

ACTES DU 14^{ème} COLLOQUE
DE GEOPHYSIQUE DES SOLS
ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

organisé par le réseau

GEOFSCAN

4-6 juin 2025

co-organisé par



avec le soutien de



REMERCIEMENTS

Le réseau GEOFCAN tient à remercier chaleureusement :

- Avignon Université (AU), l'UMR INRAE-AU Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agrohydro systèmes (EMMAH), les Observatoires de la Zone Critique : Application et Recherche (OZCAR), l'Observatoire des Sciences de l'Univers Ecce Terra Paris Centre (OSU Ecce Terra), le Réseau Thématique Terre & Energies (RT T&E) du CNRS Mathématiques, la fédération de recherche ECCOREV, la chaire partenariale GeEAUde du laboratoire EMMAH, les départements Aqua et Agroécosystèmes de l'INRAE, qui ont financé ce colloque,
- les membres de l'administration d'Avignon Université qui ont œuvré pour la réussite du colloque,
- l'entreprise Sensors & Software from Radiodetection 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 (pages iii et iv) 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,
- les entreprises présentes au colloque pour leur participation,
- Pierre ANDRIEUX pour son témoignage sur GEOFCAN et la géophysique appliquée (pages vii à ix)
- Coline MOLLARET de l'Université de Fribourg (Suisse) pour l'atelier donné le mercredi 4 juin après-midi, sur l'inversion jointe 2D de données de premières arrivées sismiques et de résistivité électrique en utilisant pyGIMLi,
- 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

Arnaud MESGOUEZ	Avignon Université, EMMAH, Avignon
Claude DOUSSAN	INRAE, EMMAH, Avignon
Jacques DEPARIS	BRGM, Orléans
Konstantinos CHALIKAKIS	Avignon Université, EMMAH, Avignon
Marc PESSEL	Université Paris Saclay, GEOPS, Orsay
Marie BOUCHER	IRD, IGE, Grenoble
Maud SEGER	INRAE, Science du Sol, Orléans
Rémi VALOIS	Avignon Université, EMMAH, Avignon
Roger GUÉRIN	Sorbonne Université, METIS, Paris
Slimane ARHAB	Avignon Université, EMMAH, Avignon

REFERENCE EDITORIALE

Mesgouez A., Arhab S., Boucher M., Chalikakis K., Deparis J., Doussan C., Pessel M., Valois R., Guérin R., 2025. Géophysique appliquée aux formations superficielles. 14^{ème} colloque GEOFCAN, Juin 2025, à Avignon (France). <https://doi.org/10.17180/1ep4-ww45>

COMITE SCIENTIFIQUE

Albane SANTENOY	Université Paris Saclay, GEOPS, Orsay
Alexandrine GESRET	Mines ParisTech, Paris
Amine DHEMAIED	SCNF, Paris Saint Denis
Catherine TRUFFERT	IRIS Instruments, Orléans
Cécile FINCO	CEREMA, ENDSUM, Rouen
Cécile VERDET	Université de Bordeaux, I2M, Bordeaux
Cédric CHAMPOLLION	Université de Montpellier, GSM, Montpellier
Christelle EYRAUD	Aix-Marseille Université, Institut Fresnel, Marseille
Clara JODRY	Université de Strasbourg, ITES, Strasbourg
Colette SIRIEIX	Université de Bordeaux, I2M, Bordeaux
Coline MOLLARET	Université de Fribourg, Fribourg, Suisse
Cyril SCHAMPER	Sorbonne Université, METIS, Paris
Cyrille FAUCHARD	CEREMA, ENDSUM, Rouen
Damien JOUGNOT	CNRS, METIS, Paris
Dimitri SORO	Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
Donatienne LEPAROUX	Université Gustave Eiffel, GéoEND, Bouguenais
Giulia DE PASQUALE	CEAZA, La Serena, Chili
Grégory BIEVRE	Université Grenoble Alpes, ISTerre, Grenoble
Hakim GABTNI	CERTE, Tunis, Tunisie
Henri ROBAIN	IRD, iEES, Paris
Laurent GOURDOL	Université du Luxembourg, Luxembourg
Léa LEVY	CNRS, Géosciences Rennes, Rennes
Ludovic BODET	Sorbonne Université, METIS, Paris
Mahamadou KOITA	2iE, Ouagadougou, Burkina Faso
Marie NOUVEAU	Envisol, La Tour du Pin
Mathieu DARNET	BRGM, Orléans
Mathilde ADELINET	IFP School, Rueil-Malmaison
Nolwenn LEPARRE	CNRS, ITES, Strasbourg
Nicaise YALO	Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

Odile ABRAHAM	Université Gustave Eiffel, GéoEND, Bouguenais
Olivier KAUFMANN	Université de Mons, Belgique
Pascal SAILHAC	Université Paris Saclay, GEOPS, Orsay
Rémi CLEMENT	INRAE, REVERSAAL, Villeurbanne
Sarah GARRÉ	Katholieke Universiteit Leuven, Louvain, Belgique
Stéphanie GAUTIER	Université de Montpellier, GSM, Montpellier
Yannick FARGIER	Université Gustave Eiffel, Bron

AVANT-PROPOS

Le réseau GEOFCAN (approche GEOphysique 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.

Le réseau est en phase de transformation, afin : (i) de pouvoir inclure/associer facilement des membres de toute la communauté académique francophone, (ii) d'animer le monde de la géophysique appliquée/environnementale/de la proche surface/de la zone critique, (iii) d'avoir une attraction plus forte. Au cours de l'année 2025, il est prévu que le réseau GEOFCAN devienne une association. Je vous invite toutes et tous à vous inscrire à cette association, à participer à ses activités, à être forces vives.

Ce 14^{ème} colloque fait notamment suite au 1^{er} qui avait eu lieu à Bondy en 1997, et au 13^{ème} qui a eu lieu à Strasbourg en 2023. Après les succès des derniers colloques, et dans le cadre de l'activité fédératrice auprès de la communauté académique francophone, ce 14^{ème} colloque est organisé à Avignon. Le choix d'Avignon, « cité des papes », est lié à la reconnaissance de la forte activité hydro et agro-géophysique de la jeune équipe de géophysique du laboratoire EMMAH ; c'est aussi la continuité du tour de France, avant je l'espère d'un tour du monde francophone.

A une époque où l'obscurantisme et les attaques contre les droits humains sont nombreux dans le monde, il est important de se mobiliser contre les injustices et d'être solidaire. GEOFCAN peut œuvrer à sa petite échelle à cette entente entre les communautés.

Roger GUÉRIN
Coordinateur de GEOFCAN

TEMOIGNAGE

Les membres du comité d'organisation du 14^{ème} colloque GEOFCAN ont sollicité Pierre Andrieux, un des formateurs emblématiques des acteurs et des actrices de la géophysique appliquée actuelle, qui était présent à ce colloque pour qu'il apporte son témoignage et sa vision personnelle sur GEOFCAN, sur l'histoire de la géophysique appliquée en France. Voici donc ci-dessous ce témoignage.

GEOFCAN 2025 en AVIGNON. Belle réussite !

Quel bel amphithéâtre, avec plus de 100 jeunes et moins jeunes, avides de partager et de faire partager leurs connaissances et les résultats de leurs travaux. Etaient présents également trois représentants de fournisseurs d'équipements géophysiques. Sans oublier les interventions connectées, signatures de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), co-fondateur également de GEOFCAN.

J'ai choisi de participer à Strasbourg 2023 et Avignon 2025, avant de me retirer définitivement des congrès de Géophysique Appliquée, pour le plaisir de rencontrer deux fois encore, mes collègues jeunes et moins jeunes. Pour le plaisir également de vérifier que la francophonie tient bien sa place, dans l'innovation en Géophysique fondamentale et appliquée aux faibles profondeurs, en particulier. Et je n'ai pas été déçu !

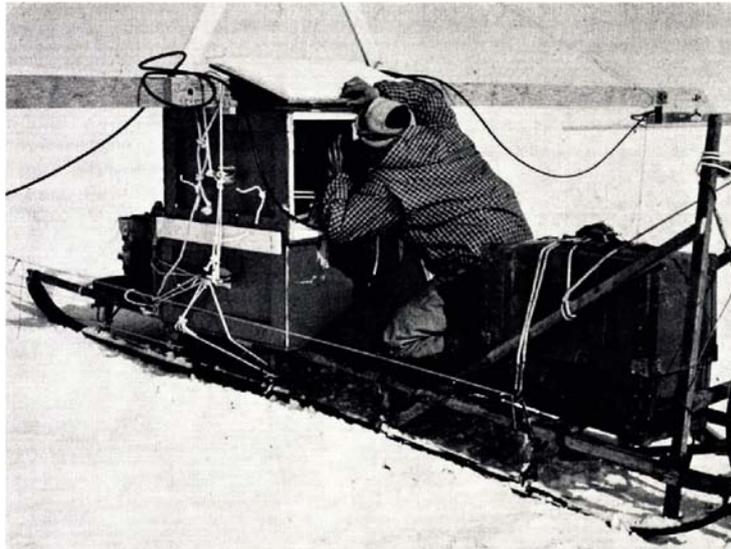
Deux scientifiques éminents et deux institutions ont joué un rôle déterminant dans le déroulement de ma carrière

Albert Bauer, Géodésien et Glaciologue français de réputation internationale (1916-2003). Il était Président d'honneur de ***Géophyse***, l'Association des Anciens Elèves de l'IPGS (Institut de Physique du Globe de Strasbourg), désormais l'EOST. En 1961, il me propose de mesurer l'épaisseur des glaciers et calottes glaciaires, à l'aide des Sondages Electriques, en Suisse d'abord à titre de formation, puis au Groenland et aux Iles de Kerguelen. Beaux terrains de jeux pour un Mémoire d'Ingénieur, puis de DEA.

Au Groenland, découverte de la naissance du Radar Géologico-géophysique. En effet, l'aviation américaine a dû subir quelques accidents mémorables, avant de comprendre que c'est la réflexion de très faible énergie à l'interface Air/Glace qui donne l'altitude de l'avion au-dessus du sol, et non la réflexion d'énergie maximale à l'interface Glace/Substratum rocheux, qui, elle, permet de connaître l'épaisseur de la calotte, qui est de l'ordre de 3 000 m !

