeill 1980) a permis un large développement de l'emploi des appareils EMI en cartographie des sols en proposant la définition d'une conductivité apparente à partir de la réponse en quadrature: $Qu\left(\frac{H_s}{H_p}\right) = -\frac{i\sigma\mu_0\omega L^2}{4}$ (où H_s est le champ secondaire, H_p le champ primaire, L l'écart entre émission et réception et μ_0 la perméabilité magnétique du vide). En remplaçant dans cette formule σ par $i\omega\epsilon_0\epsilon_r$ on obtient une réponse en phase $Ph\left(\frac{H_s}{H_p}\right) = \frac{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\omega^2 L^2}{4}$ qui serait donc proportionnelle à la permittivité mais aussi au carré de la fréquence et au carré de l'écartement.

Effectivement, le calcul sans approximation montre bien que dans la gamme considérée, la réponse due à la permittivité est fortement croissante avec la fréquence, linéaire et principalement en phase, où elle se superpose à l'effet de la susceptibilité magnétique. Les coefficients de proportionnalité étant différents entre les configurations (HCP, VCP ou PERP), il est possible, en utilisant à la même position les mesures de deux configurations différentes, de définir une permittivité diélectrique apparente et une susceptibilité magnétique apparente (Benech *et al.* 2016).

Exemple 1 : site de Pyrgi (Toscane, Italie), CMD-Explorer en configuration HCP

Le but de ce traitement est d'obtenir des valeurs de permittivité sur ce site.. L'appareil a été utilisé en configuration HCP seulement, avec une altitude de mesure estimée à 0,9 m, une fréquence $f=10$ kHz et trois écartements de bobines, $L_1=1,48$ m, $L_2=2,82$ m, $L_3=4,49$ m. Il n'y a eu ni test de la variation des réponses en phase et en quadrature avec l'altitude de mesure ni vérification du signe de la réponse en phase avec une boule métallique amagnétique. Cependant la configuration HCP montre une meilleure sensibilité à la permittivité et une décroissance de la réponse de la susceptibilité magnétique avec l'altitude de mesure plus rapide que la configuration VCP. Il en résulte (tableau 1) une incertitude sur la permittivité qui reste néanmoins limitée par rapport aux valeurs cartographiées.

Ph (Hs/Hp) ϵ_r équivalent à $\kappa_{ph}=50$. 10^{-5} uSI.		1,48 m	2,82 m	4,49 m
	HCP	3331	274	578
	VCP	7436	3140	1346

Tableau 1 : Valeurs de la permittivité diélectrique que devrait avoir un sol homogène pour produire la même amplitude de réponse en phase que celle d'un sol dont la susceptibilité magnétique est $50 \cdot 10^{-5}$ uSI ($h=0,9$ m, $f=10$ kHz).

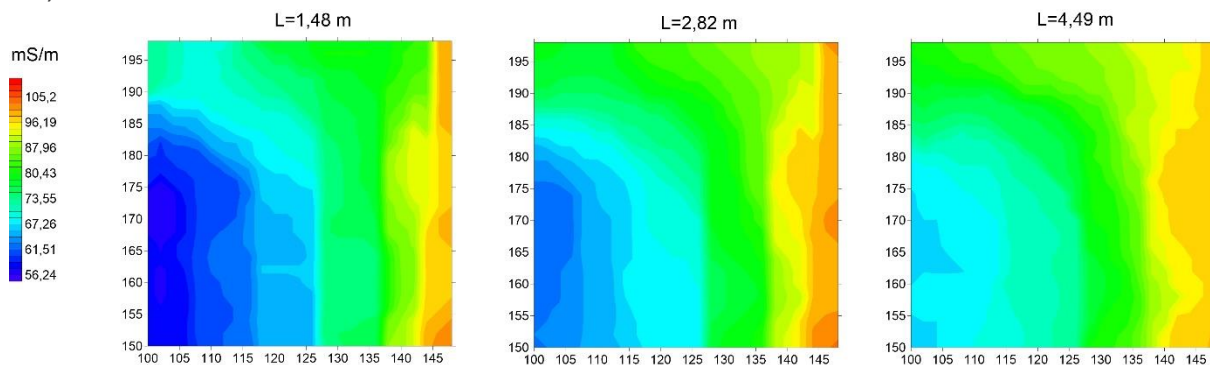


Fig. 2 : Conductivité apparente sur le carré 15 du site de Pyrgi (Toscane, Italie)

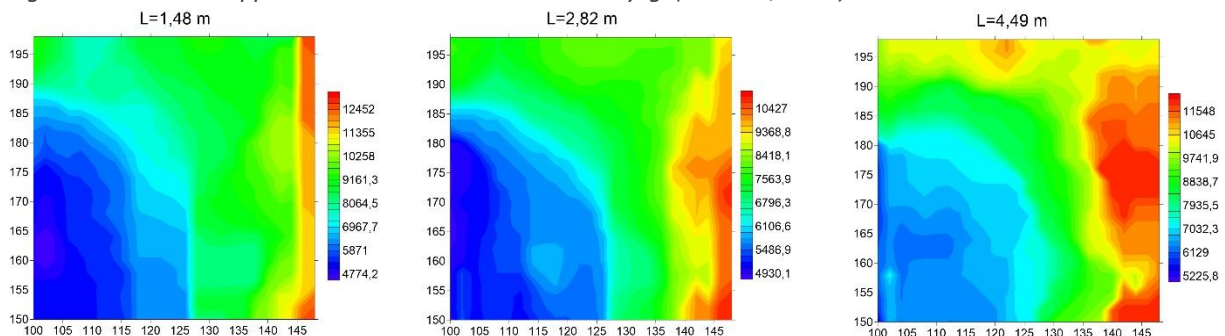


Fig. 3 : Permittivité relative apparente sur le carré 15 du site de Pyrgi (Toscane, Italie)

Exemple 2 : site de Bourbourg (Nord, France), GEM-2 en configuration HCP

Cet appareil est actuellement le seul du commerce à permettre un choix de fréquence (au nombre de 5) dans la gamme [10 kHz – 100 kHz]. Il mesure la différence des champs secondaires entre deux réceptrices montées en opposition et situées à 1,66 m et 1,035 m de l'émettrice, de telle sorte que l'effet du champ primaire est annulé. Cette disposition complexifie cependant la variation de la réponse en phase avec l'altitude comme la réponse des corps 3D. Sur ce site, l'appareil a été tracté sur une luge à une altitude de $h=0,2$ m en configuration HCP.

Ph (Hs/Hp)		5010 Hz	10350 Hz	21390 Hz	44250 Hz	91470 Hz
ϵ_r équivalent à	HCP	248192	58855	13957	3080	730
$\kappa_{ph}=50 \cdot 10^{-5}$ uSI.	VCP	104661	24819	5886	1396	307

Tableau 2 : Valeur de la permittivité diélectrique que devrait avoir un sol homogène pour produire, dans la configuration géométrique du GEM-2 et en fonction de la fréquence, la même amplitude de réponse en phase que celle d'un sol dont la susceptibilité magnétique serait de $50 \cdot 10^{-5}$ uSI

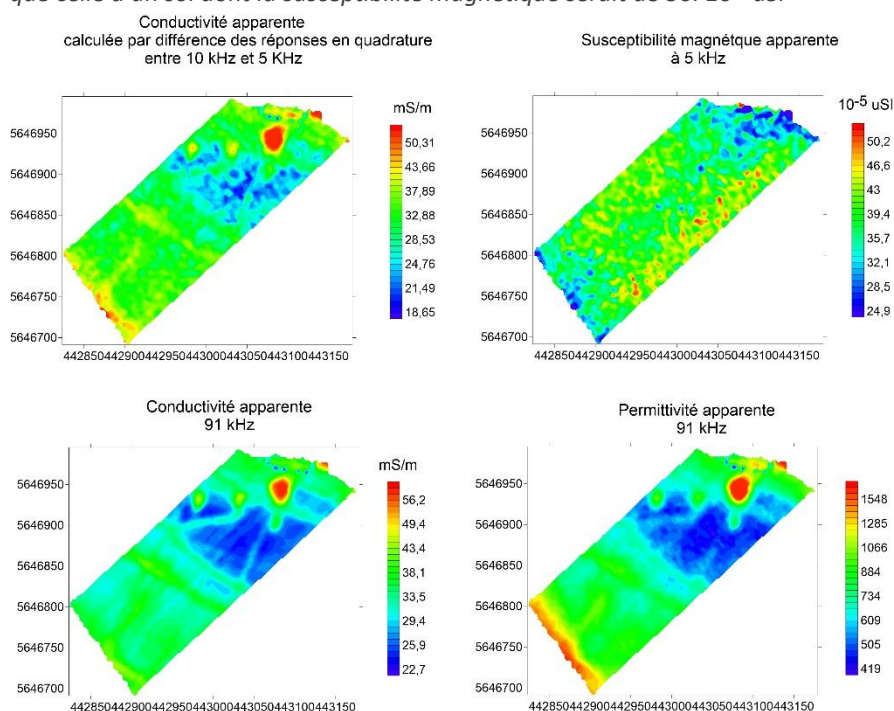


Fig. 5 : A 5 kHz la réponse en phase est interprétée en susceptibilité magnétique, à 91 kHz en permittivité

CONCLUSIONS

Les exemples présentés montrent qu'il serait préjudiciable de négliger l'effet de la permittivité diélectrique qui s'avère significatif dès lors que l'on monte en fréquence ou que l'on augmente l'écartement des bobines. Il est indispensable de prendre en compte l'effet de cette propriété pour s'affranchir des erreurs d'interprétation mais aussi pour mettre en évidence des phénomènes non perceptibles par le seul biais de la conductivité électrique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BENECH C., LOMBARD P., REJIBA F., TABBAGH A., 2016 - Demonstrating the contribution of dielectric permittivity to the in-phase EMI response of soils: example of an archaeological site in Bahrain. *Near Surface Geophysics*, 14-4, 337-344.

McNEILL J. D., 1980 - Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number, *TN-6, Geonics Ltd*, 13 pages.

SOUFFACHE B., TABBAGH A., 2021 - Laboratory study of the electrical properties of Lutetian limestones in the 100 Hz to 10 MHz frequency range. *Near Surface Geophysics*, 19-5, 573-582.

TABBAGH A., REJIBA F., FINCO C., SCHAMPER C., SOUFFACHE B., CAMERLYNCK C., THIESSON J., JOUGNOT D., MAINEULT A., 2021 - The case for considering polarization in the interpretation of electrical and electromagnetic measurements in the 3 kHz to 3 MHz frequency range. *Surveys in Geophysics*, 42-2, 377-397.

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.

CONTRIBUTION DES SONDAGES PAR RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE (RMP) A L'IDENTIFICATION DES SITES DE FORAGES PRODUCTIFS POUR UN DEVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION DANS LA BASSE TERRASSE DU FLEUVE NIGER

ABDOU MAHAMAN R.¹, ISSOUFOU OUSMANE B.¹, NAZOU MOU Y.¹, BOUCHER M.^{1,2},
FAVREAU G.^{2,3}, LEGCHENKO A.².

¹Département de Géologie, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger

²Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

³Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 276 Avenue de Maradi, BP 11416, Niamey, Niger

RESUME

Dans les régions semi-arides, les eaux souterraines constituent la principale eau douce accessible pour un développement de l'irrigation. Les vallées alluvionnaires et les terrasses du fleuve Niger constituent les sites les plus favorables pour un développement de l'irrigation. Des sondages géophysiques par Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés dans la basse terrasse du fleuve Niger pour identifier les niveaux aquifères les plus productifs. Les résultats ont révélés deux horizons aquifères, le 1^{er} avec une teneur en eau qui varie 15 à 27% et le 2^{ème} horizon qui présente une teneur en eau très faible (~ 8 %).

Mots clés: Sahel, Basse terrasse du fleuve Niger, Développement de l'irrigation

ABSTRACT

In the semi-arid regions, groundwater is the main accessible fresh water for irrigation development. The alluvial valleys and terraces of the Niger River are the most favorable sites for irrigation development. The Magnetic Resonance Sounding (MRS) geophysical surveys were carried out in the Niger River lower terrace to identify the most productive aquifer levels. The results revealed two horizons aquifers, the first with a water content that varies from 15 to 27% and the second horizon has a very low water content (~8%)

Keywords: Sahel, River Niger lower terrace, Irrigation development

INTRODUCTION

Le Niger, pays semi-aride aux trois quart désertique, est confronté depuis plus de cinq décennies à une insécurité alimentaire chronique engendrée par les épisodes de sécheresses Nazoumou et al. (2016), qui deviennent récurrentes depuis les années 1970. La production agricole qui dépend grandement de la pluviométrie devient très déficitaire Panthou et al. (2012), exposant la population rurale à la famine. Pour atténuer ces effets, le recours aux nappes d'eau souterraine peu profondes,

facilement accessibles pour l'irrigation s'avère une alternative crédible afin de garantir durablement l'autosuffisance alimentaire et améliorer le revenu de populations Nazoumou et al. (2016).

Le bassin hydrographique du fleuve Niger dispose d'importantes ressources en eau souterraine, contenues dans les formations géologiques du bassin des Iullemmeden et dans les alluvions quaternaires de vallées des affluents fossiles et les terrasses du fleuve Favreau et al. (2012).

La basse terrasse du fleuve Niger, qui constitue la zone d'étude, se localise dans la région de Gaya, à l'extrémité sud-ouest du Niger et du bassin des Iullemmeden, grand bassin sédimentaire ouest africain (cf. Fig. 1). L'objectif global de ce travail est de déterminer les points les plus favorables pour la réalisation de forages productifs et les profondeurs prévisionnelles de ces forages et piézomètres au niveau des sites de Sia Kouanza, en utilisant la méthode de Résonance Magnétique Protonique (RMP).

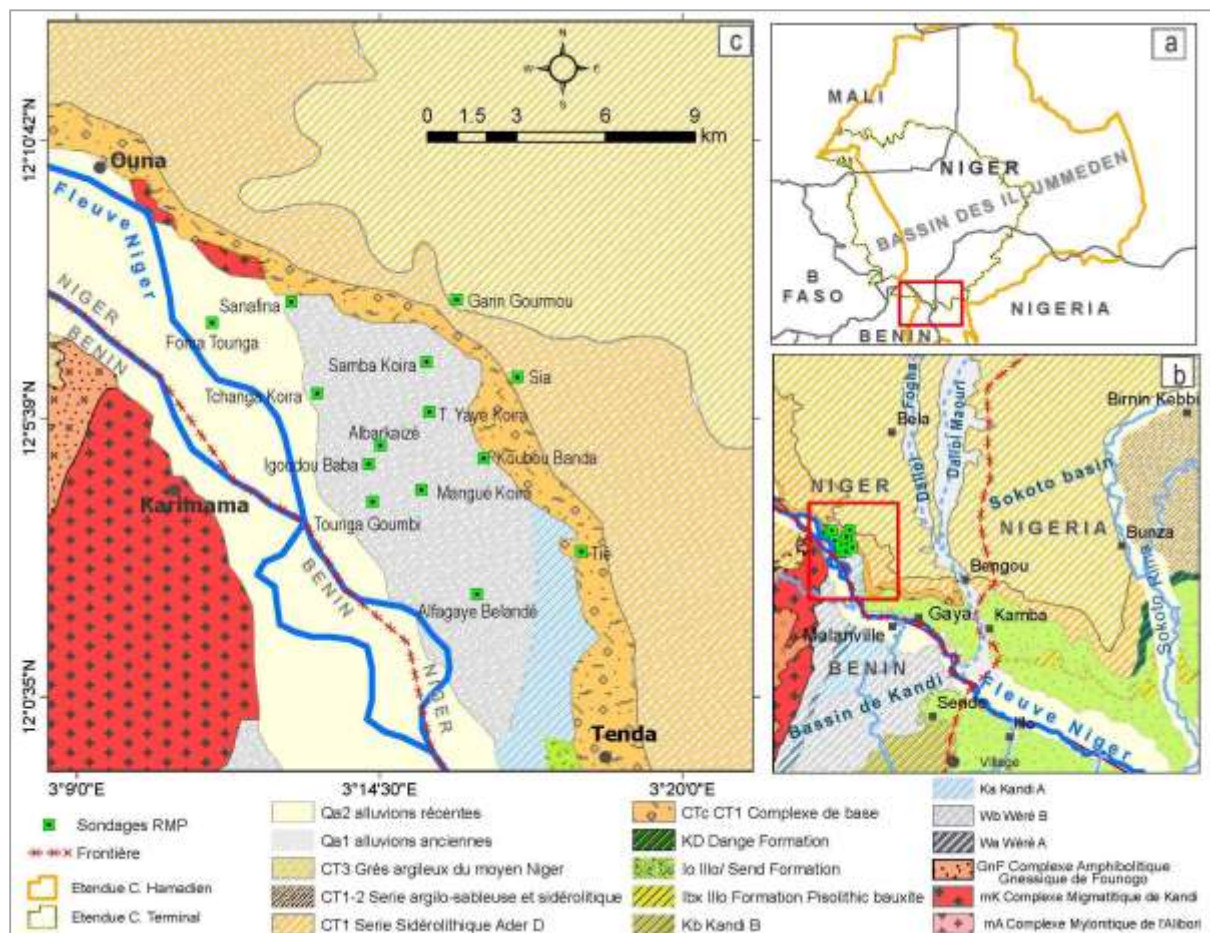


Fig. 1 – Carte de localisation de la basse terrasse du fleuve Niger (a) dans le bassin des Iullemmeden, (b) entre le socle Dahoméen d'âge Protorozoïque au Sud-ouest et la confluence des frontières avec le Bénin et le Nigeria où localement le bassin des Iullemmeden est appelé bassin de Kandi et de Sokoto basin, respectivement, (c) entre les Communes Rurales de Tenda et de Ouna

1. MATERIEL ET METHODE

La méthode géophysique RMP renseigne directement sur la présence ou l'absence des eaux souterraines dans un terrain investigué. Elle permet d'avoir des informations qui sont directement liées à la teneur en eau dans le sous-sol et un temps de relaxation lié à la taille des pores (Legchenko et Valla, 2002).

Le NUMIS^{LITE} qui a une profondeur d'investigation de 50 à 60 m, a été utilisé pour réaliser ce travail. Les câbles électriques (diamètre 6 mm) ont été doublés pour augmenter le courant maximal émis et optimiser une profondeur d'investigation de l'ordre de 80 m. Les données de sondages ont été interprétées avec le logiciel d'inversion et de modélisation SAMOVAR_11x6© en prenant en compte une résistivité électrique donnée par les sondages électriques verticaux réalisés au droit de chaque site d'investigation.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour mieux caractériser les aquifères de la basse terrasse du fleuve Niger, les résultats des sondages réalisés ont été comparés aux formations géologiques de la zone. Les profils de la teneur en eau et du temps de relaxation T_1^* en fonction de la profondeur au niveau du chaque site, montrent une succession de deux strates aquifères de caractéristiques différentes. Les sondages de Tié, Sia et celui de Garin Gourmou (sites tout près du plateau), ont révélés une seule strate aquifère avec des teneurs en eau très faibles.

Sur le transect de Tounga Goumbi–Koubou Banda (cf. Fig. 2), trois sites ont été investigués. L'inversion des sondages montre une succession de deux niveaux aquifères concordants à la géologie de la zone. Le premier niveau aquifère de 25 à 30 m en moyenne, est caractérisé par une teneur en eau qui varie entre 15 et 27% avec un temps de relaxation T_1^* qui fluctue entre 300 et 420 ms. Ce premier niveau aquifère est comparable aux sables alluvionnaires (Quaternaire) et aux grès grossiers du Continental Hamadien. Le deuxième niveau aquifère rencontré à partir de 30 m, caractérisé par une teneur en eau très faible corrélable aux grès argileux du Continental Hamadien. Dans toute la basse terrasse du fleuve Niger, le premier horizon aquifère est caractérisé par une teneur en eau qui fluctue entre 15 et 20% sur une épaisseur moyenne de 25 à 30 m.

CONCLUSION

Les sondages géophysiques par Résonance Magnétique Protonique ont permis de mieux structurer les différents niveaux aquifères dans la basse terrasse du fleuve Niger. Pour le développement de l'irrigation dans la zone d'étude, il est intéressant de réaliser les forages dans les premiers 25 à 30 m

de profondeur que plutôt de faire des forages profonds dans les grès argileux du Continental Hamadien.

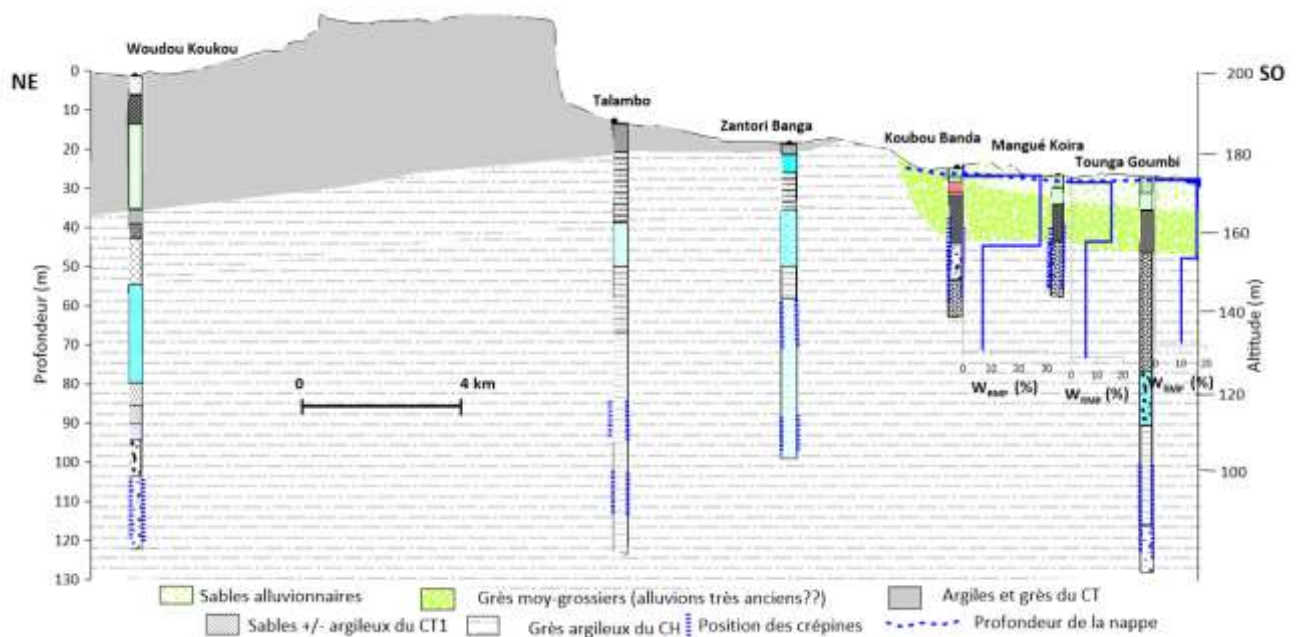


Fig. 2 – Distribution de la teneur en eau en fonction des formations géologiques suivant le transect de Tounga Goumbi – Koubou Banda (cf. Fig. 1)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Favreau V., Nazoumou Y., Leblanc M., Guéro A., Goni I.B., 2012. Groundwater resources increase in the Iullemmeden Basin, West Africa. In *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations* (Pp. 113-128). *CRC Press*.
- Legchenko, A., Valla, P., 2002. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 50(1–2), 3–19. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00127-1)
- Nazoumou, Y., Favreau, G., Adamou, M. M., Mainassara, I., 2016. La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger ? *Cahiers Agricultures*, 25(1). <https://doi.org/10.1051/cagri/2016005>
- Panthou, G., T. Vischel, T. Lebel, J. Blanchet, G. Quantin, Ali A., 2012. Extreme rainfall in West Africa: A regional modeling, *Water Resour. Res.*, 48, W08501. [doi:10.1029/2012WR012052](https://doi.org/10.1029/2012WR012052)

IDENTIFICATION DES AQUIFERES PAR IMAGERIE GEOPHYSIQUE EN ZONE DE MONTAGNE : CAS DES AQUIFERES FRACTURES DE DANANE, OUEST DE LA COTE D'IVOIRE

OUEDRAOGO M.¹, SYLLA I.¹, OUATTARA Z.¹, DIABY A. J.¹, PESSSEL M.², KAMAGATE B.³

¹ Université de Man, Man, Côte d'Ivoire, moussa.ouedroago@univ-man.edu.ci

² Université Paris-Saclay, Labo GEOPS, Orsay, France, marc.pessel@universite-paris-saclay.fr

³ Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, kambamory2@yahoo.fr

RESUME

Dans la région Ouest de la Côte d'Ivoire, la fracturation a été abondamment étudiée dans le but d'une meilleure compréhension du fonctionnement des écoulements souterrains. Cette étude a pour objectif, la caractérisation des fractures les plus productives d'un point de vue hydraulique. La méthode géo-électrique de résistivité électrique a permis d'imager le sous-sol. Les résultats obtenus permettent de distinguer plusieurs structures géologiques afin d'orienter les prospections hydrogéologiques futures et les implantations de forages dans cette région.

Mots clés : Aquifère fracturé, pseudo-section de résistivité apparente, Ouest de la Côte d'Ivoire

IDENTIFICATION OF AQUIFERS USING GEOPHYSICAL IMAGERY IN MOUNTAINOUS AREAS: THE CASE OF FRACTURED AQUIFERS IN DANANE (WESTERN IVORY COAST)

ABSTRACT

In the western region of Côte d'Ivoire, fracturing has been extensively studied with the aim of gaining a better understanding of how underground flows work. The aim of this study is to characterize the most productive fractures from a hydraulic point of view. The geoelectrical method of electrical resistivity was used to image the subsoil. The results obtained enable several geological structures to be distinguished in order to guide future hydrogeological prospecting and drilling in this region.

Key words: Fractured aquifer, apparent resistivity pseudo-section, western Côte d'Ivoire

INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, l'approvisionnement en eau se fait au travers des systèmes d'adduction en eau potable qui captent les eaux souterraines ou de surface (Ouedraogo *et al.*, 2022). Plus des trois quarts des localités de l'intérieur du pays sont alimentées par des nappes souterraines. Ces nappes souffrent de la faiblesse de leur emmagasinement et des périodes sèches induisant un tarissement souvent brusque. Les grandes villes se tournent donc vers des eaux de surface pour l'adduction en eau. En revanche, les localités rurales restent tributaires des eaux souterraines. Différentes campagnes de forage ont montré des taux d'échec important dans la localisation d'eau souterraine du fait d'une insuffisance de connaissance sur le milieu. Il s'avère donc important de mener des études pour identifier les sites présentant des productivités adéquates pour l'implantation des futurs forages. La région de Danané rencontre les mêmes difficultés d'approvisionnement en eau surtout en zone rurale. Les travaux de prospection géophysique permettant une connaissance plus précise des aquifères fracturés, sont indispensables pour une meilleure localisation, exploitation et gestion durable de leurs ressources. Les résultats issus de l'utilisation des techniques de la télédétection sont confrontés aux problèmes de leurs fiabilités et de leurs validations (Akokponhoué *et al.*, 2018). En effet, la géophysique en général et l'imagerie de tomographie de résistivité électrique en particulier, vient en appui aux approches de la télédétection. La tomographie de résistivité électrique permet de déterminer avec une meilleure précision la position des discontinuités géologiques et de localiser les zones à fort intérêt hydrogéologique.

Le présent travail, vise donc à cartographier et localiser avec précision les aquifères fracturés en vue d'une meilleure planification de l'approvisionnement des populations de la région de Danané en eau potable.

SITE D'ETUDE

Contexte géologique, géomorphologique et hydrogéologique de la zone d'étude

Le site d'étude est situé dans la partie Ouest de la Côte d'Ivoire, il fait partie du noyau archéen. D'un point de vue morphologique, cette région est caractérisée par des reliefs fortement accidentés et s'oppose au reste du pays (partie Est de la faille du Sassandra) qui présente des reliefs peu accidentés. Le contexte géologique et tectonique de cette région s'intègre dans l'histoire du craton Ouest africain en général et de la dorsale de Man en particulier. Au plan lithologique, le site présente des roches cristallines à faible altération, de métamorphisme et de magmatisme (**Fig. 1**). Ces différents phénomènes géologiques sont matérialisés par de nombreuses fractures généralement structurées E-W et N-S. Les différents événements tectoniques ont abouti à la mise en place d'une fracturation très développée dans ces formations. Du point de vue hydrogéologique, la zone est caractérisée par des aquifères circulant au sein des altérites. Ces altérites sont superficielles et captées par les puits modernes et les puits villageois, ainsi que par des aquifères de fractures/fissures plus profonds.

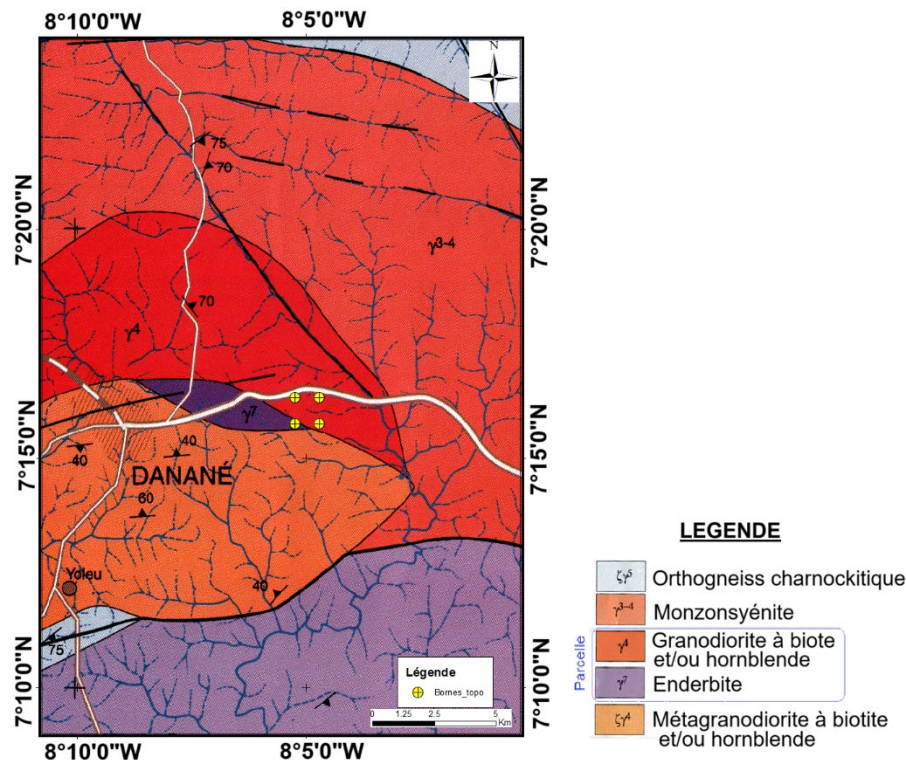


Fig. 1 – Carte géologique de la zone d'étude

MATERIEL ET METHODES

Des mesures géophysiques de terrain de résistivité et chargeabilité ont été réalisées avec un transmetteur Tx III et le récepteur GRx8-32 avec le dispositif Dipôle-Dipôle. Seules les données de résistivité électrique ont été utilisées. Onze (11) layons sur vingt et un (21) layons de 1,1 km ont permis de faire les mesures avec une distance inter-layon de 100 m (**Fig. 2a**). Les mesures ont été effectuées dans le domaine temporel. Les mesures sont présentées sous forme de pseudo-sections de résistivité apparente en fonction de la position le long du profil et de la profondeur. Cette technique de panneau est classiquement utilisée pour définir les structures et la géométrie du milieu souterrain. Leur simplicité et leur faible coût les rendent populaires en milieu de socle (Pessel, 2000 ; Dewandel *et al.*, 2006 ; Descloitres *et al.*, 2008). Le logiciel IP Post-Process a permis d'extraire les pseudo-sections pour l'analyse et l'interprétation. Une topographie (**Fig. 2b**) a été réalisée à partir des coordonnées des électrodes enregistrées par GPS.

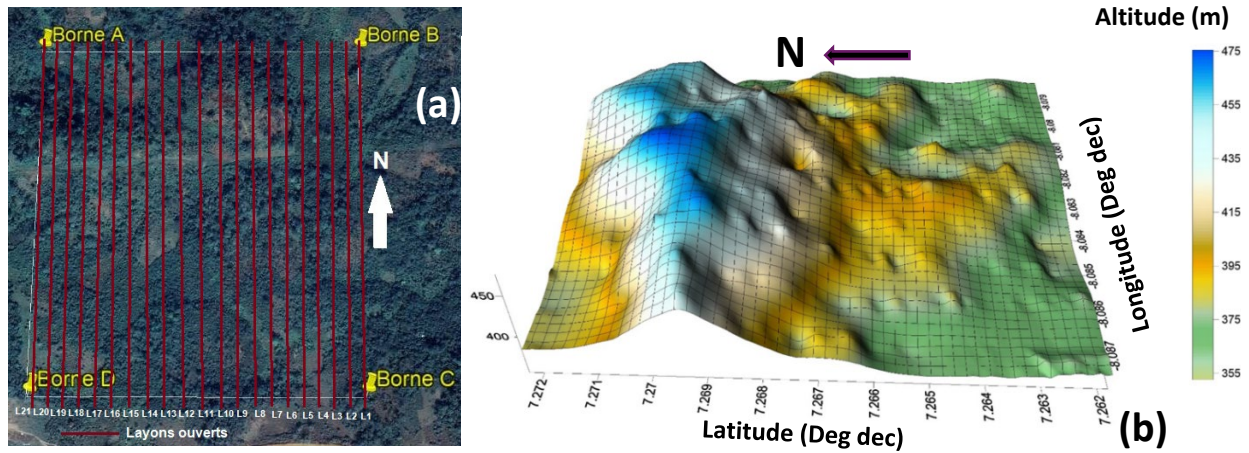


Fig. 2 - Grille de layonnage de la zone d'étude (a), coupe géomorphologique de la zone d'étude (b)

RESULTATS ET DISCUSSION

Les **fig. 3 & 4** présentent des pseudo-sections en fonction de la géomorphologie pour chaque profil réalisé sur les profils. La section obtenue se caractérise par une variation des zones de forte (couleur vive) à faible résistivité tout au long du profil. La variation de résistivité le long des différents profils est due à l'hétérogénéité du sous-sol et à sa géologie. Ces résultats rendent compte de la structuration en place dans la zone d'étude en relation avec le type d'aquifère de la zone.

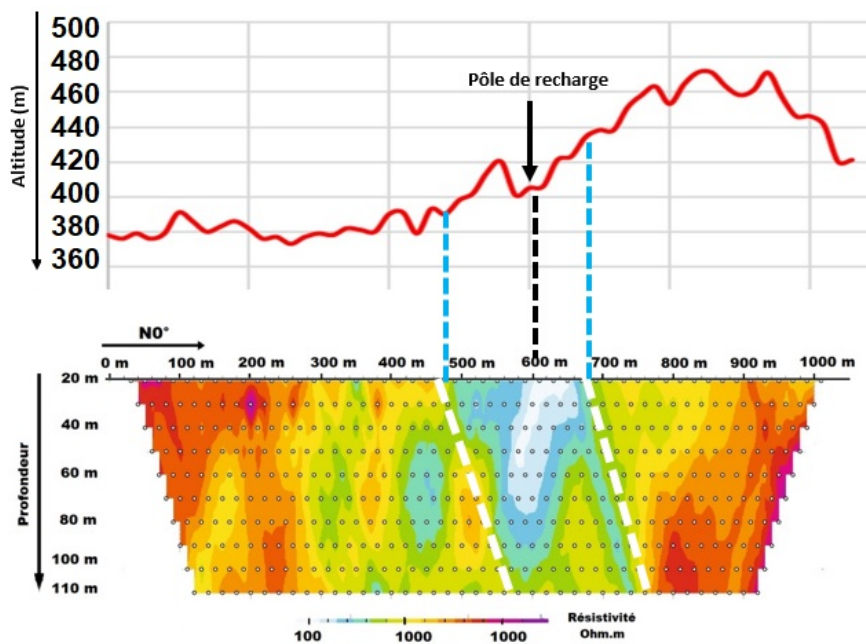


Fig. 3 – Pseudo-section de résistivité apparente du layon 10

Les zones de fracture assimilables aux valeurs de faibles résistivités apparentes ont une orientation bien définie. En effet, les structures qui pourraient être des zones fracturées sont orientées Est-ouest (Fig. 3 et 4).

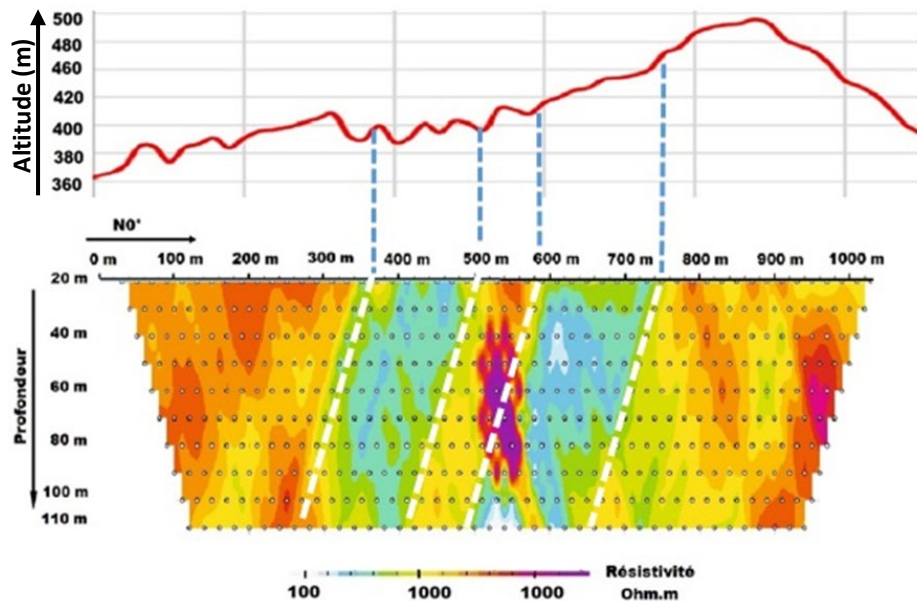


Fig. 4 – Pseudo-section de résistivité apparente du layon 12

L'analyse des données montrent la continuité d'une même couche entre les distances 600 et 700 m. Les informations sur les 20 premiers mètres pourraient donner des informations sur l'altération et la zone de recharge. Quant aux 3 structures conductrices identifiées, qui se retrouvent entre des faciès résistifs, elles pourraient présenter des points de forage distincts.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Des profils de résistivité apparente ont permis de délimiter avec précision la litho-stratigraphique du réservoir en déterminant ses paramètres géométriques dont entre autres l'épaisseur et la conductivité. L'objectif principal de cette étude était d'assurer une meilleure compréhension du système aquifère du site étudié en vue de proposer des zones probables d'implantation de forage. Cette méthode nous a permis de mettre en exergue des zones de faible résistivité et cela est favorable pour l'implantation de forage d'eau dans cette zone.

Au regard de la géométrie du site, il est envisageable de proposer des forages profonds pour des usages de tous types dans cette localité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKOKPONHOU Y., YALO N., AKOKPONHOU H.B., YOUAN T. M., AGBAOUNGBA G., 2018 – Apport de la télédétection et de la géophysique dans la cartographie des fractures hydrauliquement actives en zone de socle au Centre-ouest du Benin. *European Scientific Journal*, vol. 15 n°27, 426p.

DESCLOITRES M., RUIZ L., SEKHAR M., LEGTCHENKO A., BRAUN J.-J., KUMAR M., SUBRAMANIAN S., 2008 – Caractérisation de la recharge locale saisonnière par tomographie de résistivité électrique et sondage par résonance magnétique. *Processus hydrologique*, 3 (22), 384-394.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., WYNS R., MARECHAL J.C., KRISHNAMURTHY N.S., 2006 – A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiples weathering. *Journal of Hydrology* (2006) 330, 260-284.

OUEDRAOGO M., PESSEL M., DURAND V., SAINTENOY A., KAMAGATE B., SAVANE I., 2022 – Multifrequency electromagnetic method for the hydrogeophysical characterization of hard-rock aquifers : the case of the upstream watershed of White Bandama (northern Ivory Coast), BSGF – Earth Sciences Bulletin 193 : 11.

PESSEL M., 2000 – Tomographie électrique : Développements méthodologiques et applications. *Thèse de Doctorat, Université de Rennes, Rennes, 129p.*

CARACTERISATION GEOPHYSIQUE DES ZONES CIBLES A UNE MINERALISATION AURIFERE A SOUËPLEU (DANANE, OUEST DE LA COTE D'IVOIRE)

OUEDRAOGO M.¹, OUATTARA Z.¹, SYLLA I.¹, DIABY A. J.¹, PESSSEL M.², KAMAGATE B.³

¹ Université de Man, Man, Côte d'Ivoire, moussa.ouedroago@univ-man.edu.ci

² Université Paris-Saclay, Labo GEOPS, Orsay, France, marc.pessel@universite-paris-saclay.fr

³ Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, kambamory2@yahoo.fr

RESUME

Une campagne de prospection géophysique a été effectuée dans le département de Danané à l'Ouest de la Côte d'Ivoire et s'inscrit dans l'objectif de la recherche minière dans un secteur géologiquement favorable. La méthode PP/R a permis d'obtenir des résultats probants. Des zones probables de minéralisation ont pu être identifiées et elles pourraient être prouvées après une campagne de sondage (forages). La présence probable de cette minéralisation serait liée à des continuités structurales et de façon disséminée.

Mots clés : Résistivité, chargeabilité, polarisation provoquée, Ouest de la Côte d'Ivoire

GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF TARGET AREAS FOR GOLD MINERALIZATION IN SOUËPLEU (DANANE, WESTERN COTE D'IVOIRE)

ABSTRACT

A geophysical prospecting survey; was carried out in the Danané department in the west of Côte d'Ivoire, as a part of a mining research programme in a geologically favorable sector. The PP/R method yielded convincing results. Probable zones of mineralization have been identified and could be proven after a drilling campaign. The probable presence of this mineralization could be linked to structural continuities and in a disseminated manner.

Key words: Resistivity, chargeability, induced polarization, western Côte d'Ivoire

INTRODUCTION

Les minerais à faibles teneurs et les gisements cachés représentent désormais les principaux objectifs de la recherche minière, qui dans un secteur géologiquement favorable ne doivent jamais être considérés comme terminés. On conçoit aisément que la détection de tels gisements est particulièrement difficile et qu'elle requiert des moyens modernes d'investigation dont la mise au point nécessite une recherche permanente. La géophysique fait partie actuellement des outils indispensables dans le cadre de la recherche, de l'évaluation et de l'estimation de gisement caché dans le sous-sol à travers ses différentes méthodes telles que les méthodes électromagnétiques, les méthodes électriques, la méthode magnétique, les méthodes sismiques, etc. Le département de Danané regorge un potentiel inexploité d'informations géologiques et de ressources minérales. Dégradantes pour l'environnement, des activités d'exploitation artisanale menées par les orpailleurs clandestins donnent des indications sur le type de minéralisation et son orientation. Les études géophysiques et géochimiques permettant de caractériser la structure du gisement aurifère qui a pour but d'étudier la mise en place de la minéralisation par des levés géophysiques et géochimiques sur ces données structurales en vue d'élaborer un modèle synthétique du gisement, qui servira de guider l'exploration adéquate et optimale d'autres cibles économiques. Pour mener à bien cette étude, un levé géophysique est effectué à travers la méthode de polarisation provoquée, couplée à la méthode électromagnétique, en vue de proposer des zones cibles de minéralisation aurifère sur le site de Souëpleu. Par ailleurs, cela permettra d'abord d'identifier les zones de conductivité en surface, ensuite

établir la lithologie à travers les réponses géophysiques et enfin identifier les zones cibles à une minéralisation.