Louis Cagniard, Professeur et Chercheur en Géophysique Fondamentale et Appliquée (1900-1971). Il a dirigé le DEA de Géophysique de la Sorbonne. Il y enseignait en particulier, la nouvelle méthode qu'il venait de créer, la Magnéto-Tellurique (MT). Il me suggère de postuler à une Bourse post-doc, proposée par le CNR canadien et l'Observatoire Fédéral, qui organisent une expédition dans l'Arctique Canadien. Glaciologie toujours. Sondages Electriques certes.

Mais aussi première mise en œuvre du Radar géophysique en 1965. Grâce à l'inventivité du responsable de l'expédition - Hans Weber - nous cartographions la base de la calotte glaciaire (Penny Icecap) avec un altimètre de l'armée canadienne installé sur un traîneau. La photo ci-jointe et sa légende en disent plus qu'un long discours. (Weber J.R., Andrieux P., 1970. Radar soundings on the Penny Ice Cap, Baffin Island. *Journal of Glaciology*, 9 (55), 49-54. <https://doi.org/10.3189/S0022143000026782>).



D'après la figure 2 de l'article Weber and Andrieux 1970 ayant pour titre « Radar sounding equipment mounted on a Nansen sledge with Pierre Andrieux observing the oscilloscope. Two boxes are mounted on top of each other; the upper houses transceiver and oscilloscope, the lower contains nickel-cadmium batteries charged by a 28 V 1 500 W generator fastened to the front of the sledge. Transmitting and receiving antennas with reflectors are connected to either end of a 6 m pole. The sledge is pulled by a motor toboggan »

Depuis cette première, la place du Radar dans l'exploration géophysique, la détection de réseaux urbains, le contrôle des ouvrages d'art et en archéologie, n'a cessé de progresser, grâce aux développements technologiques et à l'introduction des techniques de traitement issues de la Sismique Réflexion.

La Compagnie Générale de Géophysique (CGG) (1969-1985, à plein temps ; 1985-2000, à mi-temps). J'y rencontre des scientifiques éminents - Vladimir Baranov, Géza Kunetz - et des praticiens de terrain de grande expérience. Des terrains de jeux sur les cinq continents, qui me permettent des rencontres tout aussi éminentes. Complément de formation inégalable en Géophysique Appliquée.

L'Université Pierre et Marie Curie, dite Paris VI, désormais Sorbonne Université (1985-2002, à mi-temps). J'y retrouve des professeurs et des chercheurs de qualité, dont Pierre Mechler et Alain Tabbagh fondateur du réseau GEOFCAN et y rencontre des jeunes talents, prometteurs. Création du DESS de Géophysique Appliquée. Avec une belle équipe de professeurs/ingénieurs/pédagogues, nous avons la chance de former de 15 à 20 étudiants chaque année. Français et étrangers, de toute origine : géologues, géophysiciens, physiciens rarement, électroniciens quelques fois, géographe aussi... mais toujours très motivés. Superbe expérience. Complément de partage et de transmission inégalable.

Trois rencontres décisives avec la géophysique venue de l'Est

Première visite à Moscou à l'initiative de CGG, en 1972. Deux rencontres décisives :

1. Des équipes de MT qui œuvrent quotidiennement pour l'exploration des hydrocarbures, dans les régions où la sismique a des difficultés ; ce qui n'est le cas ni en Europe, ni aux Etats-Unis à cette époque. Merci Mark Berdichevsky.
2. Découverte du Sondage Electromagnétique Transitoire, qui deviendra le TDEM, en bon français. Quelques difficultés à convaincre CGG-France de l'intérêt de ce type de sondage qui pourrait compléter le Sondage Electrique classique, dans lequel CGG excelle.

Trois années à Denver au Colorado (1982-1985), pour y développer techniquement et commercialement, la MT dans les régions où la sismique a des difficultés, en particulier dans les Montagnes Rocheuses sous des nappes de chevauchement et/ou des couvertures volcaniques. Bonne collaboration avec les scientifiques américains qui introduisent la MT 2D, puis bientôt 3D et également, la notion de Référence Lointaine.

Et ô heureuse coïncidence, rencontre avec le père soviétique du TDEM et géophysicien incontournable - Alexander A Kaufman. Il est l'auteur de plus de 100 monographies, en Russe et en Anglais - publiées chez Elsevier. Il a émigré aux Etats-Unis avec sa famille, en passant par le Canada. Il enseignait alors, à l'Ecole des Mines du Colorado, à Golden. Coup de foudre et collaboration fructueuse en MT et en TDEM.

1. Introduction des corrections statiques en MT, désormais classiques et devenues dynamiques d'ailleurs en utilisant le TDEM à moyennes profondeurs pour corrections des hétérogénéités superficielles (Andrieux P., Wightman E., 1984. The so-called static corrections in magnetotellurics measurements. 54th Annual International Meeting SEG, Atlanta (Georgia, USA), Expanded Abstracts, 43-44. <https://doi.org/10.1190/1.1893968>).
2. Mise en œuvre du TDEM à grandes profondeurs, pour cartographier la base des séries volcaniques jusqu'à des profondeurs de 1000 m et plus : mise en œuvre d'un émetteur Zonge puissant, du premier récepteur analogique Geonics, d'une boucle émettrice de 250 m de côté et d'une boucle réceptrice carrée de 40 m de côté, construite à partir d'une flûte sismique de 24 canaux.

Nouvelle visite en URSS en 1990. CGG accepte de mettre à disposition des soviétiques ses équipements MT pour l'étude de L'Ecorce. Constitution d'une équipe Paris VI / CGG... souvenirs vraisemblablement inoubliables de Roger Guérin, à la fin de la mission devant les chars de Eltsine, face à la Maison Blanche à Moscou

Une belle publication (Fainberg E.B., Andrieux P., Astapenko V.N., Guérin R., Zhdanov M.S., Singer B.Sh., Ingerov A.I., Lapitsky A.I., Vasil'eva T.A., 1998. Deep electromagnetic soundings in Belarus: Europrobe crustal soundings. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 34 (6), 486-495.). Et la découverte du TEMFAST et de ses 2 créateurs - Edward Fainberg et Pavel Barsukov.

Le TEMFAST, équipement de TDEM a été développé pour détecter la présence d'eau sur Mars. La sonde soviétique n'ayant jamais été lancée, l'équipement particulièrement miniaturisé et automatisé est reconverti pour l'exploration géophysique conventionnelle à faibles et moyennes profondeurs.

Introduction du TEMFAST en Europe et de ses logiciels d'inversion 1D, 2D, puis 3D avec prise en compte des phénomènes de polarisation. C'est l'Université Paris VI, mais surtout l'IRD,

grâce à Yves Albouy, précurseur, mais surtout à Marc Descloitres, qui ont écrit les plus belles pages du TEMFAST, en France, en Afrique et en Asie.

OUI, la Géophysique, qu'elle soit fondamentale ou appliquée est une belle discipline

Explorer la Planète à toutes les échelles. Collaborer avec toutes les disciplines des Géosciences ; indispensable. Collaborer avec les physiciens, les chimistes, les biologistes, les géographes, les urbanistes, les sociologues... quelle richesse.

GEOFCAN occupe une place particulière parmi les colloques : francophonie essentiellement, relations entre universitaires, industrie et acteurs de la Société, pépinières de jeunes talents...

Conservez votre identité ; allez voir ce qui se développe chez les pétroliers, en géothermie et dans le domaine minier, afin de ne pas réinventer la roue, mais ne vous laissez pas dissoudre dans les grandes organisations françaises ou européennes.

Un REGRET ! Mais il est de taille. La disparition du sigle et de la raison sociale CGG, de la communauté nationale et bientôt internationale de la Géophysique. Société pionnière créée en 1931, à l'initiative des frères Schlumberger, à la suite des premières expérimentations en Normandie, en 1912, CGG a écrit les plus belles pages de l'exploration géophysique française jusqu'au 15 mai 2024, date de sa disparition.

Saint-Jean-de-Védas, Juin 2025

Pierre Andrieux



Photo prise lors du colloque GEOFCAN : Roger Guérin, Alain Tabbagh, Pierre Andrieux et Marc Descloitres

BILAN DU COLLOQUE

Lors de la 14^{ème} édition du colloque GEOFCAN, 39 présentations orales ont eu lieu, 18 d'entre elles ont été effectuées par des femmes (46%) et 22 par des jeunes (56%). 15 posters ont été exposés, 8 ont été présentés par des femmes (53%) et 5 par des jeunes (33%).

Ce colloque a rassemblé 112 personnes avec une proportion de 34% de femmes, avec :

- 40 personnes jeunes ou en situation précaire (étudiantes ou étudiants de Master ou en école d'ingénieur, doctorantes ou doctorants...) dont 40% de femmes,
- 72 personnes seniors (du monde académique et du monde industriel) dont 26% de femmes.

Cette édition s'est réalisée au format hybride et 8 personnes ont assisté en ligne au colloque.

Les institutions académiques françaises suivantes présentes au colloque sont : Avignon Université, BRGM, CEREMA, CNRS, Ecole des Mines d'Alès, ENTPE, IFP SCHOOL, INRAE, INRAP, IRD, Mines ParisTech, Parc naturel régional et Géoparc mondial UNESCO Normandie Maine, Sorbonne Université, Université de Bordeaux, Université de La Rochelle, Université de Montpellier, Université de Strasbourg, Université Grenoble Alpes, Université Gustave Eiffel, Université Paris-Saclay.

Les entreprises présentes sont : ASTELLOG, ENEREX, ENVISOL, Geolithe, GEOPAT, Georeva, GEOSCOPE, IRIS Instruments, MDS, Naga Geophysics, SAGE ingénierie, Sensors & Software from Radiodetection.

Enfin, la dimension internationale du colloque est reflétée par la présence parmi les personnes assistant au colloque de représentantes ou représentants venant de : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (Madagascar), Institut Technologique du Cambodge (Cambodge), Université Abdou Moumouni (Niger), Université d'Abomey-Calavi (Bénin), Université de Fribourg (Suisse), Université de Mons (Belgique), Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire).

Il y a aussi parmi les co-auteurs et co-autrices des personnes venant : Agence wallonne du Patrimoine (Belgique), Centro de Investigaciones Históricas, Antropológicas y Culturales AIP (Panama), Ecole Normale Supérieure (Madagascar), Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (Madagascar), Ghent University (Belgique), Hohai University (Chine), Norges Geologiske Undersøkelse (Norvège), Universidad Tecnológica de Panamá (Panama), Université de Liège (Belgique), Université de Lomé (Togo), Université de Milan (Italie), Université de Namur (Belgique).

Prix jeune scientifique



Gert VAN DER VELDE (responsable technico-commercial, Sensors & Software from Radiodetection), Audrey BURZAWA (Sorbonne Université), Léa LELIMOUZIN (Université de Montpellier), Nicolas BRALERET (directeur commercial France & Benelux, Sensors & Software from Radiodetection)

Le **1^{er} prix de la meilleure présentation orale** a été décerné à Audrey BURZAWA, post-doctorante à Sorbonne Université, et le **2^{ème} prix de la meilleure présentation orale** a été décerné à Léa LELIMOUZIN, doctorante à l'Université de Montpellier.

SENSORS & SOFTWARE from **RADIODETECTION**



Aimé Marcel BIKPO (Université Félix Houphouët Boigny)



Lise DURAND (Université de Montpellier) et Konstantinos CHALIKAKIS (Avignon Université)

Le **3^{ème} prix de la meilleure présentation orale** a été décerné à Aimé Marcel BIKPO, doctorant à (Côte d'Ivoire), et le **prix de la meilleure présentation poster** a été décerné à Lise DURAND, doctorante à l'Université de Montpellier.

AVIGNON
UNIVERSITÉ

Table des matières par ordre alphabétique

- Adelinet M., Rohmer F., Hubert M., Le Gouée P., Apport de la géophysique à la délimitation des zones de plantation sur un nouveau terroir viticole, exemple en Normandie. 141-144.
- Alassane Hado H., Adamou M.M., Favreau G., Lachassagne P., Apport des Sondages Electriques Verticaux (VES) dans la compréhension du processus de la remontée d'une nappe phréatique en milieu urbain sahélien : Cas de la ville de Niamey (Niger). 129-132.
- Aubron I., Gouez J.M., Perros M., Thomas M., Wacquier L., Pardo Roman I., Apport de l'imagerie géophysique sur la compréhension de la dynamique de végétation d'un pierrier de pente. 137-140.
- Bader H., Marcais J., Carluier N., Lassabatere L., Clément R., Optimisation des acquisitions TL-ERT pour OhmPi avec déclenchement basé sur des capteurs : une évaluation numérique. 41-44.
- Belloeil C., Champollion C., Girard J.F., Lesparre N., Estimation des paramètres hydrodynamiques d'un bassin versant par suivi GPR d'une infiltration d'eau. 113-116.
- Bettega C., Seive B., Caractérisation et imagerie de structures volcaniques enfouies au sein d'une carrière : une approche multi-méthode. 21-24.
- Bièvre G., Fiolleau S., Helmstetter A., Condom T., Précurseurs sismiques à des ruptures du glissement d'Harmalière, Isère. 85-88.
- Bikpo A.M., Kouamé L.N., Kouadio K.J.O., Application des techniques ERT et sismique réfraction pour la caractérisation de sites en amont des projets de construction : cas du site de Songon (Côte d'Ivoire). 125-128.
- Bitri A., Bouteille S., Truffert C., Dietz M., Jocab T., Arnaud F., Acquisition multi-méthodes pour la détection des vides dans une mine désaffectée. 201-204.
- Burzawa A., Bodet L., Cárdenas J., Cunha Teixeira J., Radic N., Hallier A., Dangeard M. Boisson-Gaboriau J., Dhemaied A., Vers une boîte à outils opérationnelle pour la caractérisation mécanique par ondes de surface de la plateforme ferroviaire et du sol support. 45-48.
- Cadet H., Fabre L., Bisiaux T., Carrier A., Cartographie du permafrost via le clustering des données de polarisation provoquée. 65-68.
- Campeol Q., Miquelis F., Hanot F., Dupont N., Kaufmann O., Intégration de la géologie de subsurface du bassin de Mons (Belgique) dans le traitement des acquisitions en sismique réflexion. 49-52.
- Clinquart V., Rivière A., Radic N., Gautier M., Bodet L. Gesret A., Flipo N., Pasquet S., Martin R., Renard D., Nespoulet R., Baudin A., Traceur thermique pour la modélisation de l'interface nappe rivière. 145-148.
- Didier Q., Arhab S., Bodet L., Ginoux C., Lefeuvre-Mesgouez G., Mesgouez A., Caractérisation d'une source sismique verticale à partir de mesures géophysiques expérimentales. 53-56.
- Doussan C., Beudez N., Ardouin J., Arhab S., Valois R., Buis S., Caractérisation des propriétés hydrauliques du sol par inversion jointe électrique-hydrrique. 117-120.
- Durand L., Champollion C., Aubineau J., Ballas G., Bayer R., Camerlynck C., Cazes G., Le Ber E., Pasquet S., Vernant P., Charlier J.B., Etude multi-méthodes de la géométrie des roches altérées : données de terrain vs données synthétiques. 121-124.
- Esparel A., Seive B., Auscultation au radar géologique d'une galerie d'amené d'eau. 89-92
- Garcia De Cezar M., Guérin R., Tomas S., Liron F., Aprin L., Cheviron B., Analyse de la dynamique du bulbe hydrique par suivi de la teneur en eau du sol et tomographie de résistivité électrique. 69-72.
- Gautier M., Gautier S., Cattin R., Imagerie de proche surface d'une faille active - Exemple d'inversion stochastique conjointe de données électriques, sismiques, gravimétriques et topographiques. 57-60.

- Ghorbani A., Revil A., Zhao X., Mouyeaux A., Barrère L., Richard J., Peyras L., Vaudelet P., Chemins d'écoulement d'eaux souterraines à l'aide de signaux combinés de potentiel spontané, de résistivité électrique et de polarisation provoquée. 61-64.
- Gru G., Girard J.F., Ackerer P., Lesparre N., Analyse de sensibilité globale d'un modèle hydrogéophysique couplé : écoulement 1D et résonance magnétique protonique. 165-168.
- Guillemet F., Clément R., Lassabatère L., Développement d'un générateur de champs hétérogènes de résistivité électrique aléatoire en vue de l'entraînement d'un modèle de machine learning. 169-172.
- Hamelin L., Thuillier S., Finco C., Robion P., Fauchard C., Caractérisation par mesures géophysiques de décharges enfouies sur le littoral normand. 133-136.
- Harrouet T., Sailhac P., Léger E., Mise en œuvre et traitement temps-fréquence de mesures audio-magneto-telluriques utilisant deux dipôles magnétiques pour sources. 173-176.
- Hulin G., Besnier C., Chaoui-Derieux D., Flageul S., Norgeot C., Schamper C., Simon F.X., Tabbagh A., Etude géophysique de Notre-Dame de Paris : Révéler le passé enfoui après l'incendie. 1-4.
- Jodry C., Camerlynck C., Seoane L., Gabalda G., Bano M., Imagerie de la structure interne des volcans de boue. Exemple du volcan de boue Saribogha, Azerbaïdjan. 93-96.
- Junique L., Finco C., Guilbert V., Ledun C., Fan B., Antoine R., Beaucamp B., Therain P.F., Fauchard C., Prospection géophysique de subsurface du Parc animalier et botanique de Clères. 5-8.
- Laden A., Thiesson J., Pasquet S., Guérin R., Bodet L., Jougnot D., Peronne L., Aubry E., Quenea K., Duquenoy G., Delarue F., Impact des biochars sur les fonctions du sol : approche géophysique. 25-28.
- Lázaro Roche I., Boyer G., Decitre J.B., Gout S., Pinon C., Micolau G., Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) : une infrastructure de recherche unique au service de la géophysique. 177-180.
- Lelimouzin L., Champollion C., Roubinet D., Inversion transdimensionnelle de résistivités électriques appliquée aux milieux fracturés. 181-184.
- Lévy L., Longuevergne L., Nicollin F., Naussans L., Fiandaca G., Galli S., Compostella C., Camerlynck C., Florsch N., Robain H., Comprendre les transferts souterrains de lixiviat depuis les anciennes décharges. 205-208.
- Lharti H., Sirieix C., Salmon F., Riss J., Marache A., Verdet C., Lacanette D., Couplage thermo-géophysique pour la modélisation 3D du massif rocheux de la grotte de Lascaux. 189-192.
- Liu Y., Lévêque F., Inversion probabiliste et modélisation à partir de données géomagnétiques en 3D. 185-188.
- Loiseau B., Carrière S.D., Martine-STPaul N.K., Clément R., Champollion C., Mercier V., Thiesson J., Pasquet S., Doussan C., Hermans T., Jougnot D., Développement d'une approche ensembliste pour convertir les données de tomographie de résistivité électrique en teneur en eau. 29-32.
- Lun S., Massuel S., Descloitres M., Boucher M., Van Hanja J., Balzan M., Cartographie du substratum de l'aquifère du haut delta du Mékong par méthode TDEM. 149-152.
- Melka J., Arhab S., Lefeuvre-Mesgouez G., Abbas C., Mesgouez A., Modélisation d'une onde électromagnétique dans la gamme de fréquence géo-radar à l'interface air-sol. 73-76.
- Mollaret C., Mathys T., Wee J., Hilbich C., Hauck C., Inversion pétrophysique conjointe pour la quantification de la teneur en glace dans les glaciers rocheux. 193-196.
- Mondon L., Chaffaut Q., Jougnot D., Pessel M., Loiseau B., Kempf J., Delpierre N., Joetzjer E., Courtois P., Naiken A., Cuntz M., Berveiller D., Morfin A., Girardin C., Grasset M., Carrière S.D., Etude de la disponibilité en eau d'une chênaie - hêtraie par prospection ERT et EMI dans la forêt de Hesse (Moselle, France). 153-156.
- N'Tcha T., Elegbede Manou B., Lawson M.F., Yalo N., Guidah Chabi B., Boukari M., Kotchoni V., Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) pour l'identification du mur d'un aquifère côtier en vue d'une modélisation hydrogéologique. 161-164.