SITE D'ETUDE

Contexte géologique et géomorphologique de la zone d'étude

Situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, le site de Souêpleu qui abrite cette étude est localisée dans le département de Danané. Il se positionne à l'Ouest de faille de Sassandra, dans le domaine Archéen. La géomorphologie de cette région est caractérisée par les chaînes de montagnes successives sur le site d'étude présentant un relief très accidenté du Sud vers le Nord comme l'ont signifié BOYOSSORO *et al.* (2007), dans cette région (**Fig. 1**). La région du Tonkpi (abritant la zone d'étude) fait partie intégrante du domaine forestier de la Côte d'Ivoire, avec un climat pluvieux de montagnes et une couverture forestière sempervirente (TIESSE *et al.*, 2017). Le contexte géologique et tectonique de cette région s'intègre dans l'histoire du craton Ouest africain en général et de la dorsale de Man en particulier. Au plan lithologique, le site présente des roches cristallines à faible altération (granodiorite à biotite et les enderbites) (LASM *et al.*, 2004). Le site repose sur du matériel précambrien du vieux socle granito-gneissique ayant subi plusieurs phases de déformation, de métamorphisme et de magmatisme. Ces différents phénomènes géologiques sont matérialisés par de nombreuses fractures généralement structurées E-W et N-S. Les différents événements tectoniques ont abouti à la mise en place d'une fracturation très développée dans ces formations. En effet, ces différents phénomènes pourraient favoriser la mise en place davantage de minéralisation.

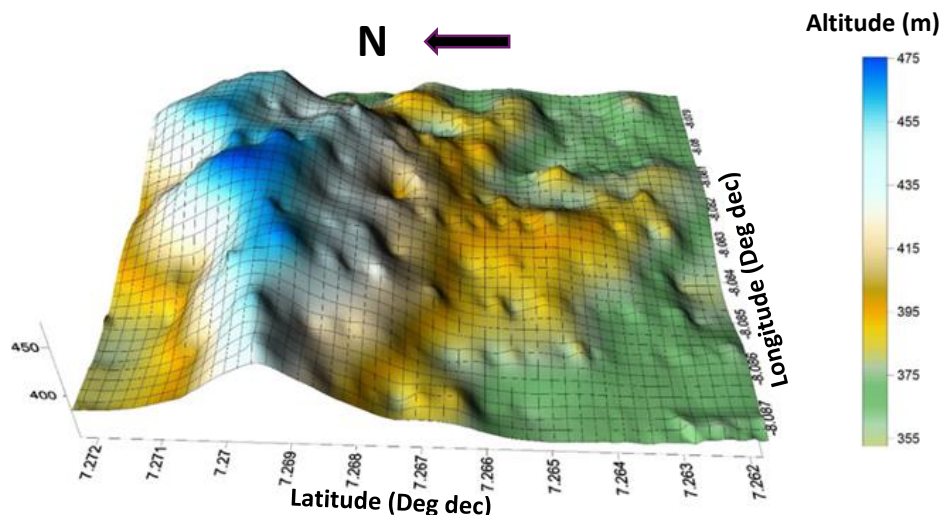


Fig. 1 – Coupe géomorphologique de la zone d'étude

MATERIEL ET METHODES

Les mesures de polarisation provoquée peuvent être réalisées dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel (spectral). Les paramètres mesurés sont différents d'un domaine à l'autre (mais ils sont liés par les transformations de Fourier ou de Laplace). Généralement, les mesures sur le terrain sont majoritairement acquises dans le domaine temporel (FLORSCH *et al.*, 2012 ; GAZOTY *et al.*, 2012) car l'acquisition est plus rapide et facile à mettre en œuvre, évitant en grande partie les problèmes de couplage. Des campagnes de prospection géophysique sur le terrain, avec des mesures de résistivité et de chargeabilité couplées aux acquisitions en électromagnétisme ont été réalisées au moyen de transmetteurs Tx II, Tx III et de récepteur GRx8-32. Le dispositif quadripolaire Dipôle-Dipôle a été utilisé pour la mise en œuvre de cette méthode d'acquisition de données PP/R avec plus de précision. La récolte des données a permis d'obtenir les informations sur une profondeur maximale de 110 m. Onze (11) layons de 1,1 km sur vingt et un (21) layons ont fait l'objet de mesures PP/R avec une distance inter-layon de 100 m (**Fig. 2**). Ces mesures se sont effectuées dans le domaine temporel et sont présentées sous forme de pseudo-sections de résistivité et chargeabilité apparente en fonction de la position le long du profil et de la pseudo-

profondeur. Cette technique de panneau est classiquement utilisée pour définir les structures et la géométrie du milieu souterrain. Le logiciel IP Post-process a permis d'extraire les pseudo-sections pour l'analyse et l'interprétation. Une topographie (**Fig. 1**) a été réalisée à partir des coordonnées des électrodes relevées à l'aide d'un GPS.



Fig. 2 - Grille de layonnage de la zone d'étude

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Caractérisation lithologique

La **Fig. 3** présente la pseudo-section de résistivité suivant le profil parcouru, ce qui permet d'apprécier la zone d'information afin de faciliter l'interprétation de celle-ci. Cette pseudo-section présente un faciès conducteur au cœur allant de 240 à 760 m de distance sur toute la profondeur. Toutefois cette zone est en partie très conductrice sur une distance de 360 m (400-760 m) en fonction de la profondeur. Sa géométrie pourrait être assimilable à une discontinuité structurale telle une fracture remplie par des minéraux différents de ceux de la roche encaissante.

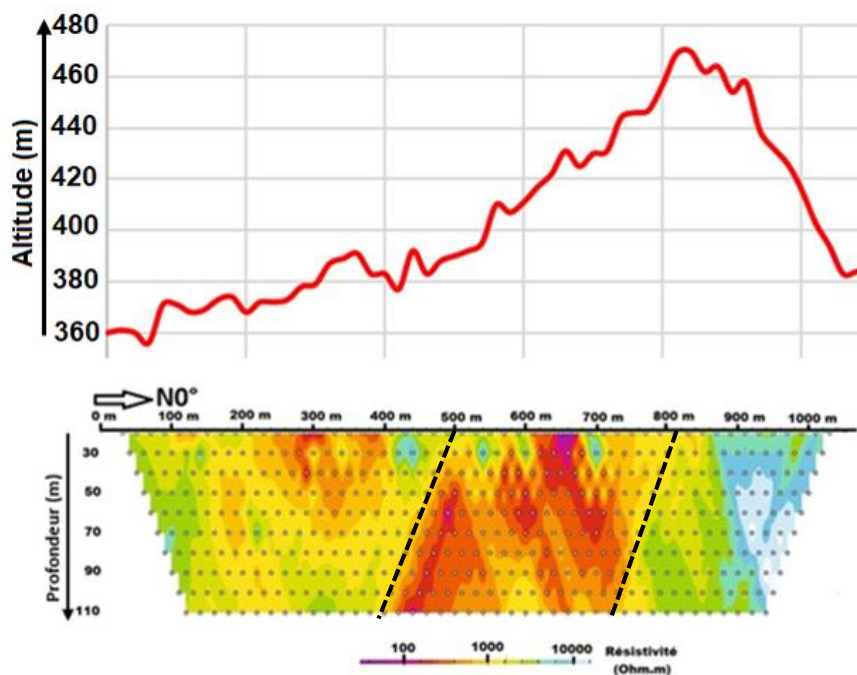


Fig. 3 – Pseudo-section de résistivité

Identification de zones cibles

La pseudo-section de chargeabilité présentée sur la **Fig.4** montre les zones anomales qui superposeraient des valeurs de chargeabilité élevées, aux valeurs de résistivité faibles, dénotant de structures chargeables et conductrices. Les zones de fracture assimilables aux valeurs de faibles résistivités présentent des valeurs de chargeabilité faibles à très fortes. Trois points sur cette pseudo-section montre trois zones de moyennes à très forte chargeabilité tels qu'indiqués entre les distances respectives de (300-400 m), (400-500 m) et (500-600 m). L'analyse des données montrent qu'à ces trois zones de chargeabilité importante se superposent des zones de faible résistivité (zone conductrice) qui pourraient faire l'objet de sondages dans le but de confirmer ou infirmer l'information actuelle.

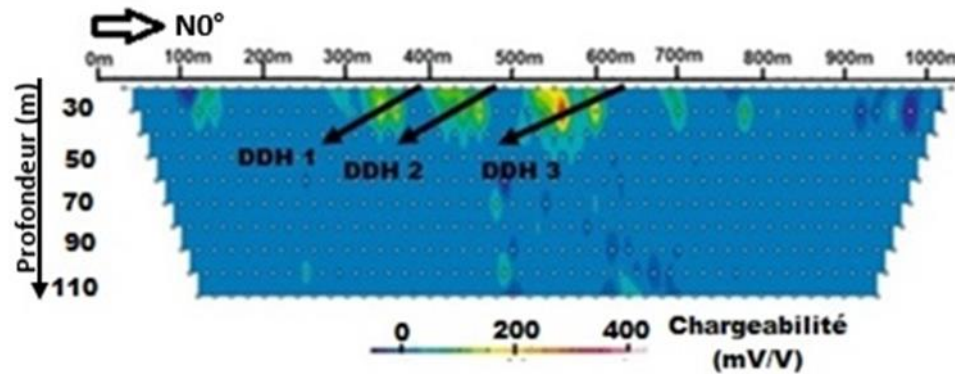


Fig. 4 – Pseudo-section de chargeabilité

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de mettre en exergue des zones cibles à la minéralisation. Trois zones ont pu être identifiées suite à l'interprétation des données traitées et analysées. En effet, trois sites de sondages ont été signifiés afin de prouver les résultats obtenus.

Trois forages sont proposés sur ce profil par ordre de priorité successive allant de DDH 1 à DDH 3. Il va falloir également faire une prospection resserrée c'est-à-dire une prospection tactique. Ainsi, la géochimie sol pourrait être d'un bien utile pour la poursuite des travaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOYOSSORO H. K., KOFFI F. K., BACHIR M. S., BIEMI J., TRAORE I., 2007 - Insécurité climatique et géorisques en Côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Sécheresse* 2007, 18 (1), 29-37.

FLORSCH N., LLUBES M., TEREYGEOL F., 2012 - Induced polarization 3D tomography of an archaeological direct reduction slag heap. *Near Surface Geophysics*, 10 (1957).

GAZOTY A., FIANDACA G., PEDERSEN J., AUKEN E., CHRISTIANSEN A., 2012 - Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, 10 (1957).

LASM T., KOUAME K. F., OGA Y. M.-S., JOURDA J. R. P., SORO N., KOUADIO H. B., 2004 – Etude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologiques*, Vol. 5, 97-115.

TIESSE B. A., EBOUA N. W., N'DA D. H., 2017 - Apport de la télédétection pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol dans la région montagneuse du Tonkpi (Côte d'Ivoire). In *European Scientific Journal*. Vol.13, N°15, 310-329.

UTILISATION DES METHODES GÉOPHYSIQUES POUR LA CARACTERISATION ET LE SUIVI DE L'EFFET DU BIOCHAR SUR LES PROPRIETES DE SOLS URBAINS

PASQUET S.^{1,2}, THIESSON J.², BODET L.², JOUGNOT D.², VASCONEZ M.^{2,3}, LADEN A.², GUERIN R.², QUENEA K.², DELARUE F.²

¹ UAR 3455 OSU ECCE TERRA, CNRS, Sorbonne Université, Paris, France

² UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris, France

³ Department of Mining and Civil Engineering, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain

RESUME

Un site expérimental a été mis en place à Limeil-Brévanne pour étudier l'effet du biochar sur la structure et les propriétés de sols urbains. Les mesures TDR effectuées ponctuellement ne permettent pas de détecter un effet significatif du biochar sur la teneur en eau. À l'inverse, les mesures sismiques montrent des variations significatives de vitesses qui sont cohérentes avec l'augmentation de la teneur en eau dans les placettes avec biochar, démontrant l'intérêt de la sismique pour la caractérisation de ces sols.

Mots clés : biochar, technosol, sol urbain, géophysique, sismique, rétention d'eau

ABSTRACT

An experimental site has been set up at Limeil-Brévanne to study the effect of biochar on the structure and properties of urban soils. Single-point TDR measurements did not reveal any significant effect of biochar on water content. Conversely, seismic measurements showed significant variations in velocity, consistent with the increase in water content in the biochar plots, demonstrating the value of seismic for soil characterization.

Key words: biochar, technosol, urban soil, geophysics, seismics, water retention

INTRODUCTION

Le compostage et la biométhanisation sont des méthodes bien connues de recyclage des déchets organiques, mais elles ne sont pas adaptées aux résidus ligneux. Ces résidus peuvent être transformés en "biochar" par pyrolyse de la biomasse végétale. Le biochar a été identifié comme faisant partie des technologies susceptibles de stocker du carbone et d'atténuer le changement climatique grâce à sa production et à son incorporation dans les sols. Les effets du biochar sur les propriétés des sols des régions tempérées sont mal compris, mais une méta-analyse récente suggère que le biochar peut être utilisé pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre, améliorer la santé des sols et la résilience au changement climatique dans les sols dégradés des régions tempérées (Lévesque et al., 2022). Le biochar peut donc être un élément essentiel d'une stratégie bioéconomique basée sur le recyclage des résidus ligneux et sur la réhabilitation des sols urbains dégradés. Le biochar peut modifier les propriétés physiques des sols (Yang et Lu, 2021) et influencer directement les fonctions du sol, notamment la rétention d'eau et la stabilité mécanique. Il peut en particulier amener une diminution globale de la densité apparente du sol et conduire à une augmentation de la capacité au champ, du point de flétrissement et de la teneur en eau disponible pour les plantes (Razzaghi et al., 2020). À ce jour, la plupart des études ne prennent en compte ni l'effet du vieillissement du biochar ni les effets saisonniers. Il est donc nécessaire de suivre l'évolution des propriétés physiques dans l'espace et dans le temps.

Le suivi par carottage est destructif et s'avère peu représentatif dans des sols hétérogènes. Les techniques géophysiques (i.e. sismiques, électriques) ont montré leur efficacité pour la caractérisation et le suivi non destructifs des sols (Romero-Ruiz et al., 2018). À ce jour, les effets du biochar sur les propriétés géophysiques des sols sont peu étudiés et limités à des expériences en

laboratoire (Gao et al., 2019). La combinaison des méthodes géophysiques et d'informations locales provenant de l'échantillonnage du sol permet d'obtenir des images à haute résolution des propriétés intrinsèques du sol, telles que la saturation en eau et la porosité (Dangeard et al., 2021). Dans ce contexte, un site expérimental a été mis en place pour étudier l'effet du biochar sur les propriétés de sols fortement urbanisés et leur évolution au cours du temps. Son suivi combine mesures géophysiques (sismique, résistivité électrique, polarisation provoquée), biogéochimiques (matière organique et nutriments dans le sol, flux de CO₂), ainsi que des propriétés intrinsèques du sol (teneur en eau, granulométrie, ADN environnemental) et des plantes (chlorophylle). Le site expérimental ainsi que les premiers résultats couplant mesures sismiques et teneurs en eau sont présentés ici.

DESCRIPTION DU SITE EXPÉRIMENTAL

Situé entre Valentigney et Limeil-Brévannes (94), le site expérimental est constitué d'un technosol très hétérogène dans lequel 20 placettes de 2 m x 3 m x 30 cm ont été réalisées. Sur 10 de ces placettes, du biochar a été incorporé sur 30 cm d'épaisseur. La stratégie suivie pour réaliser ces placettes a consisté à : (1) creuser le technosol dans les 20 placettes sur 30 cm ; (2) enlever les gros artefacts anthropogéniques ; (3) mélanger les matériaux excavés de chaque placette ; (4) diviser le volume de sol en deux lots A (sans biochar) et B (avec biochar) ; (5) incorporer le biochar dans les lots B ; (6) remplir chaque placette avec les sols des lots A ou B ; (7) couvrir les placettes avec un géotextile (pour éviter l'arrachage d'espèces végétales adventices ou sauvages) ; (8) planter 3 espèces végétales ayant de bonnes propriétés phytoremédiatrices et fréquemment utilisées dans les espaces verts sur la moitié des placettes avec et sans biochar ; (9) si besoin, arroser chaque placette avec un volume d'eau équivalent. Le plan expérimental consiste en quatre traitements répétés cinq fois, comme illustré sur la figure 1.

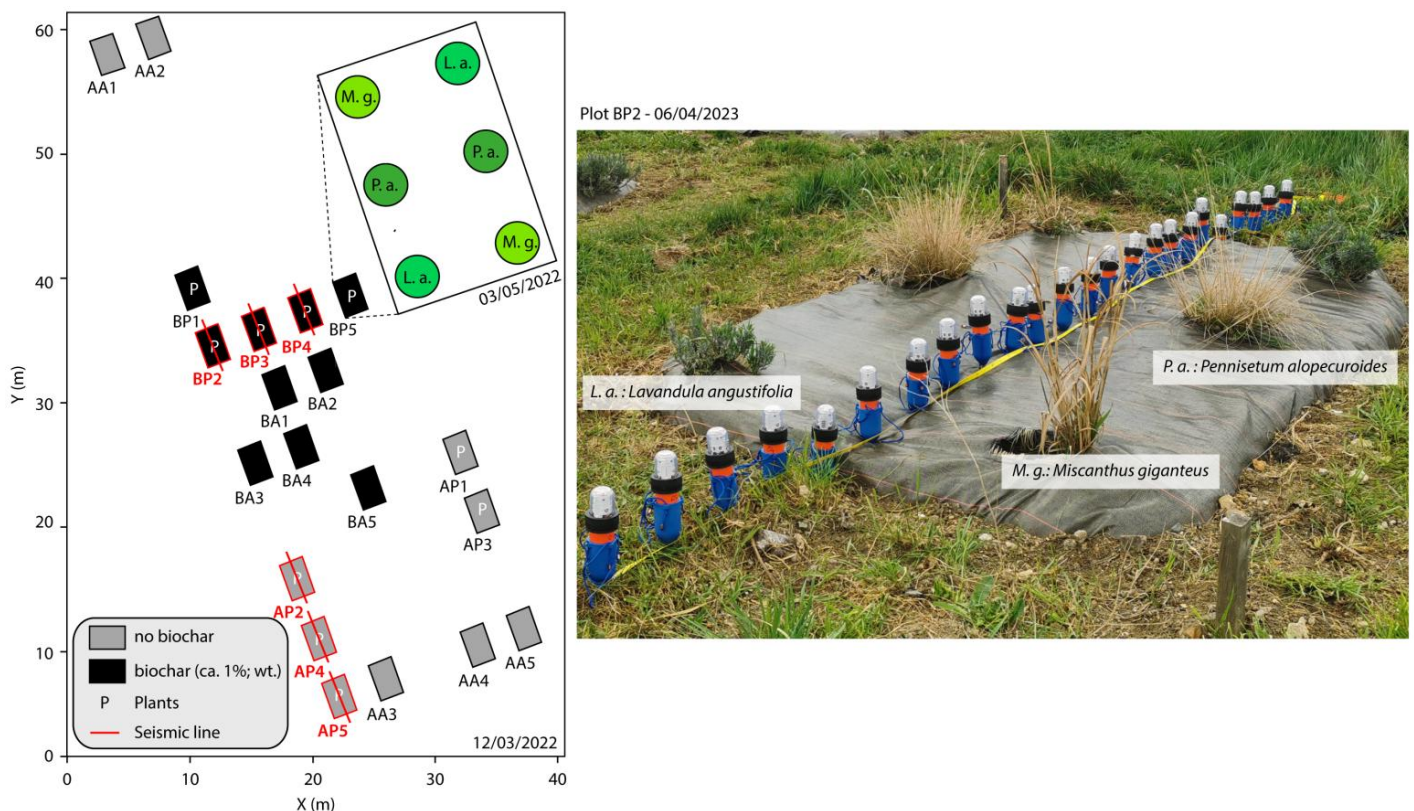


Fig. 1 – Carte du site expérimental avec positions des placettes et des profils sismiques (à gauche). Photographie des *nodes* installés sur la placette BP2 (à droite).

ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Trois mesures ponctuelles de teneur en eau ont été effectuées en avril 2023 sur toutes les placettes sans plantes à l'aide d'une sonde TDR (*Time Domain Reflectometry*) HydroSense II (Campbell Scientific) de 12.5 cm de long. La conversion de la mesure TDR en teneur en eau volumique est réalisée grâce aux équations de van Genuchten (1980). Des profils sismiques de 4.6 m de long ont également été réalisés en avril 2023 sur 6 placettes avec plantes (3 avec biochar et 3 sans biochar). Les profils ont été mis en place dans le sens de la longueur, au centre de chacune des placettes à l'aide de 24 géophones autonomes (ou *nodes*) espacés de 20 cm (figure 1). Une massette de 1.5 kg et une plaque en acier de 5 x 5 x 1 cm ont été utilisées pour générer le signal sismique, avec 25 positions de sources situées à mi-distance de chaque géophone. L'utilisation de ces *nodes* permet d'acquérir les données sismiques avec une plus grande flexibilité et rapidité par rapport aux instruments câblés traditionnels. À titre indicatif, l'installation et l'acquisition de 6 profils 24 traces - 25 positions de tirs a été effectuée par une personne seule en moins de 4h, soit environ 40 min par profil. Les pointés des temps de premières arrivées ont ensuite été effectués manuellement pour chaque profil. L'utilisation des *nodes* se révèle une nouvelle fois bénéfique, avec peu de problèmes de déclenchement, un bon rapport signal sur bruit et une forte atténuation de l'onde aérienne (en comparaison avec des tests - non présentés ici - effectués avec des instruments câblés traditionnels). Ce dernier point s'avère particulièrement intéressant pour l'étude des sols où les vitesses observées peuvent avoisiner celles de l'air. Ces temps d'arrivées ont ensuite été inversés à l'aide de la librairie python pyGIMLi (Rücker et al., 2017). La topographie n'a pour le moment pas été prise en compte, mais des relevés au GPS différentiel sont prévus dans les prochains mois afin d'incorporer les variations de micro-topographie dans la procédure d'inversion.