- Nouveau M., Gavazzi B., Joly J., Thabeau A., Bertrand L., Galluser F., Détection d'une ancienne décharge en milieu difficile d'accès par approche conjointe de profils ERT et d'aéromagnétisme en drone. 209-212.
- Pellorce L., Mesgouez A., Valois R., Doussan C., Bodet L., Guérin R., Ginoux C., Prospection sismique haute résolution pour la caractérisation géophysique d'un sous-sol agricole : Estimation des vitesses des ondes P et S. 33-36.
- Provenzano G., Bièvre G., Brossier R., Garambois S., Métivier L., Interférométrie de bruit de fond sismique et tomographie d'équation d'ondes : imagerie tridimensionnelle du glissement d'Harmalière, France. 197-200.
- Radic N., Rivière A., Gresret A., Bodet L., Pasquet S., Gautier M., Modélisation de l'influence de la zone vadose dans l'étude de mesure hydrogéophysique. 77-80.
- Rakotomandrindra P.F.M., Ramanitra N.A., Mandimbiharison A.J., Etude de l'évolution des contaminants d'hydrocarbures par méthode de résistivité dans une grande villa à Madagascar. 37-40.
- Richard J., Duvillard P.A., Lena E., Ghorbani A., Mougin P., Vaudelet P., Revil A., Imagerie géophysique des circulations d'eau par tomographie électrique et polarisation provoquée dans le théâtre antique de Mandeure (France). 97-100.
- Saintenoy A., Zeyen H., Lambert R., Gelin M., Exploration du site archéologique de Zol-i Zard (Tadjikistan) par géomagnétisme, induction électro-magnétique et photogrammétrie. 9-12.
- Schamper C., Dabas M., Flageul S., Bolle C., Hoffsummer P., Piavaux M., Tabbagh A., Prospection combinée électrostatique et géoradar d'un monument historique : cathédrale Saint-Paul (Liège, Belgique). 101-104.
- Sevenet T., Herrati S., Diagnostic géologique et structurel du Château de Lys-St-Georges. 13-16.
- Simon F.X., Spitalier B., Fores B., Hulin G., Premiers résultats d'une acquisition double système FD-EMI basée sur l'emploi d'un appareil multi-fréquentiel : cas d'étude sur le site de Bibracte. 17-20.
- Tempère A., Mathé V., Lévêque F., Impact de la conductivité du milieu sur les mesures électromagnétiques. 105-108.
- Thuillier S., Rejiba F., Finco C., Mojica A., Mendizabal T., Imagerie radar pour la caractérisation de vestiges archéologiques en milieu urbain à Casco Antiguo, Panama. 109-112.
- Van Hanja J., Chork V., Descloitres M., Massuel S., Doung R., Baudron P., Lun S., Sok K., Eang K.E., Chhuon K., Uk S., Intrusion saline dans un aquifère côtier en contexte d'urbanisation rapide et données rares : le cas de Sihanoukville étudié par TDEM (Cambodge). 157-160.
- Yalo E.N., Pekeyi G.M., Kounika E., Razack A., Zannou B., Suivi de la percolation du lixiviat dans l'ancienne décharge d'Agoe-Nyive au Sud Togo. 213-216.
- Zeyen H., Pymagra - Traitement et inversion de données magnétiques et gravimétriques. 81-84.

Programme de GEOFCAN 2025

Mercredi 4 Juin 2025

(salle 2E07, 2^{ème} étage, aile Est, salle 07, campus Hannah Arendt, 74 rue Louis Pasteur, Avignon)



14h-18h : Atelier sur « l'inversion jointe 2D de données de premières arrivées sismiques et de résistivité électrique en utilisant pyGIMLi », animé par Coline MOLLARET (Université de Fribourg)



Jeudi 5 Juin 2025

(amphi AT06, campus Hannah Arendt, 74 rue Louis Pasteur, Avignon)



9h-9h30 : Discours d'accueil

Gaëlle LEFEUVE-MESGOUEZ, Vice-Présidente Recherche d'Avignon Université
Roger GUÉRIN, Coordinateur du Réseau GEOFCAN, et Rémi CLEMENT, Organisateur de la réflexion sur la transformation du réseau
Arnaud MESGOUEZ, Co-organisateur du colloque

9h30-10h30 : Session n°1 (animée par Alain TABBAGH et Slimane ARHAB)

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

9h30 : Guillaume HULIN (INRAP) « Etude géophysique de Notre-Dame de Paris : Révéler le passé enfoui après l'incendie »	1
9h45 : Lucas JUNIQUE (Cerema) « Prospection géophysique de subsurface du Parc animalier et botanique de Clères »	5
10h : Albane SAINTENOY (Université Paris-Saclay) « Exploration du site archéologique de Zol-i Zard (Tadjikistan) par géomagnétisme, induction électro-magnétique et photogrammétrie »	9
10h15 : Thibault SEVENET (Geopat) « Diagnostic géologique et structurel du Château de Lys-St-Georges »	13

10h30-11h : Pause café à proximité des posters et des stands industriels

11h-12h30 : Session n°2 (animée par Rémi VALOIS et Simon CARRIERE)

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

11h : François-Xavier SIMON (INRAP) « Premiers résultats d'une acquisition double système FD-EMI basée sur l'emploi d'un appareil multi-fréquentiel : cas d'étude sur le site de Bibracte »	17
---	----

Thématique : Relier les propriétés géophysiques aux paramètres physico-chimiques

11h15 : Chloé BETTEGA (GÉOLITHE) « Caractérisation et imagerie de structures volcaniques enfouies au sein d'une carrière : une approche multi-méthode »	21
11h30 : Alicia LADEN (Sorbonne Université) « Impact des biochars sur les fonctions du sol : approche géophysique »	25
11h45 : Bertille LOISEAU (IRD) « Développement d'une approche ensembliste pour convertir les données de tomographie de résistivité électrique en teneur en eau »	29
12h : Léna PELLORCE (Avignon Université) « Prospection sismique haute résolution pour la caractérisation géophysique d'un sous-sol agricole : Estimation des vitesses des ondes P et S »	33
12h15 : Pascale RAKOTOMANDRINDRA (Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo) « Etude de l'évolution des contaminants d'hydrocarbures par méthode de résistivité dans une grande villa à Madagascar »	37

12h30-14h : Déjeuner

14h-15h30 : Session n°3 (animée par Albane SAINTENOY et Arnaud MESGOUEZ)

Thématique : Développer les outils de mesure et d'analyse des données géophysiques (dispositifs de mesure, modélisations directes, méthodes inverses)

14h : Hanifa BADER (INRAE) « Optimisation des acquisitions TL-ERT pour OhmPi avec déclenchement basé sur des capteurs : une évaluation numérique »	41
--	----

14h15 : Audrey BURZAWA (Sorbonne Université) « Vers une boîte à outils opérationnelle pour la caractérisation mécanique par ondes de surface de la plateforme ferroviaire et du sol support »	45
14h30 : Quentin CAMPEOL (Université de Mons) « Intégration de la géologie de subsurface du bassin de Mons (Belgique) dans le traitement des acquisitions en sismique réflexion »	49
14h45 : Quentin DIDIER (Avignon Université) « Caractérisation d'une source sismique verticale à partir de mesures géophysiques expérimentales »	53
15h : Maxime GAUTIER (Mines Paris) « Imagerie de proche surface d'une faille active - Exemple d'inversion stochastique conjointe de données électriques, sismiques, gravimétriques et topographiques »	57
15h15 : Ahmad GHORBANI (Naga Geophysics) « Chemins d'écoulement d'eaux souterraines à l'aide de signaux combinés de potentiel spontané, de résistivité électrique et de polarisation provoquée »	61

15h30-17h : Session (animée par Ignacio LÁZARO ROCHE) Poster, Présentation des stands industriels (ASTELLOG - Georeva - IRIS Instruments - MDS - Radiodetection) et Pause café

Thématique : Développer les outils de mesure et d'analyse des données géophysiques (dispositifs de mesure, modélisations directes, méthodes inverses)

Héloïse CADET (SAGE Ingénierie) « Cartographie du permafrost via le clustering des données de polarisation provoquée »	65
Martina GARCIA DE CEZAR (INRAE) « Analyse de la dynamique du bulbe hydrique par suivi de la teneur en eau du sol et tomographie de résistivité électrique »	69
Joseph MELKA (Avignon Université) « Modélisation d'une onde électromagnétique dans la gamme de fréquence géo-radar à l'interface air-sol »	73
Nicolas RADIC (Mines Paris) « Modélisation de l'influence de la zone vadose dans l'étude de mesure hydrogéophysique »	77
Hermann ZEYEN (Université Paris-Saclay) « Pymagra - Traitement et inversion de données magnétiques et gravimétriques »	81

Thématique : Évaluer les risques naturels et anthropiques

Grégory BIEVRE (Université Grenoble Alpes) « Précurseurs sismiques à des ruptures du glissement d'Harmalière, Isère »	85
Aline ESPAREL (GÉOLITHE) « Auscultation au radar géologique d'une galerie d'aménagé d'eau »	89
Clara JODRY (Université de Strasbourg) « Imagerie de la structure interne des volcans de boue. Exemple du volcan de boue Saribogha, Azerbaïdjan »	93

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

Jessy RICHARD (Naga Geophysics) « Imagerie géophysique des circulations d'eau par tomographie électrique et polarisation provoquée dans le théâtre antique de Mandeure (France) »	97
Cyril SCHAMPER (Sorbonne Université) « Prospection combinée électrostatique et géoradar d'un monument historique : cathédrale Saint-Paul (Liège, Belgique) »	101
Audrey TEMPÈRE (Université de La Rochelle) « Impact de la conductivité du milieu sur les mesures électromagnétiques »	105
Sarah THUILLIER (Sorbonne Université) « Imagerie radar pour la caractérisation de vestiges archéologiques en milieu urbain à Casco Antiguo, Panama »	109

Thématique : Propriétés des milieux et processus pédologiques, hydrogéologiques et agronomiques

Camille BELLOEIL (Université de Strasbourg) « Estimation des paramètres hydrodynamiques d'un bassin versant par suivi GPR d'une infiltration d'eau »	113
Claude DOUSSAN (INRAE) « Caractérisation des propriétés hydrauliques du sol par inversion jointe électrique-hydrique »	117
Lise DURAND (Université de Montpellier) « Etude multi-méthodes de la géométrie des roches altérées : données de terrain vs données synthétiques »	121

17h-18h : Session n°4 (animée par Claude DOUSSAN et Ludovic BODET)

Thématique : Évaluer les risques naturels et anthropiques

17h : Aimé Marcel BIKPO (Université Félix Houphouët Boigny) « Application des techniques ERT et sismique réfraction pour la caractérisation de sites en amont des projets de construction : cas du site de Songon (Côte d'Ivoire) »	125
17h15 : Halidou ALASSANE HADO (Université Abdou Moumouni) « Apport des Sondages Electriques Verticaux (VES) dans la compréhension du processus de la remontée d'une nappe phréatique en milieu urbain sahélien : Cas de la ville de Niamey (Niger) »	129
17h30 : Ludivine HAMELIN (Cerema) « Caractérisation par mesures géophysiques de décharges enfouies sur le littoral normand »	133

Thématique : Propriétés des milieux et processus pédologiques, hydrogéologiques et agronomiques

17h45 : Isabelle AUBRON (Parc naturel régional et Géoparc mondial UNESCO Normandie-Maine) « Apport de l'imagerie géophysique sur la compréhension de la dynamique de végétation d'un pierrier de pente »	137
--	-----

Soirée de gala : apéritif à 19h30, dîner à 20h au Cloître Saint Louis, 20 rue du Portail Boquier, 84000 Avignon



Vendredi 6 Juin 2025

(amphi AT06, campus Hannah Arendt, 74 rue Louis Pasteur, Avignon)



8h30-10h : Session n°5 (animée par Cédric CHAMPOLLION et Roger GUÉRIN)

Thématique : Propriétés des milieux et processus pédologiques, hydrogéologiques et agronomiques

8h30 : Mathilde ADELINET (IFPEN) « Apport de la géophysique à la délimitation des zones de plantation sur un nouveau terroir viticole, exemple en Normandie »	141
8h45 : Vita CLINQUART (Mines Paris) « Traceur thermique pour la modélisation de l'interface nappe rivière »	145
9h : Sambo LUN (IRD) « Cartographie du substratum de l'aquifère du haut delta du Mékong par méthode TDEM »	149
9h15 : Lucas MONDON (Sorbonne Université) « Etude de la disponibilité en eau d'une chênaie - hêtraie par prospection ERT et EMI dans la forêt de Hesse (Moselle, France) »	153
9h30 : Jonathan VAN HANJA (IRD) « Intrusion saline dans un aquifère côtier en contexte d'urbanisation rapide et données rares : le cas de Sihanoukville étudié par TDEM (Cambodge) »	157
9h45 : Tchantipé N'TCHA (Université d'Abomey-Calavi) « Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) pour l'identification du mur d'un aquifère côtier en vue d'une modélisation hydrogéologique »	161

10h-10h30 : Pause café à proximité des posters et des stands industriels

10h30-12h : Session n°6 (animée par Konstantinos CHALIKAKIS et Mathilde ADELINET)

Thématique : Développer les outils de mesure et d'analyse des données géophysiques (dispositifs de mesure, modélisations directes, méthodes inverses)

10h30 : Guillaume GRU (Université de Strasbourg) « Analyse de sensibilité globale d'un modèle hydrogéophysique couplé : écoulement 1D et résonance magnétique protonique »	165
10h45 : Florent GUILLEMET (ENTPE) « Développement d'un générateur de champs hétérogènes de résistivité électrique aléatoire en vue de l'entraînement d'un modèle de machine learning »	169
11h : Titouan HARROUET (Université Paris-Saclay) « Mise en oeuvre et traitement temps-fréquence de mesures audio-magneto-telluriques utilisant deux dipôles magnétiques pour sources »	173

11h15 : Ignacio LÁZARO ROCHE (Laboratoire Souterrain à Bas Bruit) « Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) : une infrastructure de recherche unique au service de la géophysique »	177
11h30 : Léa LELIMOUZIN (Université de Montpellier) « Inversion transdimensionnelle de résistivités électriques appliquée aux milieux fracturés »	181
11h45 : Yu LIU (Université de La Rochelle) « Inversion probabiliste et modélisation à partir de données géomagnétiques en 3D »	185

12h-13h30 : Déjeuner

13h30-14h : Prix jeunes : prix de la meilleure, seconde et troisième présentation orale, prix du meilleur poster

14h-15h : Session n°7 (animée par Léa LEVY et Nicaise YALO)

Thématique : Développer les outils de mesure et d'analyse des données géophysiques (dispositifs de mesure, modélisations directes, méthodes inverses)

14h : Habiba LHARTI (Mines Alès) « Couplage thermo-géophysique pour la modélisation 3D du massif rocheux de la grotte de Lascaux »	189
14h15 : Coline MOLLARET (Université de Fribourg) « Inversion pétrophysique conjointe pour la quantification de la teneur en glace dans les glaciers rocheux »	193

Thématique : Évaluer les risques naturels et anthropiques

14h30 : Grégory BIEVRE (Université Grenoble Alpes) « Interférométrie de bruit de fond sismique et tomographie d'équation d'ondes : imagerie tridimensionnelle du glissement d'Harmalière, France »	197
14h45 : Adnand BITRI (BRGM) « Acquisition multi-méthodes pour la détection des vides dans une mine désaffectée »	201

15h-15h30 : Pause café à proximité des posters et des stands industriels

15h30-16h15 : Session n°8 (animée par Clara JODRY et Marc DESCLOITRES)

Thématique : Évaluer les risques naturels et anthropiques

15h30 : Léa LÉVY (CNRS) « Comprendre les transferts souterrains de lixiviat depuis les anciennes décharges »	205
15h45 : Marie NOUVEAU (ENVISOL) « Détection d'une ancienne décharge en milieu difficile d'accès par approche conjointe de profils ERT et d'aéromagnétisme en drone »	209
16h : Nicaise YALO (Université d'Abomey-Calavi) « Suivi de la percolation du lixiviat dans l'ancienne décharge d'Agoe-Nyive au Sud Togo »	213

ETUDE GEOPHYSIQUE DE NOTRE-DAME DE PARIS : REVELER LE PASSE ENFOUI APRES L'INCENDIE

HULIN G.^{1,2}, BESNIER C.¹, CHAOUI-DERIEUX D.³, FLAGEUL S.², NORGEOT C.⁴, SCHAMPER C.², SIMON F.-X.^{1,2}, TABBAGH A.²

¹ Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, Paris, France, guillaume.hulin@inrap.fr

² UMR 7619 METIS, Paris, France

³ Service régional de l'archéologie d'Île-de-France, Paris, France

⁴ MDS, Courbevoie, France

RESUME

Une prospection géophysique a été réalisée dans la cathédrale Notre-Dame de Paris à l'automne 2020 suite à l'incendie de l'édifice. Cette étude, réalisée dans un contexte particulier, avait pour objectif d'apporter des éléments de connaissance sur le potentiel archéologique enfoui sous la cathédrale. Un protocole particulier associant méthode géoradar et méthode électrostatique a été mis en œuvre et a permis d'obtenir des éléments utiles pour la connaissance du site et aider le suivi archéologique lié aux travaux de réfection de l'édifice.

Mots clés : *prospection archéologique, Notre-Dame de Paris, géoradar multi-antennes, prospection électrostatique*

ABSTRACT

A geophysical survey was carried out in Notre-Dame de Paris cathedral in the autumn of 2020 following the fire in the building. The aim of this study, performed in a special context, was to provide information about the archaeological potential buried beneath the cathedral. A specific protocol combining the georadar method and the electrostatic method was used to obtain useful information about the site and to help with the archaeological monitoring of the restoration work on the building.

Key words: *archaeological prospection, Notre-Dame de Paris, multi-channel GPR, electrostatic survey*

INTRODUCTION

Le 15 avril 2019, la cathédrale Notre-Dame de Paris a été la proie des flammes. À l'émotion de cet événement a dû rapidement succéder une réflexion globale et des actions pour sauver et restaurer ce chef-d'œuvre de l'architecture gothique. L'implication des scientifiques a été une nécessité pour comprendre le monument et le restaurer en respectant les techniques médiévales. Les analyses de l'origine des matériaux de construction, la datation dendrochronologique de la charpente, l'étude des peintures, des vitraux, des objets métalliques, le relevé 3D de l'édifice... ont été des étapes essentielles dans le processus de compréhension et de restauration de Notre-Dame de Paris.

Très tôt, les équipes de l'Inrap ont été sollicitées pour intervenir sur ce chantier hors norme, avec notamment le déblaiement et l'inventaire des poutres et pierres calcinées dans la nef et la croisée du transept. Plusieurs diagnostics et fouilles archéologiques dans et autour de la cathédrale ont également été réalisés en préalable aux travaux de réfection. En juillet 2019, dans cette même optique de sauvegarde et de compréhension du patrimoine, le ministère de la Culture a sollicité la cellule

géophysique de l'Inrap pour réaliser une étude de l'ensemble du sous-sol de la cathédrale. L'objectif de cette étude était double. Il s'agissait d'une part de profiter d'une cathédrale vide de son mobilier pour enrichir les connaissances sur ce monument et, d'autre part, d'anticiper d'éventuels travaux de restauration pouvant affecter le proche sous-sol et les vestiges archéologiques encore en place.

UNE METHODOLOGIE DEDIEE

D'un point de vue géophysique et, dans ce type de contexte complexe, trois méthodologies d'intervention complémentaires ont été mises en œuvre :

- une étude géoradar à très haute résolution avec un système multi-antennes à saut de fréquence 3D-Radar (antenne DXG1812 / 200 – 3000 MHz; Fig. 1). Cette étude a porté sur l'ensemble de la zone afin d'obtenir une carte très détaillée de la proche surface (avec une profondeur d'investigation comprise entre 70 cm et 1 m).

- une étude géoradar avec une antenne GSSI 350 MHz HyperStacking pour étudier les structures plus profondes et atteindre jusqu'à 2,5 mètres dans les bas-côtés notamment.

- une étude électrostatique afin d'évaluer les variations de résistivité électrique et de permittivité diélectrique du sol. Un prototype MP3 (Fig. 2 ; Flageul et al. 2013) développé par l'UMR METIS (Sorbonne Université, Paris) a été utilisé avec une géométrie en V et trois espacements différents entre pôles d'injection et de mesure (0,70 / 1,14 / 2 m). Cette technique apporte notamment des informations sur la teneur en argile du sol et constitue un complément indispensable au géoradar.

L'ensemble des données géophysiques a été localisé en temps réel par une station totale robotisée afin d'assurer une précision centimétrique de positionnement.

UN CONTEXTE PARTICULIER

Cette étude géophysique a été réalisée dans un contexte très particulier nécessitant des règles de sécurité adaptées. Tout d'abord, au moment de l'intervention, une grande partie de la cathédrale (la nef et la croisée du transept) était encore susceptible de s'effondrer et, de fait, leur accès était totalement interdit pour le personnel. Ces conditions particulières d'intervention ont nécessité la traction des appareils géophysiques par un engin télécommandé pour effectuer le relevé à distance (Fig.1). À cela s'est rajouté un niveau de pollution au plomb très élevé provenant des centaines de tonnes de plomb du toit et de la flèche lors de l'incendie. Des mesures de protection, aussi bien du personnel que du matériel, ont ainsi été mises en place pour la réalisation des relevés géophysiques.