RÉSULTATS

La teneur en eau volumique moyenne a été calculée pour chaque type de placette à partir des mesures TDR sur le terrain. Pour les placettes sans biochar, la teneur en eau moyenne est de $10.2 \pm 0.6 \%$, alors qu'elle est de $11.9 \pm 1.7 \%$ sur les placettes avec biochar. La différence entre les deux types de placettes est notable, mais n'est pas statistiquement significative (test de Student avec $t = 0.1$). Les vitesses sismiques obtenues après inversion sont représentées pour chaque profil sur la figure 2. On peut clairement observer des vitesses plus faibles en surface dans la zone correspondant aux placettes. Les vitesses de chacun de ces profils ont été extraites dans une zone de 3 m x 0.3 m correspondant à l'emplacement de la placette. Les statistiques de ces vitesses (figure 2g) mettent en évidence des signatures différentes en fonction de la présence ou non de biochar. Une vitesse moyenne de 214 ± 33 m/s a été calculée pour toutes les placettes sans biochar, contre 160 ± 27 m/s pour les placettes avec biochar. Cette différence est significative, et reste cohérente avec une augmentation de la teneur en eau dans les placettes avec biochar (Solazzi et al., 2021).

DISCUSSIONS ET CONCLUSION

Le site expérimental de Limeil-Brévanne a été mis en place pour étudier l'effet du biochar sur la structure et les propriétés de sols urbains. Dans ces milieux fortement hétérogènes, les mesures ponctuelles de teneur en eau ne permettent pas de détecter des variations significatives de teneur en eau entre placettes avec et sans biochar. À l'inverse, les mesures sismiques permettent d'intégrer un volume de sol plus large et détectent une diminution significative des vitesses sismiques en présence de biochar. Ces variations sont cohérentes avec l'augmentation de la teneur en eau dans les placettes avec biochar, mais pourraient également être liées à une diminution de la densité en présence de biochar. Ces résultats confirment l'intérêt de la sismique pour le suivi et la caractérisation des propriétés des sols. La répétition des mesures à différentes saisons, et le couplage avec d'autres méthodes géophysiques (notamment résistivité électrique) et mesures directes (porosité, granulométrie) permettra de mieux contraindre les modèles pétrophysiques utilisés pour décrire le fonctionnement de ces technosols.

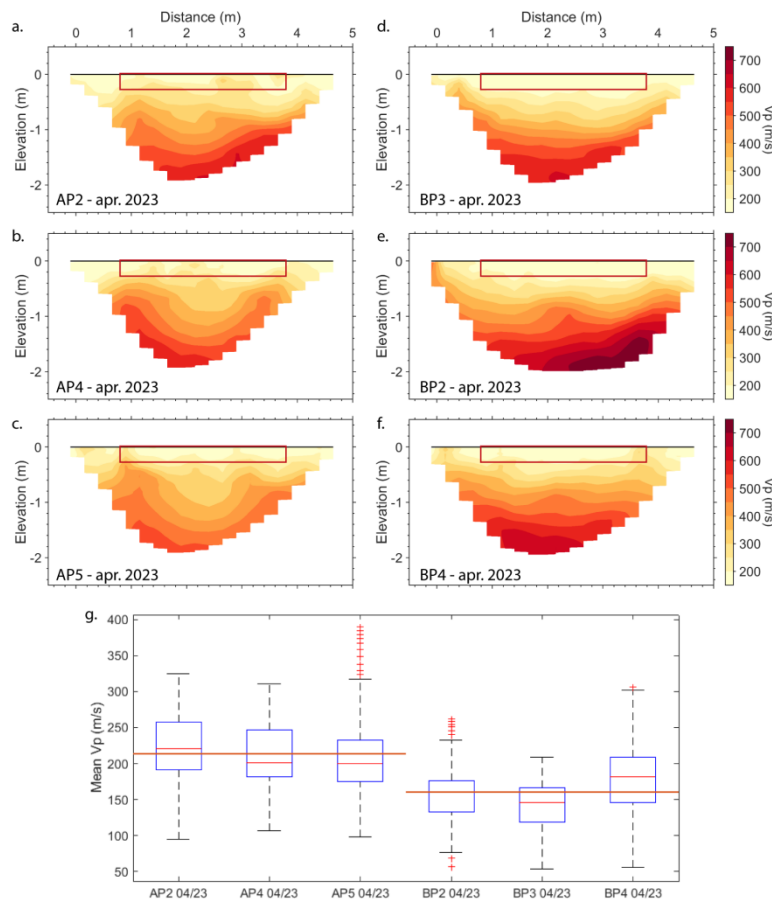


Fig. 2 – (a-f) Modèles de vitesse obtenus pour chaque profil et positions des placettes (rectangle rouge). (g) Statistiques des vitesses pour chaque placette et vitesses moyennes avec et sans biochar (trait rouge en gras).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DANGEARD, M., RIVIÈRE, A., BODET, L., SCHNEIDER, S., GUÉRIN, R., JOUGNOT, D., MAINEULT, A., 2021 - River corridor model constrained by time-lapse seismic acquisition. *Water Resources Research* 57(10), e2020WR028911.
- GAO, Z., HAEGEL, F.-H., ESSER, O., ZIMMERMANN, E., VEREECKEN, H., HUISMAN, J. A., 2019 - Spectral Induced Polarization of Biochar in Variably Saturated Soil. *Vadose Zone Journal* 18(1), 180213.
- LÉVESQUE, V., OELBERMANN, M., ZIADI, N., 2022 - Biochar in temperate soils: opportunities and challenges. *Canadian Journal of Soil Science*. 102(1), 1–26.
- RAZZAGHI, F., OBOUR, P.B., ARTHUR, E., 2020 - Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma* 361, 114055.
- ROMERO-RUIZ, A., LINDE, N., KELLER, T., OR, D., 2018 - A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. *Reviews of Geophysics* 56(4), 672–697.
- RÜCKER, C., GÜNTHER, T., WAGNER, F.M., 2017 - pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences* 109, 106–123.
- SOLAZZI, S.G., BODET, L., HOLLIGER, K., JOUGNOT, D., 2021 - Surface-Wave Dispersion in Partially Saturated Soils: The Role of Capillary Forces. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 126(12), e2021JB022074.
- VAN GENUCHTEN, M.TH., 1980 - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5), 892.
- YANG, C.D., LU, S.G., 2021 - Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research* 205, 104798.

Développer les outils d'analyse
(modélisations, inversions,
apprentissage machine...)

LE MONITORING SISMIQUE POUR LA DETERMINATION DE PROPRIETES MECANQUES DE LA PROCHE SURFACE LE LONG DE LIGNES A GRANDE VITESSE

CUNHA TEIXEIRA José^{1,2}, BODET Ludovic¹, HALLIER Amélie², BURZAWA Audrey^{1,2}, DANGEARD Marine², FONDA Marie², CARDENAS CHAPELLIN Julio¹, SANCHEZ GONZALEZ Ramon³, GESRET Alexandrine³, RIVIERE Agnès³, DHEMAIED Amine², BOISSON-GABORIAU Joséphine²

¹ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75252 Paris 05, France, jose.teixeira@sorbonne-universite.fr

² SNCF Réseau, 6 avenue François Mitterrand, 93210 Saint-Denis, France

³ Département de Géosciences, Mines Paris – PSL, PSL Université, Paris, France

RESUME

Les méthodes sismiques par ondes de surface permettent le contrôle des plateformes ferroviaires en estimant la variation de la vitesse des ondes de cisaillement en proche surface, directement liées au module de cisaillement du milieu. Cependant l'accès aux sites est très contraint, limitant la régularité des mesures. Ce travail propose d'adapter une méthode dite « passive », utilisant le bruit sismique généré par le passage des trains, aux lignes à grande vitesse (LGVs). Les données sont enregistrées par un réseau linéaire uniforme de 96 capteurs implantés en piste le long de la ligne et sont utilisées afin de générer des tirs virtuels par interférométrie. La dispersion des ondes de Rayleigh est ensuite extraite et montre des résultats cohérents avec la sismique active.

Mots clés : monitoring, ferroviaire, sismique passive, ondes de surface, interférométrie

ABSTRACT

Seismic surface-waves methods allow the control of railway embankments by estimating near-surface shear(S)-wave velocities (V_s), closely linked to the medium's mechanical moduli variations. We use seismic noise generated by high-speed trains and recorded by a uniform linear array of 96 geophones from the trackside to generate virtual shot gathers by interferometry. We then extract Rayleigh-wave dispersion and show that results compare very well with those obtained with an active source.

Key words: monitoring, railway, passive seismic, surface waves, interferometry

INTRODUCTION

Il est essentiel pour SNCF Réseau de caractériser la rigidité de la plateforme ferroviaire (*i.e.*, premiers mètres de sol sur lesquels reposent les traverses) afin de garantir la sécurité du trafic ferroviaire. Cela est généralement réalisé en vérifiant périodiquement son intégrité à l'aide d'essais *in situ* (forages, carottés) ou, plus récemment, par des approches géophysiques non destructives telles que les méthodes sismiques par ondes de surface. Ces dernières permettent d'estimer la vitesse des ondes de cisaillement (V_s) en fonction de la profondeur, étroitement liée au module de cisaillement du milieu. Ces méthodes se basent principalement sur l'étude de la propagation des ondes de Rayleigh, dont les vitesses de phase (V_R) pour des fréquences données sont quasi-égale aux V_s du milieu pour des profondeurs correspondantes. Ces ondes sont généralement générées par des sources actives (masse, chute de poids) et sont enregistrées par un réseau linéaire uniforme de géophones afin d'être traitées dans le cadre de la méthode dite de *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) (Park et al., 1999). La MASW est utilisée pour fournir une estimation moyenne de V_s en fonction de la profondeur ou bien pour générer des sections pseudo-2D de V_s . L'approche est considérée fiable pour la vérification de la stabilité du sous-sol en contexte ferroviaire (Boisson Gaboriau et al., 2016 ; Bodet et al., 2017). Cependant, de nombreuses prospections sont exclues ou retardées en raison de restrictions d'accès aux sites ferroviaires, rendant la caractérisation continue ou régulière dans le temps difficile à déployer. Ainsi, l'utilisation de sources passives de bruit sismique générées par des activités naturelles ou anthropiques et ne nécessitant pas d'opérateur présent sur le terrain semble plus adaptée pour ce

type de contexte. Ce type de méthodes a largement été développé en sismologie depuis les années 50 et est, entre autres, aujourd'hui utilisé dans un schéma de MASW pour la caractérisation de la proche-surface en utilisant le bruit sismique généré par le trafic le long des routes (Park & Miller, 2008) ou le long des voies ferrées (Brenquier et al., 2019 ; Bardainne et al., 2020 ; You et al., 2023). Les outils de surveillance mis en place utilisent généralement des réseaux 2D denses de géophones et offrent des cartes 3D de V_s de haute résolution avec une évolution temporelle fine. Dans cette étude une méthode de surveillance passive de la plateforme ferroviaire, utilisant le bruit sismique généré par le passage de TGVs et enregistré sur de courtes durées par un réseau linéaire uniforme réduit (*i.e.* moins étendu et moins dense), est étudiée et comparée avec une méthode active traditionnelle.

MATERIEL ET METHODES

Déploiement et acquisition

Le site d'étude, localisé sur une ligne à grande vitesse (LGV) française, connaît une augmentation du besoin de maintenance affectant principalement la voie 2 et pouvant être dû à de fortes variations de la rigidité du sol. 7 profils sismiques de 23,75 m ont été réalisés en piste le long de la voie 2 (voir Figure 1), chacun composé de 96 géophones à composante verticale espacés de 25 cm. Une première prospection par sismique active a été réalisée en frappant verticalement une plaque en métal placée sur le sol avec une massette de 1,5 kg. Pour chaque profil, un tir direct et un tir inverse ont été réalisés de part et d'autre des dispositifs à une distance de 12,5 cm. L'acquisition a été faite sur une durée de 2 s avec un pas d'échantillonnage de 0.5 ms. De plus, 5 coups de massette ont été sommés à chaque position de tir afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. D'autre part, le bruit sismique généré par le passage de TGVs a été enregistré sur chaque profil sur des durées de 60, 90 et 130 s et avec un pas d'échantillonnage de 2 ms. Les enregistrements ont été lancés manuellement à l'approche des trains en voie 1 et 2.

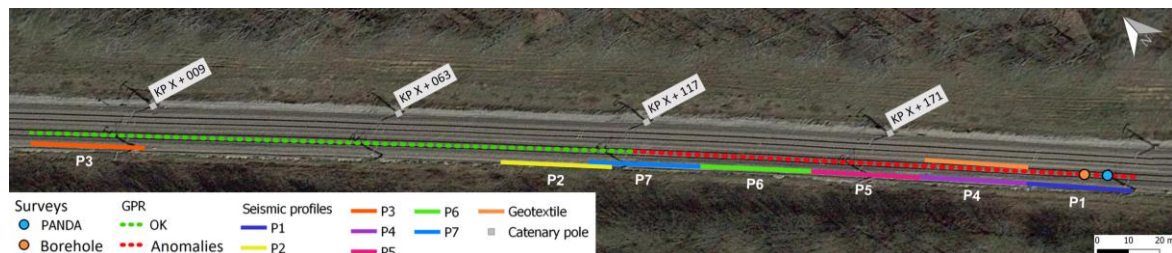


Fig. 1 – Carte de la position relative des profils sismiques le long de la piste de la LGV.

Traitement du signal

Chaque enregistrement est divisé en segments de 5 s en utilisant une fenêtre glissante avec un pas de 1 s. Les segments sont triés en utilisant une transformée fréquence-nombre d'onde (f - k), selon Cheng et al. (2018), permettant de déterminer le sens de propagation relatif (direct et inverse) des ondes pour chaque échantillon en calculant le rapport d'énergie entre la partie négative et positive en nombre d'onde. Cela permet, d'autre part, d'éliminer les segments au cours desquels le train passe au niveau des capteurs ou est trop éloigné du dispositif, ne montrant ainsi pas de directionnalité bien définie des ondes. Un pré-traitement (Bensen et al., 2007) est appliqué aux segments conservés. Cela consiste, pour chaque trace, à éliminer la réponse instrumentale et la tendance moyenne et à appliquer une normalisation temporelle ainsi qu'un blanchiment spectral. Un procédé d'interférométrie sismique est ensuite mis en œuvre par corrélation croisée entre le premier capteur et tous les autres (tir virtuel direct) ainsi qu'entre le dernier capteur et tous les autres (tir virtuel inverse) afin d'estimer la fonction de Green du milieu (Derode et al., 2003). Les résultats d'interférométrie contiennent une partie temporelle positive dite causale et négative dite anticausale. Ainsi, pour un sens de propagation direct, la partie causale est conservée pour le tir virtuel direct et la partie anticausale pour le tir virtuel inverse, et inversement pour un sens de propagation inverse. Enfin, les tirs virtuels directs et inverses de chaque segment sont coupés à une durée de 2 s et sommés dans le domaine temporel avec une pondération de phase (Schimmel & Paulssen, 1997). Le résultat est un tir virtuel unique montrant la propagation des ondes de surface le long du dispositif avec une source virtuelle au niveau du premier capteur (voir Figure 2). Une image de dispersion est extraite de ce tir virtuel en

utilisant une opération dite de sommation oblique du champ d'ondes (McMechan et Yedlin, 1981). D'autre part, une image de dispersion est extraite de chacun des deux tirs sismiques actifs. Ces deux images sont sommées dans le domaine fréquence- V_R . Qu'il s'agisse des enregistrements passifs ou des tirs actifs, les maxima du champ d'ondes correspondant aux courbes de dispersion, sont pointés en utilisant un outil semi-automatique.

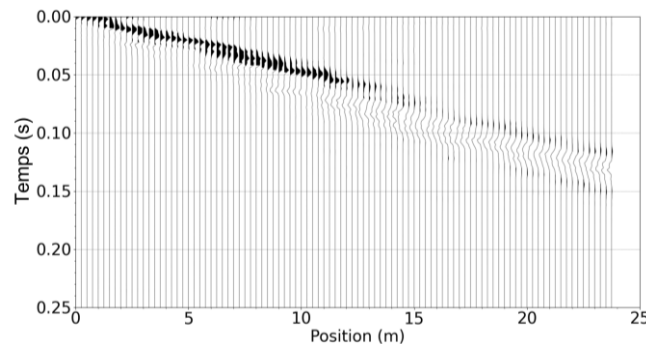


Fig. 2 – Tir virtuel final coupé à 0.25 s pour le profil 1 construit à partir de 6 enregistrements de 130 s.

RESULTATS

Les Figures 3A et B montrent les images de dispersion pointées extraites avec les méthodes passive et active pour le profil 1 (voir Figure 1). La qualité de l'image de dispersion passive permet la reconnaissance de nombreux modes de propagation : le mode fondamental, ainsi que 3 modes supérieurs pour la sismique active et jusqu'à 5 modes supérieurs pour la sismique passive. La comparaison entre passif et actif montre une superposition des modes de propagation (voir Figure 3C). La méthode passive semble cependant donner plus d'informations pour les basses fréquences de chaque mode et avec plus de continuité.

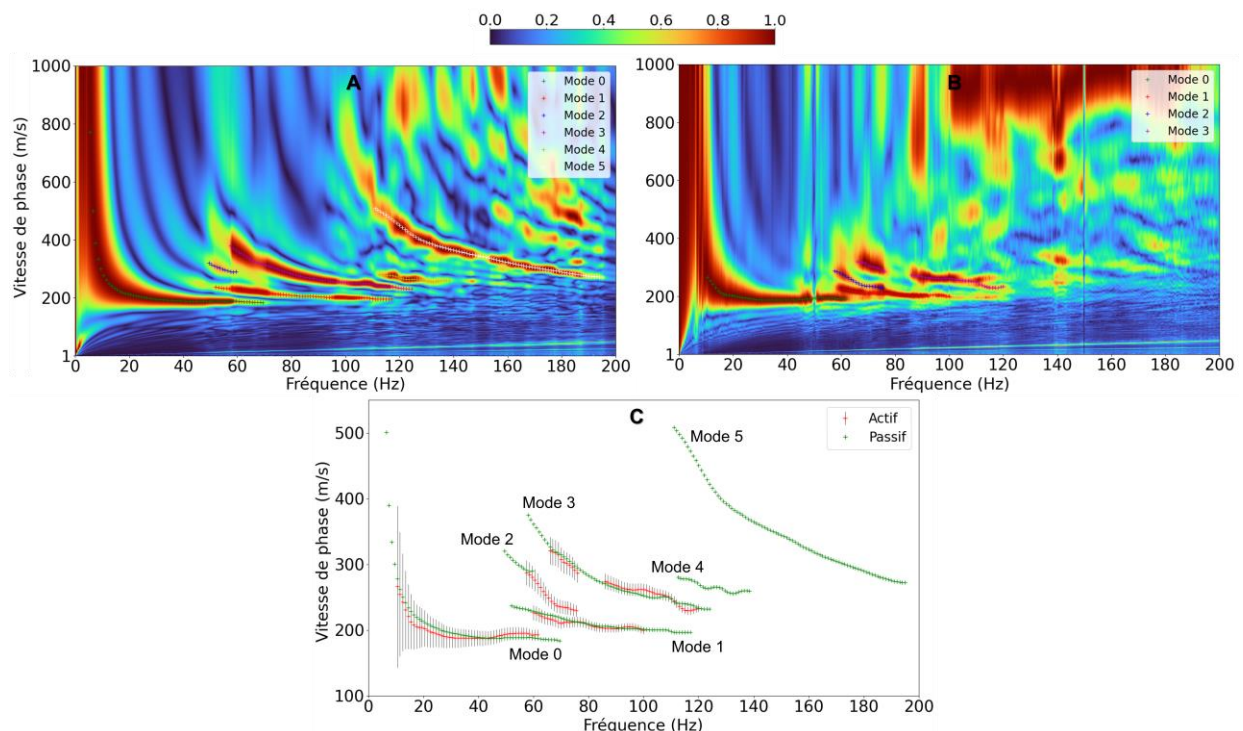


Fig. 3 – Images de dispersion obtenues par (A) sismique passive et (B) sismique active sur le profil 1. (C) Superposition des courbes de dispersion passives (vert) et actives (rouge) pour les 3 premiers modes de propagation du profil 1. La dispersion passive a été obtenue à partir de 6 enregistrements de 130 s. Les barres d'erreur sont calculées selon O'Neill (2003) pour les données actives.