Cette étude, complexe à mettre en œuvre, avec un calendrier extrêmement serré et de multiples mesures de sécurité, a pu être engagée à l'automne 2020, en pleine crise sanitaire, en collaboration avec MDS et l'UMR METIS. Au total, neuf jours à l'intérieur de la cathédrale ont permis de sonder toutes les zones accessibles au moment de l'étude.



Fig. 1 – Système géoradar (3D-Radar - DXG1812) tracté avec un engin téléguidé dans la nef (G. Hulin, Inrap)

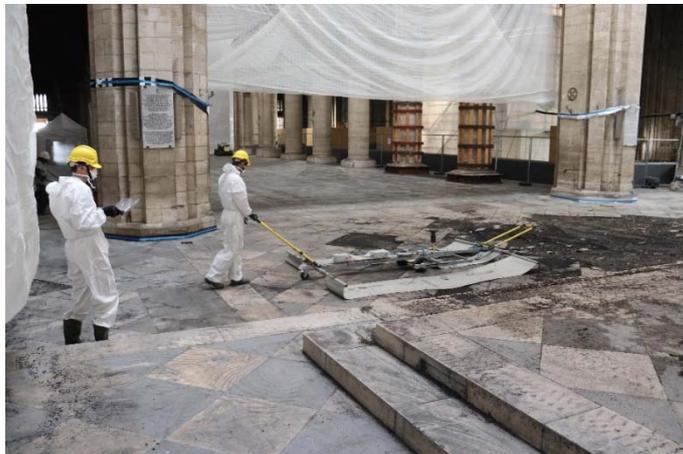


Fig. 2 – Prospection électrostatique (MP3) dans la croisée du transept (G. Hulin, Inrap)

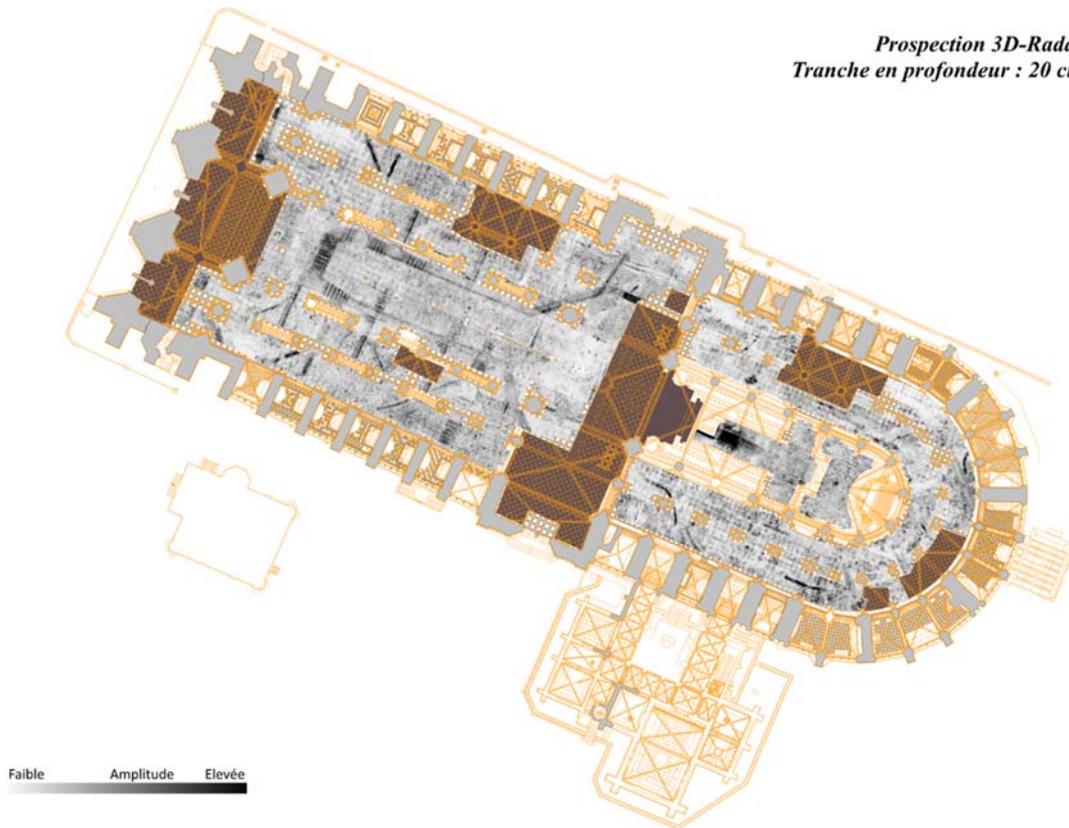
CONCLUSIONS

Les différentes techniques mises en œuvre dans cet environnement complexe et pollué ont révélé de nombreuses anomalies dans les premiers mètres du sous-sol de Notre-Dame (Fig. 3). L'association des mesures radar et des mesures électrostatiques s'est avérée extrêmement profitable et a permis d'obtenir une vision globale du sous-sol de la cathédrale avec une très bonne corrélation entre méthodes. Ce projet géophysique a permis de reconnaître un système de réseaux moderne mal connu, avec notamment les différents systèmes de chauffage installés depuis le 19^{ème} siècle. Une fois ces anomalies interprétées, plusieurs ensembles d'anomalies dont l'origine est vraisemblablement liée aux phases antérieures de la construction ont également pu être observés, révélant ainsi des vestiges totalement inconnus. Les résultats issus de cette étude permettent d'améliorer la connaissance de ce monument emblématique et ont constitué une base de travail importante pour les services de l'État en charge du suivi archéologique des travaux de la cathédrale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FLAGEUL S., DABAS M., THIESSON J., REJIBA F., TABBAGH A., 2013 – First in situ tests of a new electrostatic resistivity meter, *Near Surface Geophysics*, 11(3), 265-274.

*Prospection 3D-Radar
Tranche en profondeur : 20 cm*



*Prospection électrostatique
Résistivité électrique - a = 1,14 m*

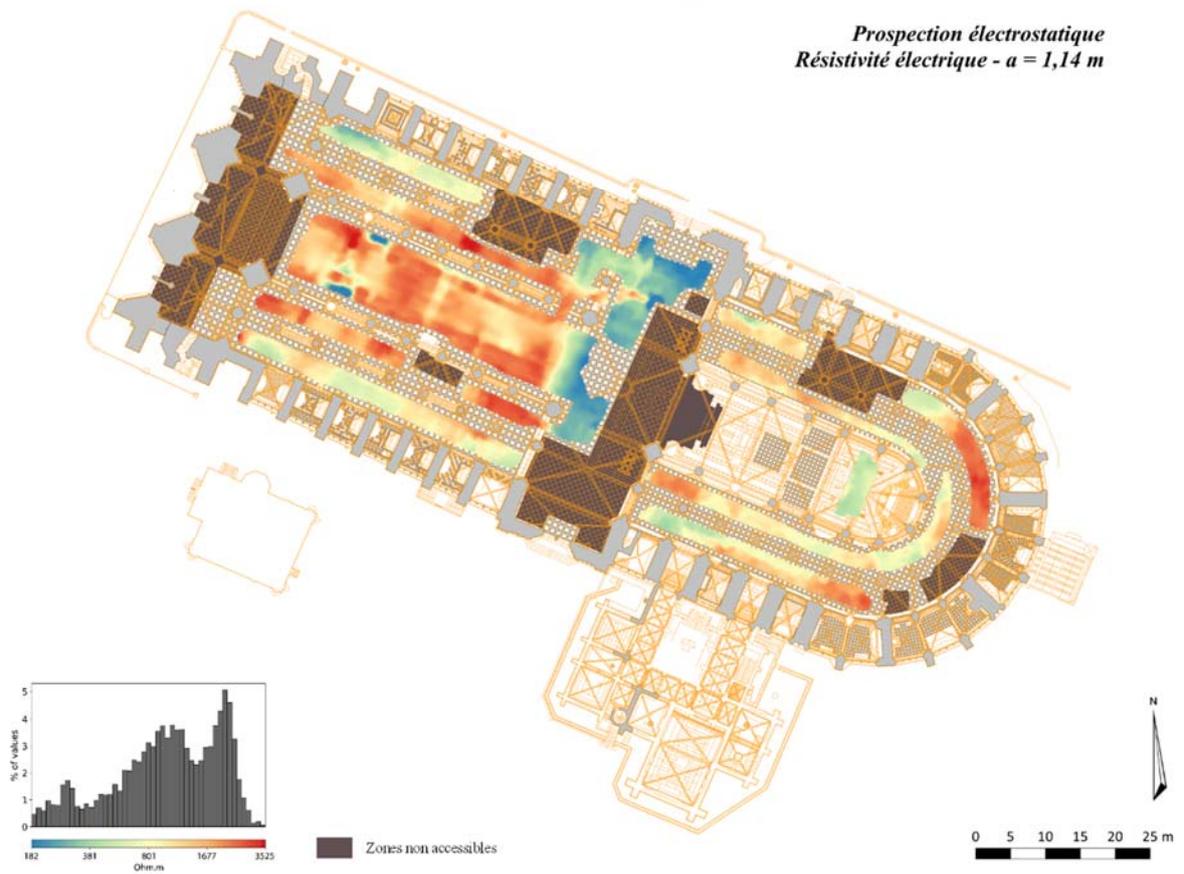


Fig. 3 – Cartes issues du 3D-Radar et du MP3 (source AGP / Inrap / METIS)

Prospection géophysique de subsurface du Parc animalier et botanique de Clères

JUNIQUE L.¹, FINCO C.¹, GUILBERT V.¹, LEDUN C.¹, FAN B.¹, ANTOINE R.¹, BEAUCAMP B.¹, THERAIN P.-F.², FAUCHARD C.¹

¹ Cerema, ENDSUM, 76120 Le Grand Quevilly, France

² Conseil Départemental de Seine-Maritime (CD76), Parc animalier et botanique de Clères, France

Résumé

Cette étude présente les résultats d'une campagne de prospection géophysique réalisée au Parc animalier et botanique de Clères (Seine-Maritime, France). L'objectif est de cartographier les vestiges archéologiques médiévaux (fossé de motte féodale, basse-cour) et les infrastructures hydrauliques du XIX^e siècle grâce à l'imagerie de résistivité électrique (IRE), Ground Penetrating Radar (GPR), méthodes électromagnétiques inductives (EMI), et la Méthodes Magnétique (MM). Les premiers résultats montrent des anomalies cohérentes avec des structures enfouies, fournissant des données inédites pour la valorisation du patrimoine du site.

Géophysique, archéogéophysique, résistivité électrique, GPR, EMI, cartographie souterraine.

Abstract

This study presents the results of a geophysical survey conducted at the Zoological and Botanical Park of Clères (Seine-Maritime, France). The aim is to map medieval archaeological remains (feudal motte, outer bailey) and 19th hydraulic infrastructures using electrical resistivity imaging (ERI), ground-penetrating radar (GPR), electromagnetic induction methods (EMI), and Magnetic Methods (MM). The initial results reveal anomalies consistent with buried structures, providing new data for the site's heritage enhancement.

Geophysics, archaeogeophysics, electrical resistivity, GPR, EMI, subsurface mapping.

INTRODUCTION

Le Parc animalier et botanique de Clères (Fig.1) est un site historique majeur de Normandie ayant connu plusieurs phases d'aménagements du XI^e au XIX^e. Afin d'améliorer la compréhension du passé archéologique du site et d'orienter les futurs projets d'aménagement, une étude géophysique a débuté en 2025 par l'équipe ENDSUM du Cerema en collaboration avec le Conseil Départemental de Seine-Maritime. L'objectif principal est d'identifier les structures enfouies associées aux occupations successives du site, notamment d'appréhender le site de la motte féodale (en orange Fig.1) ainsi que la basse-cour, et de définir les limites des fossés de ces deux ensembles, en admettant que le domaine suivait aux XI-XII^e un modèle de motte castrale. Certains, réseaux hydrauliques et aménagements du XIX^e avant les transformations du château en 1860 sont connus, mais ne sont pas cartographiés précisément. Enfin, certains bâtiments repérés sur des plans anciens ont disparu mais semblent encore conserver des vestiges (Eugène Architectes du Patrimoine, 2021).

Pour relocaliser l'ensemble de ces structures, plusieurs méthodes de prospection géophysique ont été ou seront utilisées : (1) L'imagerie de résistivité électrique (ERI), (2) Le géoradar (GPR) (3), Les mesures par méthode électromagnétique inductive (EMI), (4) Méthode Magnétique (MM).

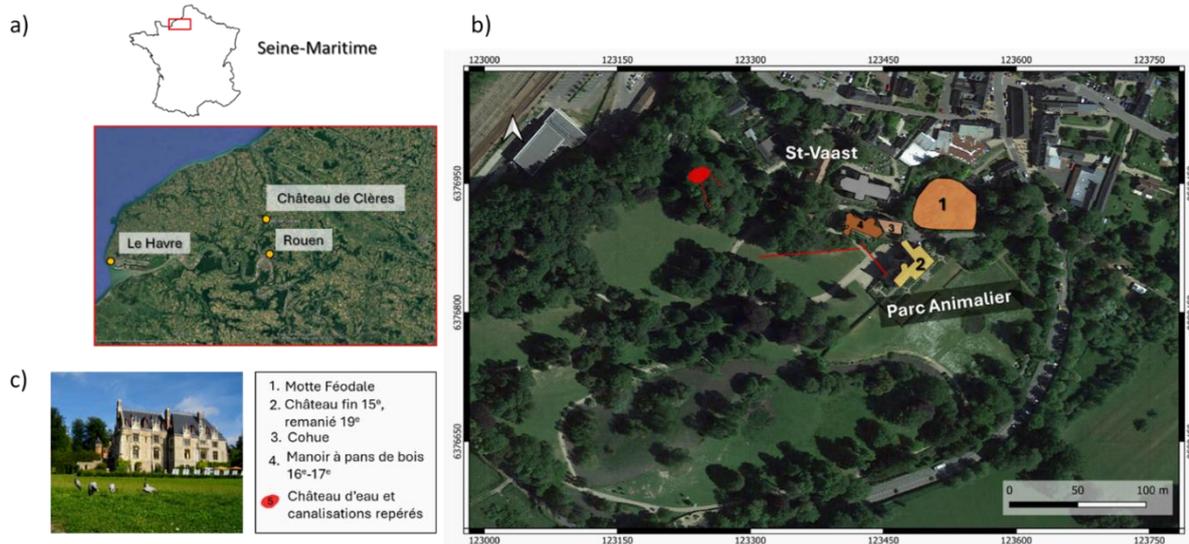


Fig. 1 – (a) Situation géographique du Château de Clères, (b) zone d'étude et emplacement des différents bâtiments, (c) vues récentes du Château.

HISTORIQUE DU SITE

Les origines médiévales du site Clères est mentionné pour la première fois au XI^e siècle, dans une donation de Roger de Clères à l'abbaye Saint-Ouen de Rouen (Département de Seine-Maritime, 2020). Aucune source directe ne décrit la forme du château originel, mais des vestiges subsistent aujourd'hui sous la forme d'une motte et de ruines (Fig. 2 a, b). À l'époque médiévale, une motte castrale désigne un type de fortification constitué d'un monticule de terre (la motte), souvent surmonté d'une tour en bois ou en pierre, et associé à une basse-cour : une enceinte plus vaste, protégée par des fossés, regroupant habitations, dépendances et activités agricoles. Ces éléments forment ce qu'on appelle un ensemble castral, typique du XI^e-XII^e siècles en Normandie. L'ensemble castral a subi la guerre de Cent Ans et les raids bourguignons qui ont détruit de nombreux châteaux et villages en pays de Caux autour des années 1460 (Hennache et Auber, 2007).

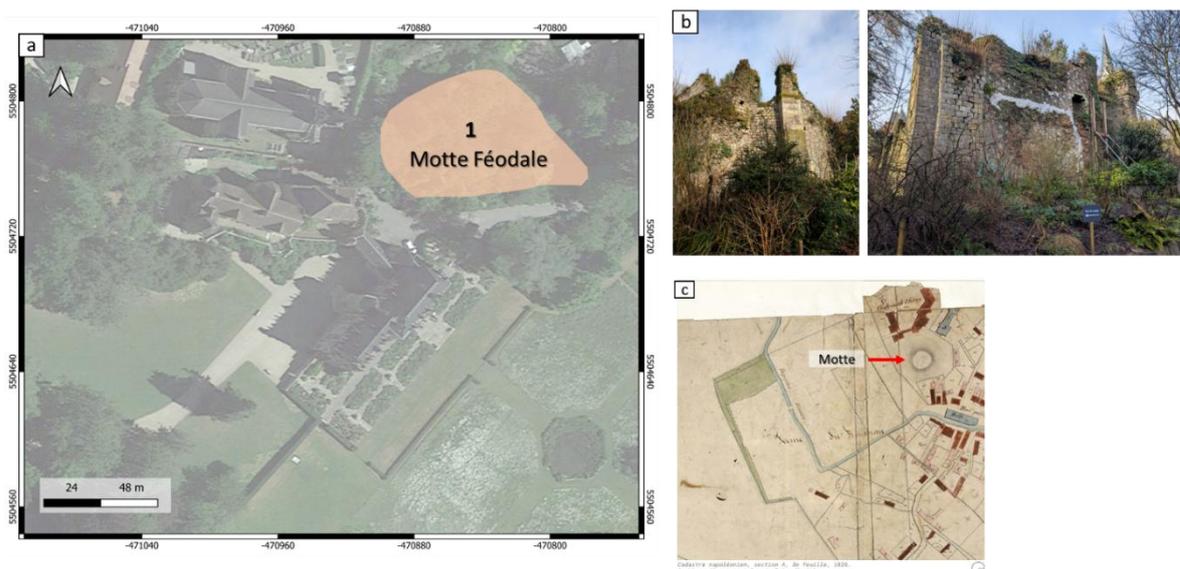


Fig. 2 – (a) Situation de la motte féodale, (b) état actuel des ruines remaniées en surface au XIX^e, (c) ancien plan cadastrale napoléonien de 1826.

Aménagement du XIX^e siècle

Au XIX^e siècle, sous l'impulsion de Louis Hector de Béarn, le site subit de profondes transformations. Henri Parent et Édouard Busigny, ont restructuré le domaine en créant un parc paysager à l'anglaise et en modernisant les infrastructures hydrauliques, incluant un système de canalisations, d'un château d'eau enterré (Eugène Architectes du Patrimoine, 2021). Ces aménagements ont fortement impacté l'organisation du domaine.

MÉTHODES ET ANALYSES

L'imagerie de résistivité électrique a été utilisée pour détecter des structures enfouies qui génèrent des contrastes de résistivité. Nous présentons ici deux profils, P1 et P4, sur les quatre acquis (Fig. 3.a) acquis avec un protocole WS et DD. La coupe P1 (Fig.3.a), située le long des ruines au niveau de la motte (Fig.3b), a été réalisée en utilisant le protocole Wenner-Schlumberger avec 64 électrodes espacées régulièrement de 1 m, ce qui correspond à une longueur totale de 63 m (Fig.3.c). Elle présente une couche superficielle avec des résistivités de l'ordre de 100 à 300 Ω .m. On peut associer ces gammes de résistivité aux cheminements modernes ou aux matériaux de remblais. Des horizons plus conducteurs, compris entre 30 et 60 Ω .m, sont présents jusqu'à 8 à 9 m de profondeur et pourraient correspondre à des dépôts sablo-limoneux peu perturbés (cf. *Forage BSS000FKBW*, 1929). Ces niveaux sont localement recoupés par une anomalie plus résistante (~ 100 Ω .m), observable vers 30 m le long du profil, de la surface jusqu'à 9 m de profondeur. Cette structure pourrait correspondre à un comblement progressif d'un ancien fossé.