CONCLUSIONS

Les méthodes actives par ondes de surface utilisant des sources générées par les utilisateurs sont utilisées pour le contrôle des propriétés mécaniques de la plateforme ferroviaire. Cependant ces campagnes géophysiques sont difficiles à mettre en place pour un suivi régulier des sites étant données les contraintes liées au milieu ferroviaire. Ainsi, l'utilisation du bruit sismique généré par les TGVs comme source a été testée et montre qu'en utilisant un réseau linéaire uniforme de 96 géophones et appliquant un traitement standard de sismique passive il est possible de retrouver des images de dispersion de haute résolution montrant de nombreux modes de propagation validés en partie par la sismique active. Il est intéressant de noter que la durée d'enregistrement influence la qualité des images de dispersion. Également, la longueur et pas des segments est à adapter selon les données. Ces paramètres dépendent notamment de la vitesse du train. Il sera intéressant de tester une inversion multimodale afin de fournir des variations de V_s en fonction de la profondeur. Également, afin d'automatiser l'outil, un géophone pourrait être placé de part et d'autre du dispositif à une certaine distance afin de détecter à l'avance l'arrivée d'un train et permettre le déclenchement de l'enregistrement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARDAINNE T., TARNUS R., DELADERRIÈRE N., HALLIER A., BOISSON-GABORIA J., VALENTIN J., 2020** - Permanent passive seismic monitoring of the near-surface ground beneath railways using trains as sources. *Railways* 2020 (Mallorca)
- BENSEN G.D., RITZWOLLER M.H., BARMIN M.P., LEVSHIN A.L., LIN F., MOSCHETTI M.P., SHAPIRO N.M., YANG Y., 2007** - Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophysical Journal International* 169, 1239–1260
- BODET L., RAHMANIA I., KYRKOU K., WACQUIER L., DANGEARD M., PASQUET S., VITALE Q., DHEMAIED A., BOISSON-GABORIAU J., NEBIERIDZE S., 2017** - Estimation in situ des variations de propriétés mécaniques de la plateforme ferroviaire par ondes sismiques de surface. SNCF Réseau - CNRS – UPMC
- BOISSON-GABORIAU J., DHEMAIED A., RAHMANIA I., BODET L., PASQUET S., BRAND L., CALON N., TERPEREAU J.M., KAHIL S., 2016** - Etude géophysique, géotechnique et historique d'une voie ferrée sur sol tourbeux. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (Nancy)
- BRENGUIER F., BOUE P., BEN-ZION Y., VERNON F., JOHNSON C.W., MORDRET A., COUTANT O., SHARE P.-E., BEAUCE E., HOLLIS D., LECOCQ T., 2019** - Train Traffic as a Powerful Noise Source for Monitoring Active Faults With Seismic Interferometry. *Geophysical Research Letters* 46, 9529–9536
- CHENG F., XIA J., XU Z., HU Y., M, B., 2018** - Frequency–Wavenumber (FK)-Based Data Selection in High-Frequency Passive Surface Wave Survey. *Surveys in Geophysics* 39, 661–682
- DERODE A., LAROSE E., TANTER M., DE ROSNY J., TOURIN A., CAMPILLO M., FINK M., 2003** - Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L). *The Journal of the Acoustical Society of America* 113, 2973–2976
- MCMECHAN G.A., YEDLIN M.J., 1981** - Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics* 46, 869–874
- O'NEILL A., 2003** - Full-waveform reflectivity for modeling, inversion and appraisal of seismic surface wave dispersion in shallow site investigations. University of Western Australia. Thèse de doctorat. University of Western Australia
- PARK C.B., MILLER R.D., 2008** - Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 13, 1–11
- PARK C.B., MILLER R.D., XIA J., 1999** - Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800–808.
- SCHIMMEL M., PAULSEN H., 1997** - Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks. *Geophysical Journal International* 130, 497–505
- YOU B., MI B., GUAN B., ZHANG H., LIU Y., 2023** - High-quality surface wave retrieval from vibrations generated by high-speed trains moving on viaducts. *Journal of Applied Geophysics* 212, 105005

OHMPI V2024, RESISTIVIMETRE OPEN-SOURCE : DERNIERS DEVELOPPEMENTS ET MONITORING HYDROGEOPHYSIQUE

WATLET A.^{1,2}, CLEMENT R.², BLANCHY G.³, CAMUS F.¹, DUBOIS V.², FARGIER Y.⁴, FORQUET N.², GUYARD H.⁵, IMIG A.², QUATELA V.⁵, KAUFMANN O.¹

¹ Université de Mons, Géologie Fondamentale et Appliquée, Belgique, arnaud.watlet@umons.ac.be

² INRAE, REVERSAAL Research Unit, Villeurbanne, 69626, France

³ Flanders Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food (ILVO), 9820 Merelbeke, Belgium

⁴ GERS-RRO, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Univ Lyon, F-69675 Lyon, France

⁵ Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Grenoble, France

RESUME

Le Projet OhmPi a pour but de développer un système open hardware de mesure de résistivité électrique et de polarisation provoquée. Les objectifs principaux sont la mise à disposition de la communauté scientifique d'un outil flexible permettant de concevoir des expériences de mesure et de monitoring en laboratoire ou à petite échelle sur le terrain. Nous abordons ici les derniers développements d'OhmPi, illustrés notamment via un cas d'étude de suivi d'infiltration dans le sol au laboratoire de la Grotte de Lorette (Rochefort, Belgique).

Mots clés : *Open-source, open-hardware tomographie de résistivité électrique, monitoring géoélectrique, zone critique*

ABSTRACT

The OhmPi Project aims to develop an open-source, open-hardware resistivity meter. OhmPi was initiated to provide a flexible tool allowing to design surveys and monitoring experiments in the lab or or at relatively small-scale in the field. Here, we describe the latest developments of OhmPi and we present dedicated applications including a case study detailing the field deployment of a small-scale 3D panel for monitoring water infiltration at the Rochefort Cave Laboratory (Belgium).

Key words: *Open-source, open-hardware, electrical resistivity tomography, geoelectrical monitoring, critical zone*

INTRODUCTION

Les méthodes géophysiques de proche surface sont utilisées de plus en plus fréquemment pour investiguer un grand nombre de problèmes en hydrologie, en écologie, voire dans d'autres domaines environnementaux (Binley and Slater, 2020). Ces dernières années, les techniques de monitoring géophysiques, et géoélectriques en particulier, sont également devenues plus populaires pour étudier et suivre des processus physiques tels que l'infiltration d'eau (Slater and Binley, 2021), les glissements de terrains (Whiteley et al. 2019), etc. Dans ce contexte, l'accessibilité des équipements géophysiques devient un enjeu primordial pour favoriser un usage répandu du recours aux techniques géophysiques et le développement de nouvelles stratégies d'acquisitions de données plus performantes et versatiles. Les équipements commerciaux sont intimement liés à l'évolution de la géophysique appliquée et sont généralement des outils robustes et pratiques. Néanmoins, leur coût peut être prohibitif dans une série de contextes, tels que pour des applications à caractère humanitaire, sans but lucratif, ou simplement quand il s'agit d'équiper un grand nombre de sites d'étude. Pour ces raisons, le projet OhmPi (Clément et al., 2020) a été initié afin de mettre à la disposition de la communauté scientifique un résistivimètre open-source et à bas coûts.

Les nouvelles fonctionnalités disponibles dans la version d'OhmPi v2024 permettent une mesure plus stable et précise de la résistivité, une injection allant jusqu'à 50 V, ainsi que la mesure de polarisation provoquée et de polarisation spontanée. OhmPi v2024 fait également la part belle aux expériences de monitoring via une nouvelle interface IoT permettant une gestion à distance facilitée ainsi que le

pilotage de l'instrument via un réseau de capteurs externes. Ces éléments sont détaillés dans les cas d'études présentés. L'ensemble des derniers développements d'Ohmpi sont recensés, sur un dépôt Gitlab (<https://gitlab.irstea.fr/reversaal/Ohmpi>).

STRUCTURE ET CARACTÉRISTIQUES DE L'OHMPI V2024

La partie hardware de l'Ohmpi se compose d'un Raspberry Pi qui est connecté à une carte d'acquisition gérant l'injection et la mesure de potentiel et qui pilote également une série de multiplexeurs (MUX) permettant de commuter les relais et d'adresser les électrodes. L'injection est paramétrisée via un module d'injection externe stabilisé en tension. Les circuits électroniques ainsi que la liste des composants pour les cartes de mesures et MUX sont disponibles sur le dépôt du projet (<https://gitlab.irstea.fr/reversaal/Ohmpi>). Les coûts associés aux composants, à la fabrication des cartes électroniques et l'assemblage de l'Ohmpi sont relativement faibles en comparaison avec des systèmes commerciaux (~3000 € pour un Ohmpi v2024 64 électrodes).

La partie software permettant d'interagir avec l'instrument est écrite en Python. L'interaction peut se faire directement via l'API Python, une interface web ou des protocoles de communication issus de l'IoT (protocoles MQTT). La figure 1 détaille l'architecture du système.

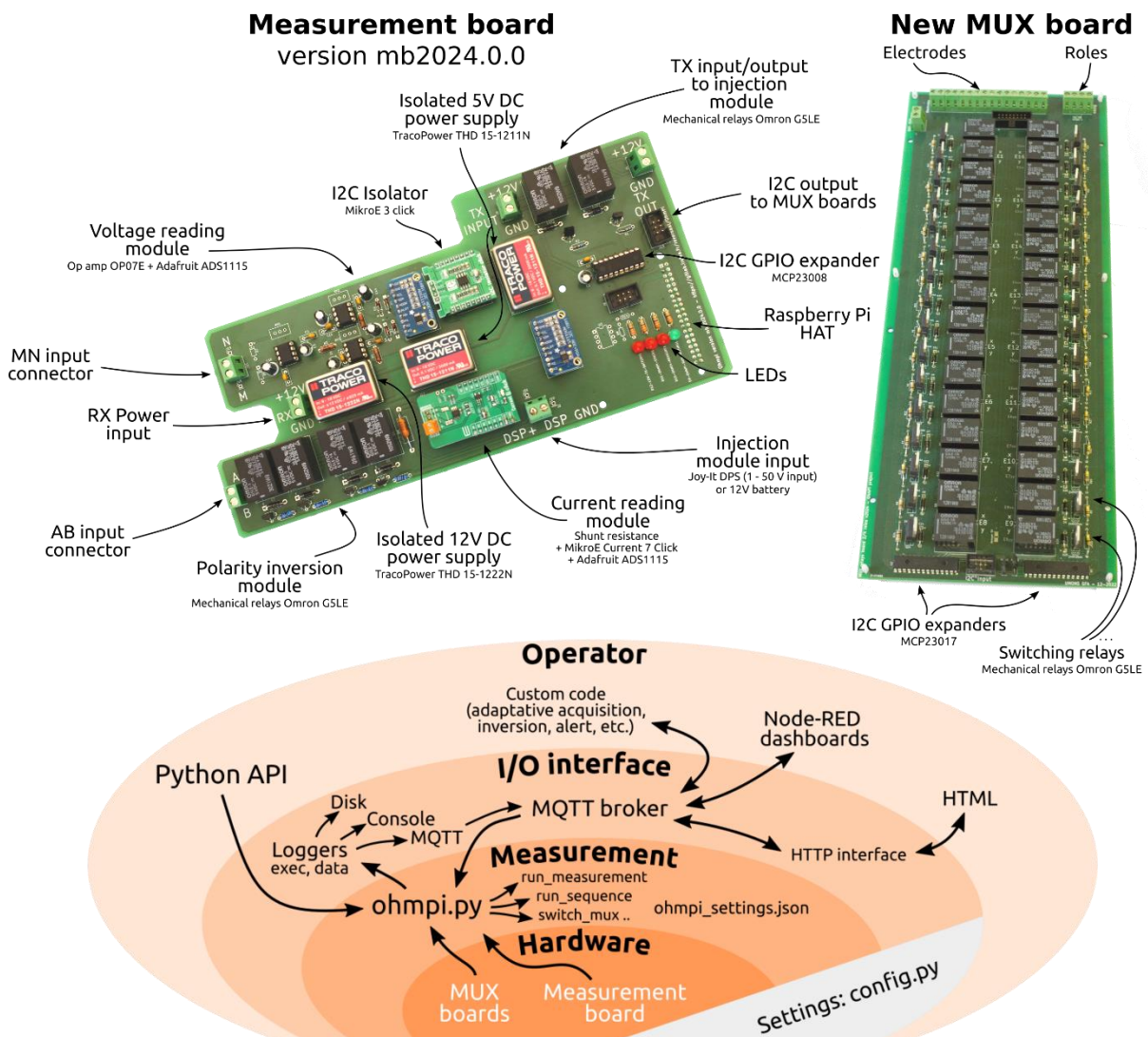


Fig. 1 Nouvelle carte d'acquisition et nouvelle carte MUX, ainsi qu'un schéma détaillant l'architecture d'Ohmpi v2024.

Les derniers développements ont concerné principalement :

- Sur la carte d'acquisition, la mesure de potentiel a complètement été isolée du reste de l'équipement pour une mesure avec une masse flottante permettant des injections de courant plus importantes. Pour l'isolation, nous avons utilisé un isolateur d'interface, de Mikroe (I2C Isolator Click), basé sur un isolateur optique (ISO1540). En ce qui concerne la partie mesure de courant pour simplifier le montage et améliorer la mesure, OhmPi inclut également un module Mikroe (Current Click 7), ce module est basé sur un amplificateur de détection de courant bidirectionnel (INA282).
- Un nouveau format de carte MUX à 32 relais a été conçu pour permettre d'adresser plusieurs rôles sur une même carte. Étant plus flexible, elle permet, au choix, d'adresser 8 électrodes et 4 rôles (a, b, m, n) ou 16 électrodes et 2 rôles (a, b ou m, n). Cette nouvelle fonctionnalité permettra à terme l'intégration de cartes MUX multi-canaux sur les rôles de mesure de tension ($m, n1, n2, n3, \dots$) dont le développement est en cours.
- Le code Python permettant d'interagir avec l'instrument a également été complètement repensé pour dissocier au sein du code les commandes hardware de l'interface d'utilisation. Cette nouvelle architecture permettra une meilleure intégration des développements hardware futurs sans modifier les fonctions de haut niveau visible pour l'opérateur ; chaque nouvelle carte ayant sa propre librairie python importée via un fichier de configuration dans le code principal.

APPLICATIONS

Tests de mesures et comparaisons avec des résistivimètres commerciaux

La nouvelle version de l'OhmPi a été testée sur le terrain dans diverses conditions et les résultats ont été comparés à des jeux de données acquis avec des résistivimètres commerciaux. Les premiers tests ont permis de définir une plage de mesure optimale de l'OhmPi, ainsi que des conditions de terrain et des dispositifs de mesure idéaux.

Par exemple, sur un site limoneux ou argileux, où les résistances de contact sont relativement faibles ($< 2 \text{ k}\Omega$), les ordres de grandeur en terme de résolution, erreurs de répétabilité, et erreurs réciproques sont relativement comparables aux systèmes commerciaux (Figure 2), particulièrement pour des dispositifs de mesures Wenner et une distance entre électrode $< 1 \text{ m}$ et des facteurs géométriques modérés ($< \sim 500 \text{ m}$). Vu les capacités d'injection réduite de l'OhmPi (50 V), et des limitations de la puce de mesure de tension (ADS 1115), l'erreur sur la mesure est forcément plus élevée pour des dispositifs de mesures plus grands ou ayant un rapport signal sur bruit plus élevé (ex. dipole-dipole).

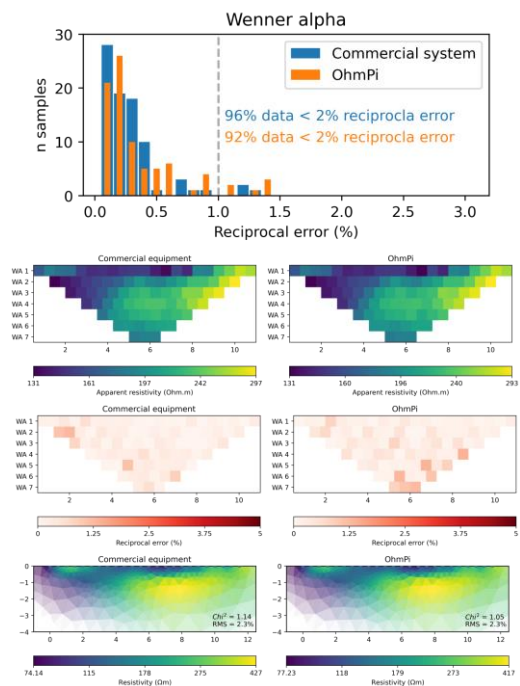


Fig. 2 – Comparaison entre l'OhmPi et un équipement commercial (dispositif Wenner α et 16 électrodes)

Exemple de suivi sur le site de la Grotte de Lorette (Rochefort, Belgique)

La nouvelle version de l'OhmPi permet une gestion optimale des expériences de monitoring sur site d'étude. Cet aspect est illustré via le déploiement de l'OhmPi v2024 sur le site du laboratoire de la

Grotte de Lorette (Rochefort, Belgique) pour suivre l'infiltration d'eau dans le sol en milieu karstique. Le dispositif de mesure consiste en un panneau 3D de 6 x 1,8 m permettant d'investiguer les processus hydrologiques à l'interface sol-plantes. Nous détaillerons les outils software spécialement développés pour gérer cette expérience de suivi ainsi que les premiers résultats de l'étude.

CONCLUSIONS

L'OhmPi, un résistivimètre open-hardware et à bas coûts, a été développé pour permettre une plus grande accessibilité des outils géoélectriques notamment dans les pays en voie de développement, ainsi qu'une plus grande flexibilité dans la prise en main, le déploiement et la conception d'expériences en laboratoire ou sur site d'étude à petite échelle, particulièrement pour la recherche. S'inscrivant dans la philosophie open-source, l'équipe OhmPi est ouverte à toute nouvelle collaboration, aussi bien pour le développement d'outil hardware ou software que pour des tests de mesures sur le terrain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BINLEY, A. AND SLATER, L., 2020. – Resistivity and induced polarization: Theory and applications to the near-surface earth. *Cambridge University Press*.

CLEMENT, R., FARGIER, Y., DUBOIS, V., GANCE, J., GROS, E. AND FORQUET, N., 2020. – OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale. *HardwareX*, 8, p.e00122.

SLATER, L., AND BINLEY, A. 2021 – Advancing hydrological process understanding from long-term resistivity monitoring systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), p.e1513.

WHITELEY, J.S., CHAMBERS, J.E., UHLEMANN, S., WILKINSON, P.B. AND KENDALL, J.M., 2019. Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*, 57(1), pp.106-145.

CARACTERISATION DE DEFAUTS LE LONG DE LA PLATEFORME FERROVIAIRE PAR INVERSION DE LA DISPERSION DES ONDES DE SURFACE : CAS D'ETUDE LE LONG DE LA LGV SUD-EST

BURZAWA A.^{1,2}, BODET L.¹, DANGEARD M.², CUNHA TEIXEIRA J.^{1,2}, CARDENAS J.¹, SANCHEZ GONZALEZ R.^{1,3}, FONDA M.², DHEMAIED A.²

¹ Sorbonne Université, CNRS EPHE UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75252 Paris 05, France, audrey.burzawa@reseau.sncf.fr

² SNCF Réseau, 6 avenue François Mitterrand 93210 Saint-Denis, France

³ Département de Géosciences, Mines Paris – PSL, PSL Université, Paris, France

RESUME

Le diagnostic mécanique des plateformes ferroviaire par le biais de méthodes non-destructives est essentiel pour adapter leur maintenance. Les méthodes sismiques et particulièrement celle faisant appel aux ondes de surface ont été adaptées et appliquées à la caractérisation de tels ouvrages. Un site d'étude en contexte de ligne à grande vitesse montre ici comment des variations de profils de vitesse sont liées à des désordres observés en surface.

Mots clés : plateforme ferroviaire, paramètres mécaniques, méthodes sismiques, ondes de surface.

ABSTRACT

The mechanical diagnosis of railway earthwork with non-destructive methods is essential to adapt their maintenance. Seismic methods, and in particular those using surface waves, have been adapted and applied to the characterisation of such structures. A study site in the context of a high-speed line shows here how variations in velocity profiles are linked to disorders observed on the surface.

Key words: railway earthwork, mechanical properties, seismic methods, surface waves.

INTRODUCTION

Les opérations de renouvellement et de maintenance de réseau ferré ont pour but de garantir les objectifs de sécurité, de performance et de pérennité. Afin d'adapter au mieux la nature et la cyclicité de ces opérations, compte tenu du patrimoine et de l'état de vieillissement des structures d'assises et du sols supports, il est nécessaire d'évaluer régulièrement l'état mécanique des couches de sols constituant la plateforme ferroviaire (PF). Pour évaluer l'état mécanique de ces PF, les paramètres considérés sont les objectifs : (1) de compactage, définis selon les préconisations du Guide des Terrassements Routier (GTR) et mesurés à l'aide d'un gamma-densimètre ; (2) de portance, mesurés par essai à la plaque ou à la Dynaplaque (module EV2¹). Ces mesures sont réalisées sur la plateforme ferroviaire, inaccessible dans le cas de voies circulées. Il est donc nécessaire de développer une méthodologie à grand rendement permettant d'obtenir les propriétés mécaniques de la PF sans dépose de la voie.

Pour répondre à cette problématique, SNCF Réseau ainsi que différents acteurs internationaux du domaine ferroviaire ont proposé des développements méthodologiques en géophysique appliquée. L'une des seules méthodes non destructives qui permet de caractériser les variations de propriétés mécaniques est la sismique. La méthode d'analyse des ondes de surface ou Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) (Foti *et al.*, 2018) est en particulier utilisée pour la caractérisation d'Ouvrages en Terre (OT) ferroviaires (Bergamo *et al.*, 2016 a,b ; Dashwood *et al.*, 2017 ; Kyrkou *et al.*, 2022) afin d'éviter les effets 3D particulièrement présents lors de l'analyse plus classiques des ondes de volume. A partir d'études en laboratoire et de campagnes de mesures *in situ* sur un site pilote, Dhemaied *et al.* (2014a) et Bodet (2019) ont montré que la caractérisation de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (Vs) est un critère pertinent pour l'évaluation de l'état mécanique des sols supports. Un outil de quantification des mesures (vers des modules mécaniques) par le biais de l'inversion bayésienne de la dispersion des ondes de surface et la confrontation à d'autres données géophysiques

¹ NF P 94-117-1 : Portance des plates-formes - Partie 1 : module sous chargement statique à la plaque (EV2)

et géotechniques a par la suite été développé (Burzawa *et al.*, in Press). Après avoir validé son implémentation systématique le long d'un linéaire (Burzawa *et al.*, 2023) et la capacité à proposer des résultats en termes de propriétés mécaniques, nous avons appliqué ces avancées méthodologiques à un autre site présentant des désordres liés à la PF. Cette communication présente les résultats de la campagne de mesures sur ce site à forts enjeux et dont l'hétérogénéité révèle des degrés de complexité supérieurs aux travaux cités précédemment.

CONTEXTE ET CAMPAGNE DE MESURES

Site d'étude

La zone d'étude est située sur la ligne à grande vitesse (LGV) Sud Est. Ce site présente des désordres de la plateforme marqués par des anomalies de géométrie de la voie fréquentes, un effort de maintenance accru et des remontées glaiseuses dans le ballast. Cette pollution a aussi été détectée à partir des données géoradar et des sondages destructifs (pénétrromètre dynamique léger et carotté). Pour limiter ce phénomène, un géotextile dit de "séparation/filtration" a été placé sous cette couche (voir Fig. 1). La succession lithologique à l'aplomb de la voie est définie à l'aide du sondage carotté réalisé à l'est de la zone : une couche de sable cohésif d'1 m d'épaisseur reposant sur une couche d'argile sableuse très peu de 0,85 m d'épaisseur. Le terrain naturel est composé d'argile.

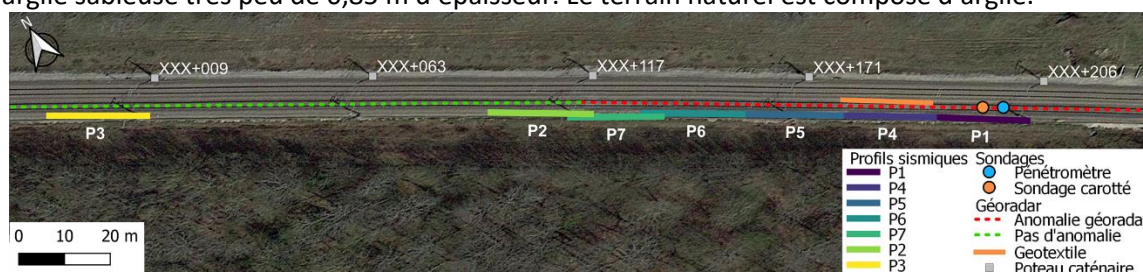


Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude. Les profils sismiques, implantés sur la piste, sont représentés avec échelle de couleurs suivant la position. Les anomalies géoradar sont notées en pointillés rouges. La zone de géotextile est notée en orange. Les sondages sont représentés par des cercles (bleu pour le pénétrromètre dynamique léger et orange pour le sondage carotté).

Acquisition sismique

7 profils sismiques ont été réalisés sur la zone et placés tels que la zone polluée (pointillés rouges) et la zone saine soient investiguées (pointillés verts). Pour une bonne caractérisation des premiers mètres de la PF, chaque dispositif sismique est composé de 96 capteurs espacés de 25 cm. Cette géométrie de dispositif permet une résolution suffisante des premiers mètres de la PF. La profondeur maximale d'investigation, calculée empiriquement, est de 8 mètres. Pour chaque profil, un tir sismique a été réalisé à l'aide d'une massette heurtant verticalement une plaque métallique tous les 24 géophones et à une demi distance inter-trace avant le premier et après le dernier géophone (chaque tir correspond à la sommation de 5 coups de massette pour améliorer le rapport signal sur bruit).

RESULTATS

Sismogrammes

Dans la suite du résumé, seuls les résultats des profils sismiques P1, dans la zone de désordre, et P3, dans la zone saine, sont présentés (voir Fig.1 pour la localisation). Les vitesses de déplacements particuliers verticaux générés à la surface du sol à la suite de chaque impact massette/plaque sont collectés par les géophones et représentés sous la forme de sismogrammes (Fig. 2). Les tirs directs et réciproques ont également été comparés pour vérifier l'hypothèse d'un milieu latéralement homogène. La fenêtre de 72 géophones semble être la moins marquée par les hétérogénéités latérales à l'aplomb de chaque dispositif. En comparant le tir direct des deux zones (Fig. 2), on constate que le champ d'onde de surface, identifiable pour les deux profils, est de même ordre de grandeur en vitesse apparente mais présente un contenu fréquentiel à plus basse fréquence pour P3. Un bruit est également présent sur les deux sismogrammes ainsi que des traces de mauvaises qualités résultant d'un mauvais couplage du géophone avec le sol.

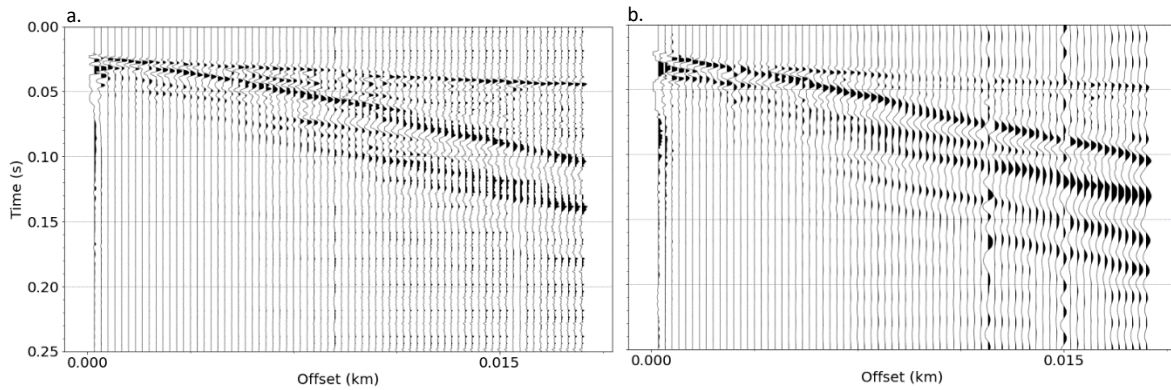


Fig. 2 – Sismogrammes des tirs directs pour une fenêtre de 72 géophones : (a) profil sismique P1 et (b) profil sismique P3 (voir Fig.1 pour la localisation).

Inversion de la dispersion des ondes de surface

Les sismogrammes sont transposés dans le domaine fréquence-vitesse de phase pour obtenir l'image de dispersion associée. Les *maximas* d'énergie sont extraits pour le mode fondamental (M0) et le premier mode supérieur (M1) de propagation (voir Fig. 3a et d). La dispersion pointée présente des vitesses plus faibles pour P1 (compte tenu des incertitudes importantes) et un comportement représentatif d'un milieu inversement dispersif. La différence observée dans la dispersion est cohérente avec celle observée dans les sismogrammes et peut être expliquée par un changement de structure et/ou de propriétés mécaniques du milieu. Celles-ci peuvent être déduites de l'inversion de la dispersion (Foti *et al.*, 2018) et qui est proposée ici au formalisme bayésien. Connaissant la géologie locale et la structure de la PF, la paramétrisation du problème inverse a été contrainte selon les conditions suivantes : le nombre de couche de sol a été fixé à 4 ; les paramètres variables sont les Vs des 4 couches et l'épaisseur de la 3^{ème} couche. Les autres paramètres du problème sont fixés. Basés sur cet espace des paramètres, 224 640 modèles possibles sont générés de façon systématique à partir desquels les courbes de dispersion synthétiques calculées sont comparées aux données acquises (Fig. 3a et d). A partir de l'ensemble de ces comparaisons (cf. Burzawa *et al.*, submitted), l'approche bayésienne permet d'exprimer les densités de probabilité marginales 1D pour les 5 paramètres (Fig. 3c et f). Ces résultats préliminaires montrent des profils de vitesse significativement différents avec une inversion de vitesse dans les premiers mètres de la PF à l'aplomb du profil sismique P1 alors que le profil sain (P3) montre un milieu dit normalement dispersif. Ces variations de géométrie et de vitesse pourraient être liées aux désordres observés en surface.

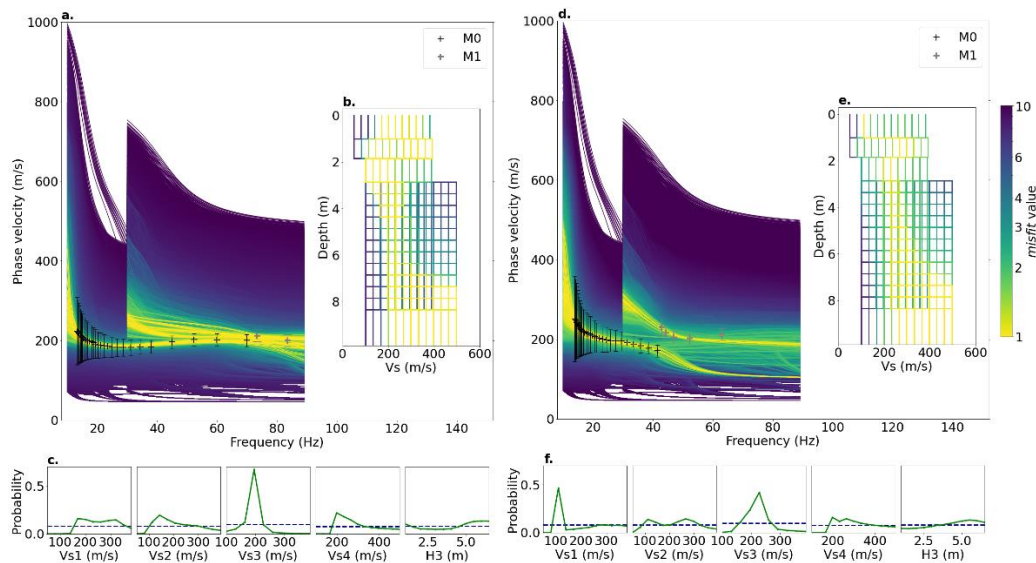


Fig. 3 – Résultat de l'inversion préliminaire pour P1 (a, b, c) et pour P3 (d, e, f). (a et d) dispersion synthétique représentée avec une échelle de couleur selon la misfit (comparaison de la dispersion calculée avec la dispersion mesurée cf. Burzawa *et al.*, submitted). (b et e) profil de vitesse représenté selon la misfit. (c et f) densités de probabilité marginales 1D pour les 5 paramètres du problème.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats de cette campagne de mesures le long d'un tronçon de LGV permettent de mettre en évidence des variations de la dispersion des ondes de surface et de faire le lien avec les désordres de la PF. Les forts *a priori* sur la structure de la PF et la géologie locale a permis de réaliser des inversions au formalisme bayésien très contraintes en fixant certains paramètres. Les résultats, développés pour deux profils distincts (zone de désordre et zone saine) montrent un profil de vitesse à l'aplomb de la zone de désordre avec une V_s plus faible en profondeur ainsi qu'une inversion de vitesse. Afin d'automatiser la chaîne de traitement de la méthode développée pour le ferroviaire, des outils de pointé et d'inversion semi-automatiques de la dispersion *via* des algorithmes d'apprentissage machine sont également en cours de développement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERGAMO P., DASHWOOD B., UHLEMANN S., SWIFT R., CHAMBERS J.E., GUNN D.A., DONOHUE S., 2016a** – Time-lapse monitoring of climate effects on earthworks using surface waves. *Geophysics* 81, EN1-EN5, doi: <https://doi.org/10.1190/geo2015-0275.1>.
- BERGAMO P., DASHWOOD B., UHLEMANN S., SWIFT R., CHAMBERS J.E., GUNN D.A., DONOHUE S., 2016b** – Time-lapse monitoring of fluid-induced geophysical property variations within an unstable earthwork using P-wave refraction. *Geophysics* 81, EN17-EN27, doi: <https://doi.org/10.1190/geo2015-0276.1>.
- BODET L., 2019** – Surface waves modelling and analysis in media of increasing degrees of complexity, 2019. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, [https://urldefense.com/v3/https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-02866882v2;!!Nto2ANp9CeU!AFDS8hbeRGDSuZ5O7hzp_THmduZCwtSxa1f4LQxccCSCYeOriQK2Ckc1qYuRT00aR5EBosKC8dGbFlqYFjT6NRX8rcgXMWGCIPJA9zo9bsNfAIU\\$](https://urldefense.com/v3/https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-02866882v2;!!Nto2ANp9CeU!AFDS8hbeRGDSuZ5O7hzp_THmduZCwtSxa1f4LQxccCSCYeOriQK2Ckc1qYuRT00aR5EBosKC8dGbFlqYFjT6NRX8rcgXMWGCIPJA9zo9bsNfAIU$)
- BURZAWA A., BODET L., DHEMAIED A., DANGEARD M., PASQUET S., VITALE Q., BOISSON-GABORIAU J., CUI Y.J., IN PRESS** – Detecting mechanical property anomalies along railway embankments by Bayesian appraisal of MASW data. *Construction and Building Materials*, doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4399748>
- BURZAWA A., BODET L., DANGEARD M., CUNHA TEIXEIRA J., FONDA M., DHEMAIED A., 2023** – Detecting spatial and temporal variations in mechanical properties along railway embankments by Bayesian appraisal of MASW data. In: *Railway Engineering 2023*.
- DASHWOOD B., UHLEMANN S., BERGAMO P., GUNN D.A., DONOHUE S., CHAMBERS J., SWIFT R., CRISTOPHE T., TAXIL J., 2017** – Time-lapse monitoring of geophysical proxies to geotechnical properties in a railway embankment. In: *Railway Engineering 2017*.
- DHEMAIED A., CUI Y.J., TANG A.M., 2014a** – Étude de la sensibilité de la raideur mécanique des sols supports à la variation de la teneur en eau. *Rapport d'activité ENPC/SNCF*.
- FOTIS., HOLLENDER F., GAROFALO F., ALBARELLO D., ASTEN M., BARD P-Y., COMINA C., CORNOU C., COX B., DI GIULIO G., FORBRIGER T., HAYASHI K., LUNEDI E., MARTIN M., MERCERAT D., OHRNBERGER M., POGGI V., RENALIER F., SICILIA D., SOCCO V., 2018** – Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the interPACIFIC project. *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, 2367–2420, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>.
- KYRKOU K., FROST M., FLEMING P., SARTAIN N., TRINDER S., 2022** – Seismic Surface Waves Methods for High-Speed Rail Earthworks Compliance: A Review of Measurement Practice. In: *Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22)*, doi: <https://doi.org/10.11159/icgre22.184>.

ELECTRICAL RESISTIVITY AND TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC DATA INVERSION USING A QUASI-NEWTON METHOD

MOHAND-SAID A.¹, MARQUIS G.¹, GIRARD JF.¹

¹ ITES, Strasbourg, France, amohandsaid@unistra.fr

RESUME

Les données de résistivité électrique en courant continu (DC) et d'électromagnétisme (EM) sont communément inversées indépendamment. Bien que ces données soient liées à la même propriété physique, elles ne mettent pas nécessairement en évidence les mêmes structures. La combinaison de ces données dans un processus d'inversion permet d'obtenir un modèle de résistivité cohérent avec les deux jeux de données, et donc plus fiable. Nous avons testé une approche d'inversion 1D incluant des données DC et EM en domaine temporel (TDEM). Cette approche se base sur une méthode Quasi-Newton permettant d'approximer la matrice jacobienne à chaque itération.

Mots clés: Electromagnétisme, ERT, Résistivité, Inversion, Open-source

ABSTRACT

Direct Current (DC) and electromagnetic (EM) data are routinely inverted separately to get information on subsurface resistivity structures. Although these data are sensitive to the same physical property, they do not highlight same structures. Combination of these data in an inversion process allows to get a resistivity model fitting both datasets, thus more reliable. We tested an approach of 1D inversion involving DC resistivity and time-domain EM (TDEM) datasets. This approach is based on a Quasi-Newton method allowing to approximate Jacobian matrix at each iteration.

Key words: Electromagnetics, ERT, Resistivity, Inversion, Open-source

INTRODUCTION

Les modèles de propriétés physiques issus des inversions permettent théoriquement d'expliquer les données mesurées sur le terrain. Toutefois ces modèles ne sont pas nécessairement représentatifs de la réalité. Plusieurs approches ont été utilisées pour contraindre les algorithmes d'inversion à converger vers une solution plus proche de la réalité. La mise en relation de plusieurs jeux de données dans un même processus d'inversion est une des approches permettant d'obtenir des modèles de propriétés physiques plus fiables (e.g. Carillo & Gallardo 2018, Christensen 2022, Vozoff & Jupp 1975).

L'inversion de données géophysiques est un processus coûteux en ressources de calcul et ce coût peut représenter un frein à leur application. Le calcul des matrices de sensibilité requiert autant de calculs de modélisation directe qu'il y a de paramètres dans le modèle. L'approximation des matrices de sensibilité plutôt que leur calcul, par différences finies par exemple, permet de réduire le nombre de calculs de modélisation direct du processus d'inversion et donc le temps de calcul global.

Méthode d'inversion

Les méthodes d'inversion se basent sur la minimisation d'une fonction coût intégrant l'écart entre les données mesurées et les données calculées sur le modèle courant (eq1). Lorsque plusieurs jeux de données sont inclus dans le même processus d'inversion la minimisation de cette fonction coût passe par la minimisation simultanée des écarts entre les différents jeux de données et les données calculées respectives (eq2, eq3).

$$(eq1) \phi(m_{res}, m_{res}) = \varepsilon_{em} \phi_{em} + \varepsilon_{ert} \phi_{ert}$$

$$(eq2) \phi_{ert} = \|W_{ert} (d_{ert} - (F_{ert}(m_{res})))\| + \tau_{ert} \|Lm_{res}\|^2$$

$$(eq3) \phi_{em} = \|W_{em} (d_{em} - (G_{em}(m_{res})))\| + \tau_{em} \|Lm_{res}\|^2$$

L'algorithme d'inversion présenté se base sur une approche Quasi-Newton, la méthode de Broyden (Broyden 1965). Cette méthode présente de bons résultats pour l'inversion de données DC (Loke & Barker 1996). Son intérêt repose sur l'approximation de la matrice jacobienne à chaque itération à partir du gradient des réponses des modélisations directes (eq4).

$$(eq4) B_{i+1} = B_i + \frac{((F(m_{i+1}) - F(m_i)) - B_i(m_{i+1} - m_i))(m_{i+1} - m_i)^T}{(m_{i+1} - m_i)^T (m_{i+1} - m_i)}$$

Ainsi, la matrice jacobienne est incrémentalement modifiée, le plus faiblement possible. Cette méthode requiert donc une matrice jacobienne initiale (B_0) la plus exacte possible.

Une fois l'approximation de la matrice jacobienne obtenue, la perturbation du modèle (p_i) peut être déterminée (eq5).

$$(eq5) (B_i^T B_i + \lambda C^T C) p_i = B_i^T (F(m_{vrai}) - (F(m_i)))$$

Afin d'optimiser la convergence du problème inverse une recherche linéaire est appliquée pour déterminer la longueur du pas à réaliser pour minimiser la fonction coût.

Application de la méthode

Les données TDEM et DC étant dépendantes de la même propriété physique, l'inversion combinée de ces deux jeux de données peut se faire en mesurant l'écart entre les données observées et calculées de ces deux méthodes à partir du même modèle de résistivité électrique.

Pour cette application, le modèle synthétique suivant a été utilisé : deux couches résistives en surface suivies d'une fine couche conductrice et d'un socle résistant (Figure 1). La modélisation directe des données EM a été réalisée à partir des codes de SimPEG, en simulant des données synthétiques pour un levé Moving Loop (Cockett et al 2015). Pour les données DC un code basé sur l'algorithme de Pekeris (Pekeris 1940) adapté pour un levé Pôle-Dipôle a été utilisé.

Les inversions séparées des données TDEM et DC (Figure 1) montrent des différences de localisation des contrastes de résistivité. L'inversion des données DC modélise correctement les deux premières couches (Figure 1c). En revanche l'épaisseur de la couche conductrice est mal contrainte. Le modèle obtenu par inversion des données EM (Figure 1d) montre un pic de conductivité à la même profondeur que la couche conductrice. Toutefois les structures de proche-surface ne sont pas bien définies.

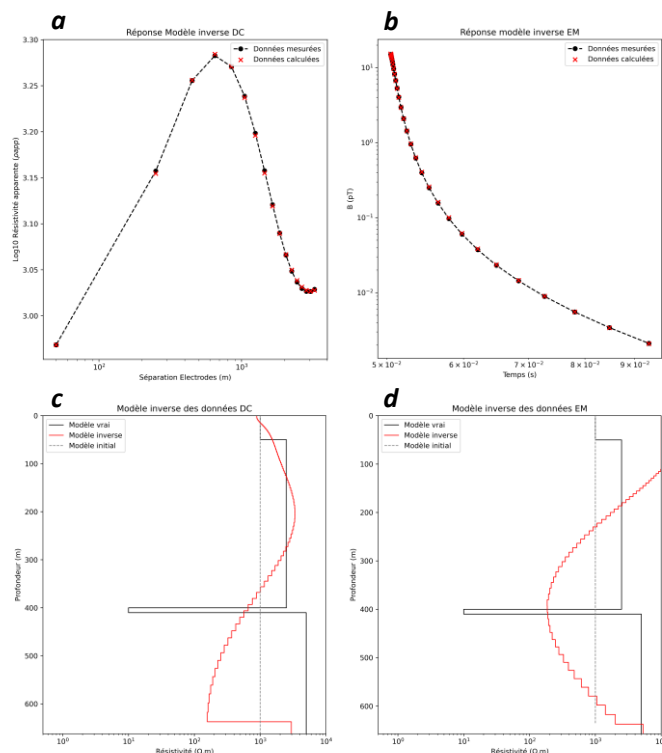


Figure 1 – Résultats des inversions séparées de données EM et DC. Modélisations directes des modèles inverse : DC (a) et EM (b). Modèles inverse des données DC (c) et EM (d)

Les résultats d'inversion jointe (Figure 2) reproduisent bien les tendances des données synthétiques, malgré des différences notables de valeurs. C'est en particulier vrai pour les données DC qui sont moins bien reproduites (Figure 2b). La tendance globale du modèle inverse (Figure 2a) est bien représentative du vrai modèle. La couche conductrice est bien identifiée et son contraste avec les couches voisines

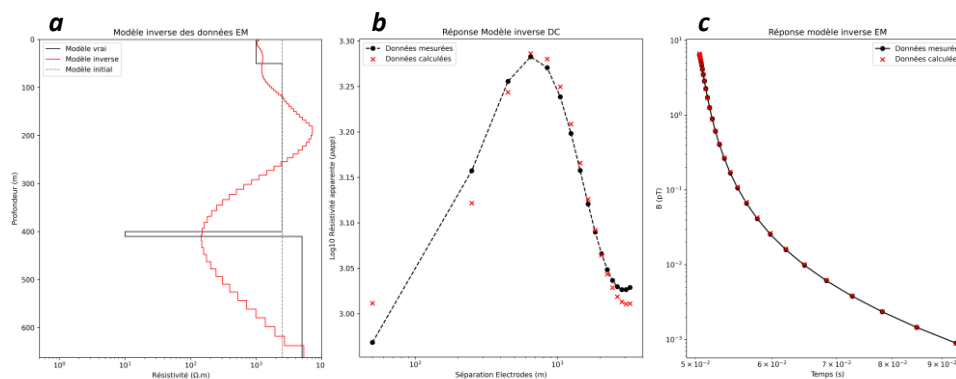


Figure 2 - Résultats d'inversion jointe des données DC et EM. Modèle inverse (a). Modélisations directes DC (b) EM (c)

est mieux modélisé que sur les résultats d'inversion séparées. Toutefois on observe que la deuxième couche en partant de la surface est mal contrainte, sa résistivité est surestimée.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons développé un algorithme d'inversion jointe de données de résistivité électrique et de données électromagnétiques. Cette méthode d'inversion se base sur une approche Quasi-Newton visant à approximer une matrice de sensibilité plutôt que de la calculer par différences finies. Cette approximation permet de réduire le temps d'inversion pour des modèles contenant de nombreux paramètres. Les résultats obtenus avec cette approche montrent une bonne résolution en surface et en profondeur tout en étant fidèles aux données mesurées.

Nous travaillons actuellement sur l'extension de l'approche présentée ici à des modèles de résistivité 2D et 3D, où le gain de temps de calcul amené par le Quasi-Newton sera encore plus significatif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BROYDEN C.G., 1965 – A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. *Mathematics of Computation*, volume 19, pages 577-593.

CARILLO J., GALLARDO L.A., 2018 – Joint two-dimensional inversion of magnetotelluric and gravity data using correspondence maps. *Geophysical Journal International*.

CHRISTENSEN N.B., 2022 – Joint inversion of airborne TEM data and surface geoelectrical data. The Egebjerg case. *Journal of Applied Geophysics*, volume 196.

COCKETT R., KANG S., HEAGY L.J., PIDLISECKY A., OLDENBURG D.W., 2015 – SimPEG: An Open Source Framework for Simulation and Gradient Based Parameter Estimation in Geophysical Applications. *Computers & Geosciences*.

LOKE M.H., BARKER R.D., 1996 – Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, volume 44, pages 499-523.

PEKERIS C. L., 1940 – Direct method of interpretation in resistivity prospecting. *Geophysics*, volume 5, pages 31-42.

VOZOFF K., JUPP D.L.B., 1975 – Joint Inversion of Geophysical Data. *Geophysical Journal International*, volume 42, issue 3, pages 977-991.

PYREFRA – TRAITEMENT ET INVERSION DE DONNEES DE SISMIQUE REFRACTION

ZEYEN Hermann¹, LEGER Emmanuel¹

¹ Laboratoire GEOPS, Université Paris-Saclay, CNRS, Bât. 504, 91405 Orsay cedex, France

RESUME

Nous présentons un nouveau logiciel open-source multi-plateformes en langage Python pour l’affichage, le traitement et le picking de données de sismique réfraction. Différents types d’affichage des temps mesurés sont proposés permettant un contrôle de la qualité des picks. Le package pyGimli est intégré pour permettre une inversion tomographique des temps d’arrivée donnant des modèles de vitesse. L’utilisation extensive en enseignement a montré que la prise en main du logiciel est intuitive et suffisamment simple pour s’adapter à des enseignements de tous niveaux.

Mots clés : sismique réfraction, traitement de données, inversion, proche-surface, Python

ABSTRACT

We present a new open-source multiplatform computer program written in Python for display, treatment and picking of refraction seismic data. Different types of display of measured times allow for quality control of the time picks. pyGimli has been integrated for tomographic inversion of the measured travel times. Extensive use in teaching showed that the program is intuitive and user-friendly.

Key words: refraction seismics, data treatment, inversion, near-surface

INTRODUCTION

Peu de logiciels open-source existent dans la communauté pour le traitement de données de sismique réfraction. Parmi ce nombre restreint, encore moins sont multi-plateformes et créés pour l’enseignement. Récemment, Guedes et al. (2022) ont publié un logiciel écrit en Python avec des fonctionnalités de base d’affichage, picking et inversion. En suivant la philosophie Open-Source de réutilisation de packages existants, notamment en sismologie (obspy, Beyreuther et al., 2010) et modélisation géophysique générale (pyGimli, Ruecker et al., 2017), nous avons développé un nouveau logiciel destiné aux spécialistes comme aux non spécialistes, ainsi qu’aux, étudiants, permettant de s’approprier des données de sismique réfraction acquises sur le terrain et d’en obtenir rapidement un modèle du sous-sol.

Structure du logiciel

La GUI de PyRefra est basée sur le package QT5 (<https://pypi.org/project/PyQt5/>). En outre, le logiciel dépend de packages classiques comme Numpy, Matplotlib ou Scikit-learn. Pour la lecture des fichiers et le filtre de fréquences obspy est intégré et pour l’inversion tomographique la librairie pyGimli est utilisée (Fig. 1). PyRefra a été écrit en Python 3.10, mais pour l’intégration de pyGimli, il est nécessaire de l’installer sous Python 3.8. Le logiciel a été testé et utilisé sous Windows 10 et Ubuntu 20.04.

Le cœur du logiciel peut être résumé comme suit : (i) Lecture de fichiers en format SEG2 ou SEG Y ; (ii) affichage de différents types de « gather » comme shot, receiver ou distance gather ; (iii) mesure des temps de première arrivée (picking) ; (iv) inversion tomographique et affichage des résultats.

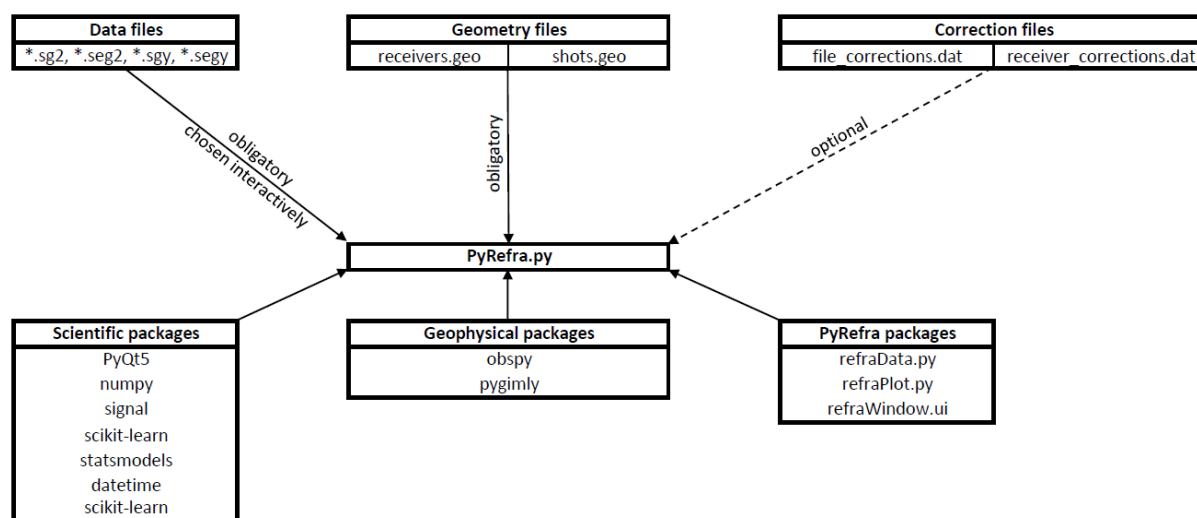


Fig. 1 : Structure de PyRefra, fichiers et librairies nécessaires.

Préparation des données

La géométrie d'acquisition doit être entrée à l'aide de deux fichiers pour les points de tir et pour les géophones respectivement (Fig. 1), contenant 4 ou 5 colonnes avec le numéro, les coordonnées X, Y, Z et, éventuellement, pour les géophones, la composante enregistrée. Même si les trois coordonnées sont entrées, le logiciel est conçu pour des lignes 2D (logiciel pour les acquisitions 3D en cours de développement). Néanmoins, les trois coordonnées sont utilisées pour le calcul des offsets. Deux fichiers additionnels permettent la correction d'erreurs typiques classiques commises lors de l'acquisition, comme par exemple : un mauvais numéro de point de tir ou de géophones ou une erreur dans le temps de déclenchement. Les fichiers de données peuvent être en format SEG2 ou SEG-Y. Leurs noms doivent contenir un préfixe et le numéro du fichier.

Travail avec le logiciel

Au début, l'utilisateur choisit les fichiers à ouvrir, généralement on va choisir tous les fichiers acquis sur une ligne. Les données acquises à partir du premier point de tir sont affichées sur l'écran ainsi que la liste des tirs disponibles (Fig. 2). Sur cette fenêtre graphique, on peut zoomer sur les premières arrivées et changer l'amplitude d'affichage. Via le menu « Filter », un filtre de fréquence ou de vitesse (f-k) peut être appliqué pour améliorer, si nécessaire, la qualité du signal. Le menu « Picking » permet de mesurer les temps d'arrivée manuellement ou d'utiliser différentes procédures (semi-) automatiques pour l'acquisition des mesures (p.ex. STA-LTA ou corrélation avec une de référence). Les picks mesurés automatiquement peuvent être corrigés manuellement. Chaque pick a une marge d'incertitude associée qui peut être, elle aussi, modifiée manuellement. Différents outils de contrôle de qualité des picks sont disponibles. Ainsi, l'affichage d'une distance gather permet de visualiser et éventuellement corriger des picks qui sont issus de rais inversés, devant, en principe, avoir les mêmes temps d'arrivée. Un affichage d'un profil de pseudo-vitesse (vitesse moyenne pour chaque pick) ou la distribution des lenteurs locales (basées sur la différence de temps d'arrivée de traces voisines) peuvent faire ressortir des problèmes.

Sous le menu « Utilities », il est possible, entre autres, de mesurer un simple modèle 1D de la distribution des vitesses, ajustant manuellement des droites aux temps d'arrivée mesurés, de calculer un simple modèle de facteur Q (mesure de l'atténuation des ondes) et de faire une inversion tomographique des données.

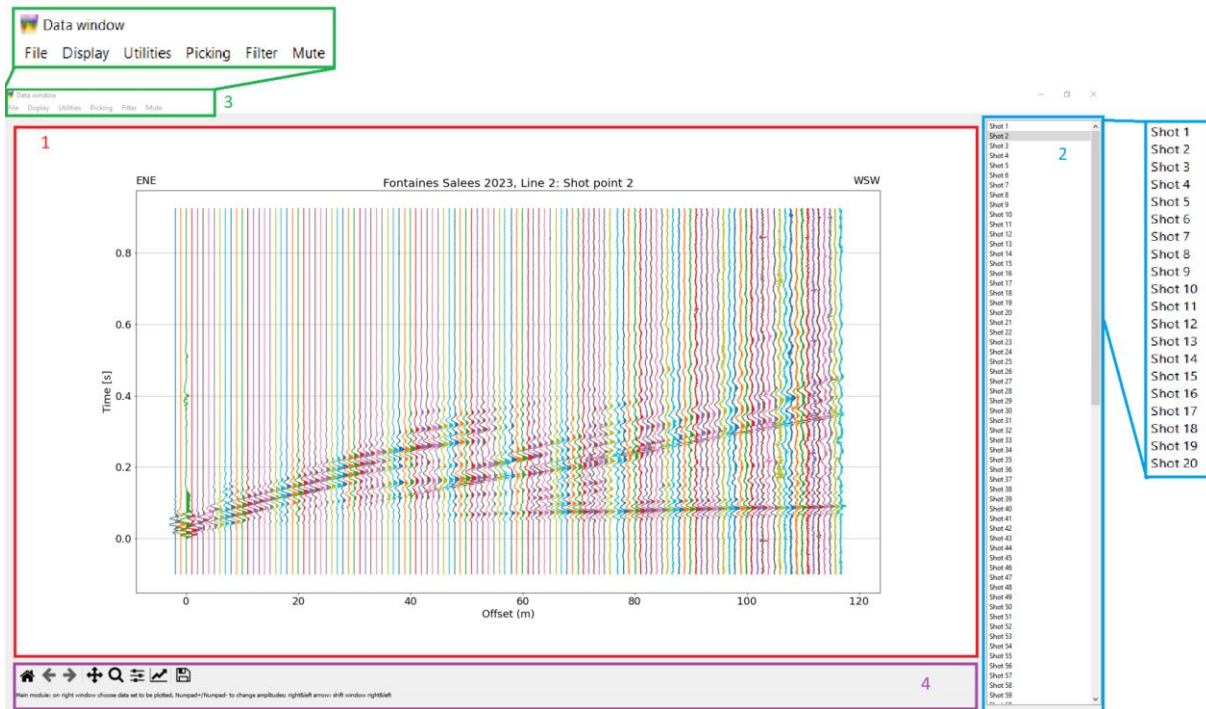


Fig. 2 : Exemple de sismogramme avec zoom sur les menus pour une meilleure lisibilité.

Exemple d'un cas réel

Nous présentons le traitement et l'inversion d'un profil de 240 m de longueur acquis avec une masse de 6,5 kg en quatre blocs de 60 géophones avec un espacement de 1 m et des tirs tous les 2 m avec un offset maximal de 120 m. Le profil a été acquis pour l'imagerie de la faille juxtaposant les sédiments du Bassin de Paris et le socle du Morvan (proche de la commune de Vézelay). Plus de 18000 temps d'arrivée ont été mesurés en trois jours (Fig. 3) et inversés pour obtenir le modèle montré en Fig. 4. Où la faille est bien visible à 70 m le long du profil.

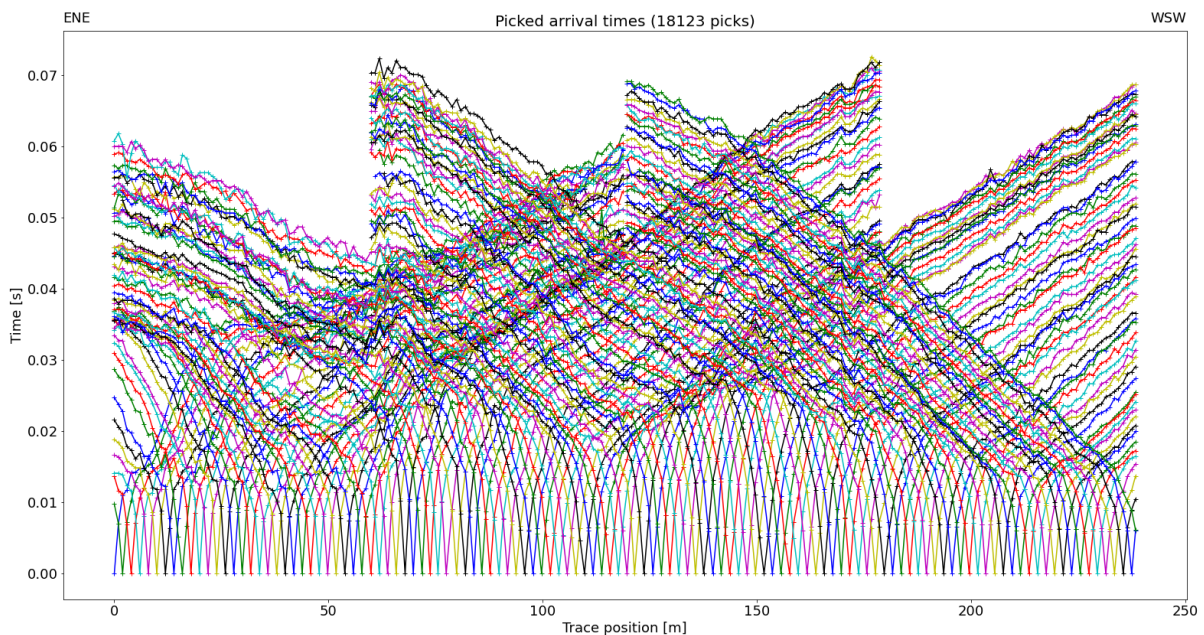


Fig. 3 : Temps d'arrivée mesurés le long du profil sismique des Fontaines Salées.

Fontaines Salees 2023, Line 2

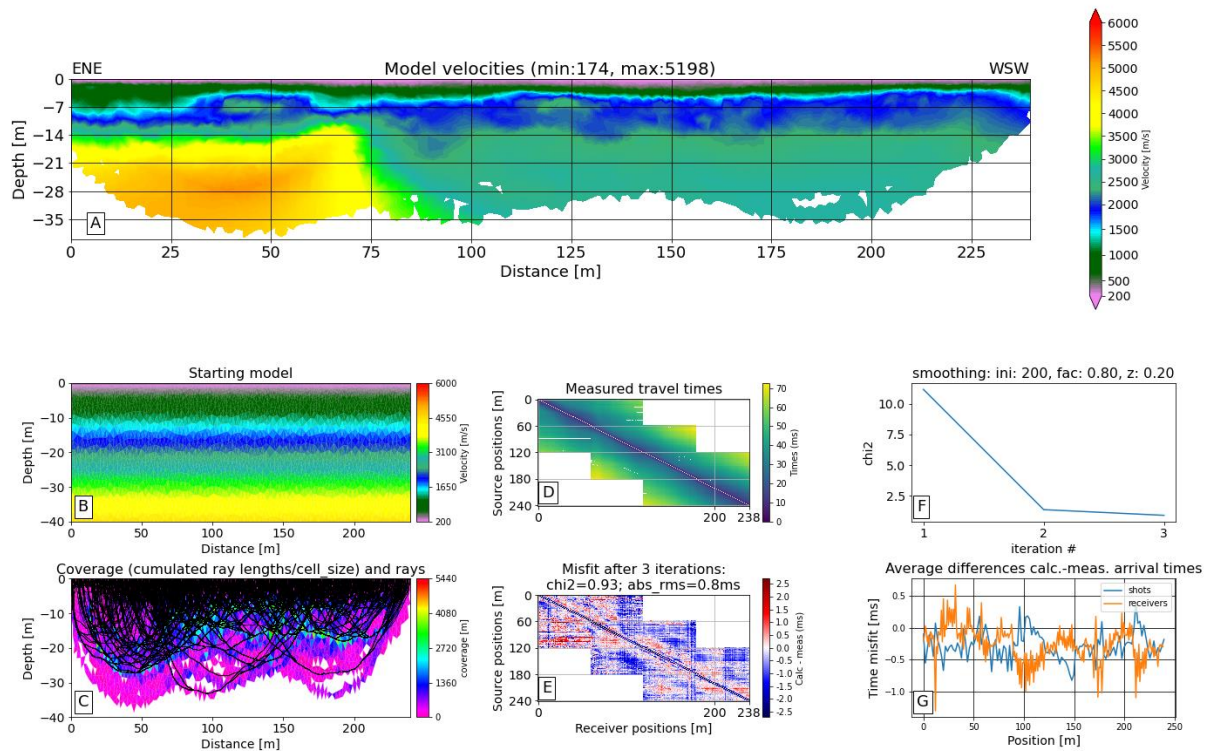


Fig. 4 : Résultat de l'inversion . A : Distribution des vitesses de ondes P. B : Modèle initial. C : Mesure de la résolution (longueur sommée des rais traversant chaque cellule) et distribution des rais du modèle final (lignes noires). D : Temps d'arrivée mesurés comme fonction des positions des récepteurs (axe X) et des sources (axe Y). E : Erreur d'ajustement entre les temps calculés et mesurés. F : Evolution de la mesure Chi2 des erreurs d'ajustement en fonction du numéro de pas d'itération. G : Erreur moyen pour tous les tirs et récepteurs en fonction de leur position, permettant de localiser d'éventuels problèmes avec l'un de ces points.

CONCLUSIONS

Le logiciel PyRefra permet d'effectuer toute la procédure de traitement de données de sismique réfraction, partant de l'affichage des sismogrammes jusqu'à l'obtention d'un modèle de la distribution des vitesses des ondes sismiques dans le sous-sol de façon simple et intuitive. Il offre différents types de filtrage et de mesures des temps d'arrivée ainsi que l'inversion tomographique des temps. Le logiciel a été testé lors de stages de terrain et en laboratoire et s'est avéré être rapidement et facilement pris en main par les étudiants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEYREUTHER, M., R. BARSCH, L. KRISCHER, T. MEGIES, Y. BEHR, AND J. WASSERMANN, 2010 – ObsPy: A Python Toolbox for Seismology. *Seismological Research Letters* 81(3), 530-533.

GUEDES, V.J.C. B., S.T.R. MACIEL AND M.P. ROCHA, 2022 – Refrapy: A Python program for seismic refraction data analysis. *Computers & Geosciences* 159, 105020. doi: 10.1016/j.cageo.2021.105020.

RUECKER, C., T. GÜNTHER AND F.M. WAGNER, 2017 – pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences* 109, 106-123. doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011

CARACTERISATION DES ANOMALIES MAGNETIQUE ET ELECTRIQUE DES FILONS DE PEGMATITE DANS LA COMMUNE DE OUESSE (CENTRE – BENIN)

YALO E. N.¹, KOUNIKA E.², TCHOKPON K. G.³, GONCALVES T.³, ZANNOU M.³

¹Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), Bénin. yalonicaise@yahoo.fr / yalonicaise@gmail.com

²Institut National de l'Eau (INE), Bénin

³Office Béninois des Recherches Géologiques et Minières (OBRGM), Bénin.

RESUME

Deux secteurs de la commune de Ouessè ont fait objet d'une prospection magnétique dans le but de vérifier l'existence d'une signature magnétique des filons de pegmatite. Les anomalies magnétiques obtenues en surface et en profondeur sont comparées aux anomalies des filons sur les sections de tomographie en résistivité électrique (ERT). Les anomalies magnétiques résiduelles des filons ont présenté des valeurs d'environ 95 et 11 nT par rapport à la régionale respectivement pour le premier et le second secteur. Les cartes de continuation vers le haut aux profondeurs des sections ERT, ont confirmé la présence des sources magnétiques de ces filons.

Mots clés : Filon de pegmatite, anomalie magnétique, section ERT.

CHARACTERIZATION OF MAGNETIC AND ELECTRICAL ANOMALIES IN PEGMATITE VEINS IN THE COMMUNE OF OUESSE (CENTRAL BENIN)

ABSTRACT

Magnetic prospecting was carried out in two areas of the Ouessè commune to verify the magnetic signature of the pegmatite veins. Magnetic anomalies obtained at surface and depth were compared with vein anomalies on electrical resistivity tomography (ERT) sections. Residual vein magnetic anomalies showed values of around 95 and 11 nT above regional for the first and second sectors respectively. Upward continuation maps at the depths of the ERT sections confirmed the presence of the magnetic sources of these veins.

Key words: Pegmatite vein, magnetic anomaly, ERT section.

INTRODUCTION

Le secteur d'Ikémon dans la commune de Ouessè appartient au domaine du socle cristallin du Bénin dont l'histoire géologique est en lien avec la formation de la chaîne panafricaine des Dahoméides (Affaton et al., 1991). Ce socle est constitué essentiellement de gneiss et migmatites à biotite et amphibole (IR BREDA, 1989) et surtout de granites auxquels sont probablement liés les filons de pegmatites. La cartographie magnétique a été choisi pour la caractérisation des filons parce que les études de (Aïfa et al., 1999) ont montré fréquemment l'existence d'une susceptibilité magnétique plus élevée au centre du filon.

MATERIEL ET METHODES

Le secteur d'Ikémon 1 se situe entre les latitudes 946050 et 646375 m et les longitudes 446500 et 446850 m. Celui d'Ikémon 2 se situe entre les latitudes 959025 et 959450 m. Les filons sont orientés E-W dans le secteur d'Ikémon1 et NW-SE dans le secteur d'Ikémon2. Le secteur d'Ikémon 1 couvre une superficie d'environ 122 000 m² et celui d'Ikémon 2 une superficie de 140 000 m² (**Figure 1**). Le levé magnétique au sol a été réalisé suivant des profils d'environ 300m et avec des pas d'échantillonnage de 10m. L'espace entre les profils successifs varie de 100 à 250m (**Figure 1**).



Figure 1 : Cartes de localisation des profils (magnétiques en noir et ERT en rouge) sur Images Google Earth des secteurs Ikémon1 et Ikémon2

L'orientation des profils est restée perpendiculaire aux filons de pegmatite. L'instrument utilisé est un magnétomètre proton champ total de type GSM-19T à effet « overhauser » de la marque GEM SYSTEM avec GPS intégré. La résolution de l'appareil est de 0.01 nT. Le filtre par « continuation vers le haut » appliqué aux données permet d'analyser de façon qualitative la distribution des sources d'anomalie magnétique à différents niveaux de profondeur. Du fait que l'intensité du champ magnétique décroît avec la distance au carré entre le point d'observation et la source magnétique, le signal des petits corps magnétiques disparaît rapidement lorsqu'on prolonge l'anomalie vers le haut, et le signal des sources profondes vont persister sur la carte. Pour ces cartes, les profondeurs de 20 et 32m ont été choisies conformément aux profondeurs respectives des sections ERT.

RESULTATS ET DISCUSSION

Cartographie magnétique des filons en surface

L'intensité du champ magnétique total à l'aplomb des filons de pegmatite recoupés par les profils atteint des valeurs supérieures à 33258 nT (couleur violette) sur le site d'Ikémon1, pour une régionale de 33163 nT. Cette différence d'intensité génère une anomalie d'environ 95nT. Sur l'ensemble de la zone d'étude, cette anomalie magnétique est orientée E-W conformément à la direction des filons, sur la latitude de 946250^E (**Figure 3**). La continuité de cette anomalie magnétique n'est pas confirmée à cause de la trop grande distance entre les deux premiers profils due à la présence d'une ferme privée comme on peut le voir sur l'image Google (**Figure1**).

L'intensité du champ magnétique total à l'aplomb du filon de pegmatite recoupé par les profils sur le secteur d'Ikémon2, présente des valeurs à 33189 nT (couleur violette), pour une régionale de 33178 nT. Cette différence d'intensité génère une très faible anomalie d'environ 11 nT. Sur l'ensemble de la zone d'étude, cette anomalie magnétique est orientée NW–SE conformément à la direction du filon. En effet, sur le terrain ce filon semble très altéré en surface où il affleure plutôt comme une zone de minéralisation.

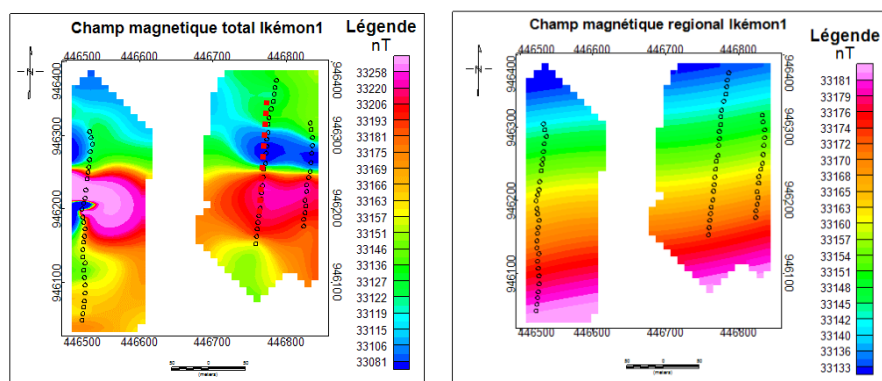


Figure 2 : Cartes du champ magnétique total et régional sur le secteur d'Ikémon1

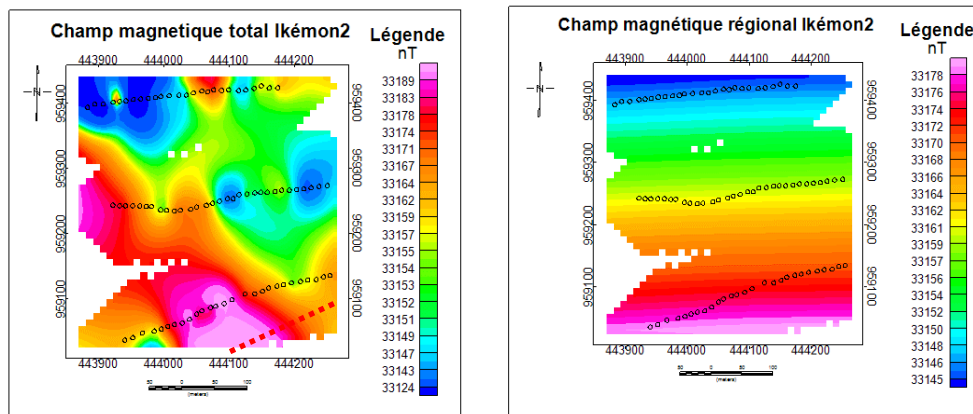


Figure 3 : Cartes du champ magnétique total et régional sur le secteur d'Ikémon2

Anomalies des filons sur les sections de résistivités électriques

La section de tomographie de résistivité est positionnée sur le profil de coordonnées (x1 = 446776 ; y1 = 946323) et (x2 = 446761 ; y2 = 946162) sur une distance de 170 m. Cette section ERT a recoupé un filon subvertical en son centre à 80m. La profondeur d'investigation est de 19,1 m et la résistivité du filon passe de 600 ohms.m en surface à 10000 ohms.m en profondeur (**Figure 4**).

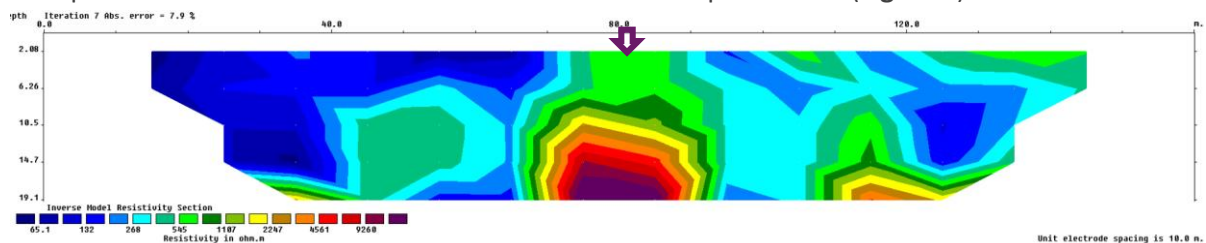


Figure 4 : Section ERT à Ikémon1

La section de tomographie de résistivité est positionnée sur le profil de coordonnées (x1 = 444124 ; y1 = 959012) et (x2 = 444429 ; y2 = 959125) sur une distance de 320 m. Cette section ERT a recoupé trois filons subverticaux à 80m, 175m et 250m. La profondeur d'investigation est de 32,2 m et la résistivité des filons passe de 700 ohms.m à une profondeur de 10m pour atteindre 10000 ohms.m à 30m de profondeur (**Figure 5**). Seul le filon à 80m a été pris en compte sur la carte magnétique.

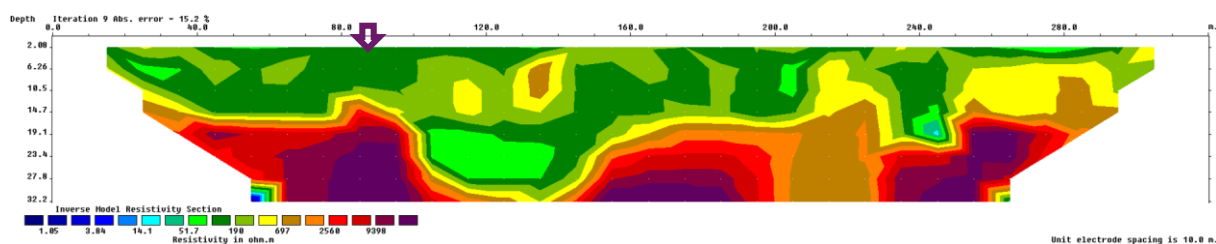


Figure 5 : Section ERT à Ikémon 2

Cartographie magnétique des filons en profondeur

Les cartes résultantes de la filtration par « continuation vers le haut » appliquée aux données du champ magnétique total ont permis d'analyser de façon qualitative la distribution des sources d'anomalie magnétique des filons à différents niveaux de profondeur. Ainsi sur le site d'Ikémon1 l'anomalie est toujours présente à la profondeur de 20m, tout comme à 19.1m sur la section ERT. Sur le site d'Ikémon2, l'anomalie est toujours présente à la profondeur de 32m, tout comme à 32.2m sur la section ERT (**Figure 6**).

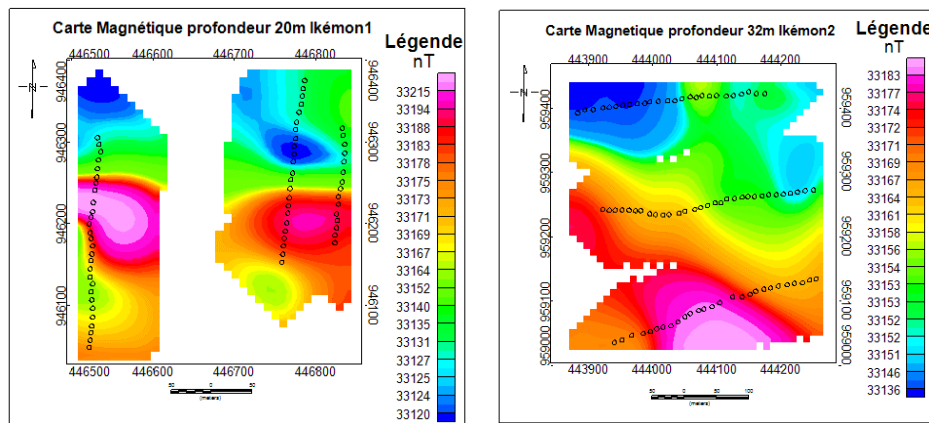


Figure 6 : Cartes magnétiques de continuation vers le haut à Ikémon 1 (20m) et Ikémon 2 (32m)

On peut remarquer une concordance des profondeurs entre les cartes magnétiques de continuation vers le haut et les sections ERT.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La cartographie magnétique des filons de pegmatite a permis d'estimer leur étendue en surface avec les cartes du champ total et leur source en profondeur avec les filtres de continuation vers le haut aux profondeurs des sections ERT. En perspectives, ce type de filtration sur des cartes de réduction à l'équateur peut être comparé aux sections ERT. L'idée derrière est de permettre aux prospecteurs des pays aux moyens limités de substituer l'ERT relativement onéreux aux cartes magnétiques de profondeur moins chronophages.

Remerciements

Remerciements pour la campagne de prospection géophysique à l'endroit de l'OBRGM.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Affaton P. L. Boudzoumou F. Tairou M. S. Kwekam M. (2012)** Pétrostructure et évolution tectono-métamorphique des nappes granulitiques du massif Kabye (Nord-Togo) Annales de l'Université Mariem NGOUABI 12-23 (4) p 1-12.
- **Aïfa T., Lefort J.P. et Guennoc P. (1999)** «Anisotropy of Magnetic Susceptibility investigations of the St Malo dyke swarm (Brittany, France): Emplacement mechanism of doleritic intrusions». Geophysical Journal International, 139, p. 573-582
- **IR Breda, (1989)** Notice explicative de la feuille Pira-Savè, 1 feuille.

Liste des auteurs

- Abbas Mohamad, 66–69
Abdou Babaye Maman Sani, 98–101
Abdou Mahaman Rabilou, 94–101, 124–127
Ackerer Philippe, 90–93, 106–109
Alassane Abdoukarim, 110–113
Alle Christian, 110–113
Amelin Julien, 86–89
Amraoui Nadia, 66–69
Anbazhagan Panjamani, 86–89
Ayari Sana, 22–25
Azaiez Hajer, 102–105
Azaroual Mohamed, 66–69
- Baltassat Jean-Michel, 66–69
Barde-Cabusson Stéphanie, 14–17
Baud Benjamin, 86–89
Baujard Clément, 30–33
Belfort Benjamin, 90–93, 106–109
Bertrand Lionel, 56–59
Berveiller Daniel, 74–77
Bitri Adnand, 18–21
Blanchy Guillaume, 146–149
Bodet Ludovic, 136–139, 142–145, 150–153
Boisson Gaboriau Joséphine, 142–145
Bonal Damien, 106–109
Bonelli Stéphane, 14–17
Bottelin Pierre, 10–13
Boucher Marie, 94–101, 110–113, 124–127
Bourgeois Bernard, 34–37
Bresciani Etienne, 70–73
Bretaudeau François, 18–21
Burgat Jules, 14–17
Burzawa Audrey, 142–145, 150–153
Buvat Solène, 70–73
- Camerlynck Christian, 86–89
Camus François, 146–149
Cardenas Julio, 142–145, 150–153
Carozza Jean-Michel, 14–17
Carrier Aurore, 10–13
Carrive Pierre, 52–55
Carrière Simon, 78–81
Carrière Simon D., 106–109
Cavalcante Fraga Luis Henrique, 40–43
Chaouch Naïm, 14–17
Clément Rémi, 146–149
Coulouma Guillaume, 102–105
- Courtin Alexandra, 74–77
Cunha Teixeira José, 142–145, 150–153
- Dangeard Marine, 142–145, 150–153
Darnet Mathieu, 34–37
Delarue Frédéric, 136–139
Delpierre Nicolas, 74–81
Deparis Jacques, 66–69, 116–119
Devevey Frédéric, 44–47
Dhemaied Amine, 142–145, 150–153
Diaby Abou Junior, 128–135
Domec Jean-Christophe, 62–65
Dubois Frederic, 34–37
Dubois Vivien, 146–149
- Elegbede Manou Bernadin, 110–113
- Fahs Marwan, 30–33
Fargier Yannick, 146–149
Favreau Guillaume, 94–101, 124–127
Flekkøy Eirik Grude, 30–33
Fonda Marie, 142–145, 150–153
Fores Benjamin, 44–47
Forquet Nicolas, 146–149
- Gabtni Hakim, 22–25, 102–105
Gaudot Ianis, 18–21
Gavazzi Bruno, 56–59
Genter Albert, 30–33
Gesret Alexandrine, 142–145
Ghorbani Ahmad, 14–17
Girard Jean-François, 90–93, 154–157
Girolami Laurence, 14–17
Goncalves Tatiana, 162–165
Goupil Margaux, 56–59
Gru Guillaume, 90–93
Guyard Hélène, 146–149
Guérin Roger, iv–vi, 78–81, 116–119, 136–139
- Hallier Amélie, 142–145
Hamdi Radhouane, 102–105
Hamrouni Mohamed, 102–105
Hamrouni Montassar, 102–105
Harrouet Titouan, 82–89
Hernandez Alain, 106–109
Hulin Guillaume, 44–47
- Imig Arnold-Fred, 146–149

- Issoufou Ousmane Boukari, 94–101, 124–127
- Jougnot Damien, 78–81, 106–109, 116–119, 136–139
- Jouniaux Laurence, 106–109
- Kamagate Bamory, 128–135
- Kaufmann Olivier, 146–149
- Kessouri Pauline, 48–51, 66–69, 116–119
- Koffi Haldan Elie Bertrand, 106–109
- Kortas Oussama, 102–105
- Kounika Elie, 162–165
- Lacanette Delphine, 26–29
- Laden Alicia, 136–139
- Lambert Rémi, 52–55, 74–77, 82–85
- Larcanché Marie, 62–65
- Legchenko Anatoly, 66–69, 94–101, 124–127
- Leroy Matéo, 18–21
- Lesparre Nolwenn, 90–93, 106–109
- Loiseau Bertille, 78–81
- Léger Emmanuel, 52–55, 74–77, 82–85, 158–161
- Marquis Guy, 106–109, 154–157
- Martin St-Paul Nicolas, 78–81
- Mary Benjamin, 78–81
- Mateo Sylvain, 26–29, 62–65
- Matthey Pierre-Daniel, 106–109
- Maugis Pascal, 82–85
- Meric Ombeline, 10–13
- Mohand-Saïd Ali, 154–157
- Morfin Alexandre, 74–77
- Måløy Knut Jørgen, 30–33
- N'tcha Tchantipé, 110–113
- Navarro Gonzalo, 70–73
- Nazoumou Yahaya, 94–101, 124–127
- Nicoleau Frédéric, 14–17
- Nouhou Chaweye Yacouba, 94–101
- Nouveau Marie, 40–43
- Ouattara Zié, 128–135
- Ouedraogo Moussa, 128–135
- Paez-Rezende Laurent, 44–47
- Pasquet Sylvain, 136–139
- Perrin Stéphane, 62–65
- Pessel Marc, 74–77, 128–135
- Quatela Valérie, 146–149
- Querea Katell, 136–139
- Raclot Damien, 102–105
- Rahamani Mohammed, 48–51
- Revil André, 14–17
- Riotte Jean, 86–89
- Riss Joëlle, 62–65
- Rivière Agnès, 82–85, 142–145
- Robain Henri, 86–89
- Ruiz Laurent, 86–89
- Ryckebusch Clémence, 48–51, 66–69
- Sailhac Pascal, 82–89
- Saintenoy Albane, 52–55
- Salmon Fabien, 26–29, 62–65
- Sanchez Gonzalez Ramon, 142–145, 150–153
- Sekhar Muddu, 86–89
- Simon François-Xavier, 120–123
- Singha Kamini, 78–81
- Sirieix Colette, 26–29, 62–65
- Sylla Ismaël, 128–135
- Tabbagh Alain, 120–123
- Tchokpon Koffi Germain, 162–165
- Thiesson Julien, 136–139
- Toussaint Renaud, 30–33
- Vallier Bérénice, 30–33
- Valois Rémi, 14–17, 70–73
- Vasconez Marco, 136–139
- Vaudelet Pierre, 14–17
- Vella Claude, 14–17
- Verdet Cécile, 26–29, 62–65
- Vincent Gaëlle, 74–77
- Vitale Quentin, 120–123
- Watlet Arnaud, 146–149
- Yalo Nicaise, 110–113, 162–165
- Zannou Manassé, 162–165
- Zeyen Hermann, 82–85, 158–161
- Zohoré Urie, 116–119