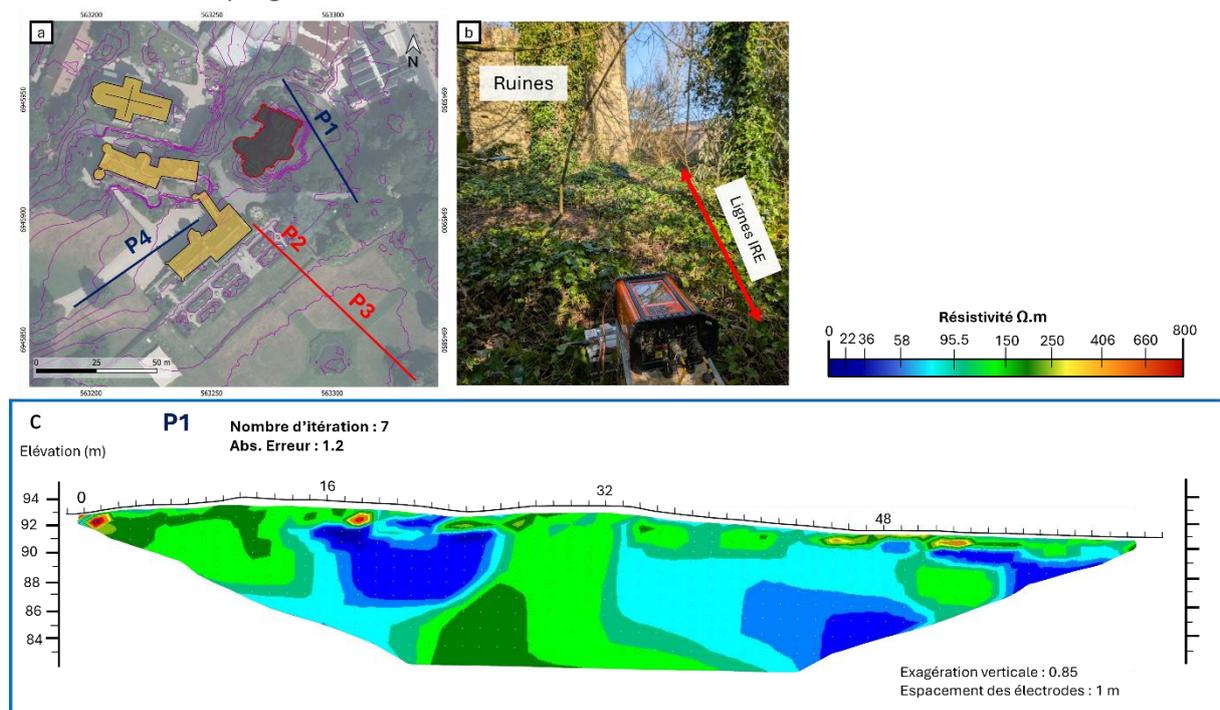


Fig. 3 – (a) Coupe IRE P1 en face de la façade nord-ouest des Ruines, (b) emplacement des profils IRE, (c) coupe IRE P1 inversé.

La coupe P4 (Fig.4.a, c), recoupe dans son entièreté l'actuelle cour du château. Afin d'améliorer la résolution verticale dans les premières couches, un "roll-along" a été mis en œuvre : les électrodes ont été déplacées en plusieurs segments consécutifs tout en conservant un espacement constant de 0,5 m, ce qui a permis d'atteindre une longueur totale de 63,5 m. Dans les 10 premiers mètres du profil on note une anomalie formant une zone plus résistante jusqu'à 3 m de profondeur. Plus loin dans le

profil, une zone plus résistante se retrouve entre 26 et 48 m du profil et qui partage le même ordre de résistance entre 100 et 250 Ω .m (Fig.4.c). On note que l'anomalie se positionne au contact entre le sol végétalisé et l'anthroposol (gravillons), au niveau de l'ancienne entrée de la cour d'armes interprété comme un ancien fossé.

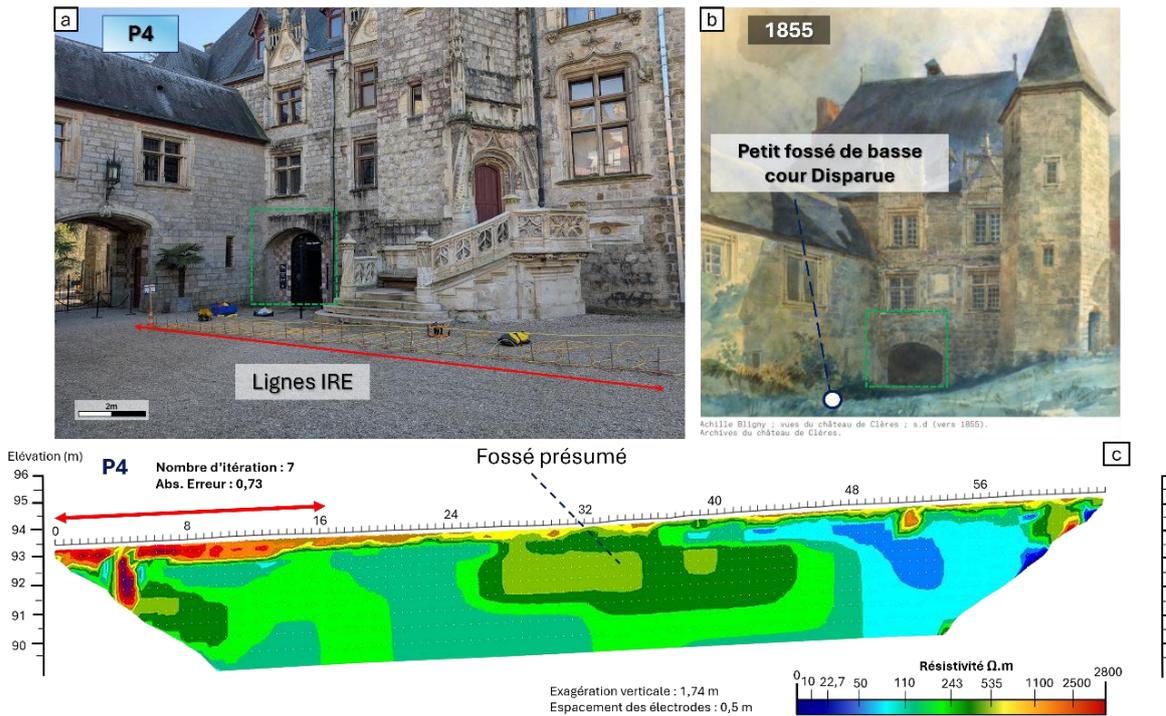


Fig. 4 – (a) Cour actuelle du château, (b) vues du château vers 1855, (c) coupe IRE P4 avec emplacement du fossé à environ 26 m d'acquisition.

CONCLUSION

Cette étude de prospection géophysique a permis d'identifier plusieurs anomalies cohérentes avec des vestiges archéologiques enfouis au sein du Parc animalier et botanique de Clères. Il a été possible de cartographier des structures liées aux différentes phases d'occupation du site, notamment les limites de fossés de la motte féodale, la basse-cour médiévale et des infrastructures disparues. Ces résultats fournissent des données inédites qui contribuent à une meilleure compréhension du passé historique du domaine. Les résultats du géoradar 3D, de la méthode magnétique (MM) et de l'EMI permettront de contraindre plus précisément les limites entre la basse-cour et les fossés aujourd'hui disparus, mais également d'identifier les aménagements hydraulique et destructions du XIX^e siècle ayant fortement modifié le site.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Département de Seine-Maritime., 2020 – Le Parc de Clères. Projet scientifique et culturel 2020-2025. Seine-Maritime, 1er vol., 106 p.
- Eugène Architectes du Patrimoine, 2021 – Clères - Parc botanique et animalier. Restauration des monuments historiques, du parc et des aménagements. Étude historique et documentaire. Seine-Maritime, 1er vol., 224 p.
- Hennache A., Auber L., 2007 – Les secrets du Manoir. Catalogue de l'exposition Les secrets du Manoir, Parc de Clères, Département de Seine-Maritime, 88 p.

EXPLORATION DU SITE ARCHÉOLOGIQUE DE ZOL-I ZARD (TADJIKISTAN) PAR GÉOMAGNÉTISME, INDUCTION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE ET PHOTOGRAMMÉTRIE

SAINTENOY ALBANE¹, ZEYEN Hermann¹, LAMBERT RÉMI¹, GELIN MATHILDE²

¹ CNRS, Université Paris Saclay, GEOPS, Bât. 504, 91405 Orsay cedex, France

² CNRS, ARSCAN, UMR 7041, MSH Mondes, France

RESUME

Des investigations géophysiques ont été réalisées sur une zone de sept hectares à fort potentiel archéologique à l'aide d'un magnétomètre, d'un appareil à induction électromagnétique et d'un drone pour un relevé photogrammétrique. L'analyse des données avec le logiciel de modélisation magnétique Pymagra a révélé que la topographie contribue largement aux anomalies magnétiques observées. En s'appuyant sur la carte des anomalies résiduelles, de nouvelles zones de fouilles ont été identifiées et explorées, aboutissant à la mise au jour de structures tombales. Celles-ci se distinguent magnétiquement par des accumulations de galets présentant une aimantation plus faible que le sol environnant.

Mots clés : Géophysique, Archéologie, Asie Centrale, Période Hellénistique

ABSTRACT

Geophysical investigations were conducted over a seven-hectare area with high archaeological potential using a magnetometer, an electromagnetic induction device, and a drone for a photogrammetric survey. Data analysis with the Pymagra magnetic modeling software revealed that topography largely accounts for the observed magnetic anomalies. Based on the residual anomaly map, new excavation areas were identified and explored, leading to the discovery of burial structures. These structures are magnetically characterized by accumulations of pebbles with lower magnetization than the surrounding soil.

Key words : Geophysics, Archaeology, Central Asia, Hellenistic period

INTRODUCTION

Dans la région de Danghara, au sud du Tadjikistan, le site archéologique de Zol-i Zard s'étend sur une vaste prairie de 7 hectares. Il comprend au moins quatre petites élévations topographiques (appelées «tepe»), une zone marécageuse ainsi que plusieurs zones humides, et est délimité par une muraille en briques crues de 6 mètres de hauteur, intégrant 14 tours. Connue depuis les années 1970 (Denisov, 1979; Filimonova et Akhmetzianov, 2009), ce site est susceptible de renfermer des vestiges s'échelonnant de la période hellénistique à l'époque moderne. Il fait l'objet d'une mission archéologique franco-tadjike depuis 2019 (Gelin et al., 2023 ; Gelin et al., sous presse). En parallèle des fouilles archéologiques menées sur plusieurs zones du site, deux campagnes de prospection géophysique ont été réalisées à l'automne 2022 et au printemps 2023. Ces investigations visaient à obtenir une vision d'ensemble du site et de son environnement immédiat, ainsi qu'à identifier de nouvelles zones à prospecter.

Méthodes utilisées

Deux modes de relevé ont été employés : au sol et par drone. Au sol, nous avons cartographié l'intérieur du site de Zol-i Zard, délimité par ses murs d'enceinte, ainsi que ses abords immédiats en utilisant deux méthodes géophysiques (**Fig. 1**) : un instrument à induction électromagnétique (CMD miniExplorer) et un magnétomètre à césium (Geometrics G-858 cesium gradiometer). Les mesures ont été effectuées en enregistrant des profils parallèles entre eux avec un espacement de 0,5 m sur des rectangles de 30 m de large et de longueurs variées. Les coordonnées géographiques des quatre coins des rectangles ont été mesurées avec un GPS différentiel de précision décimétrique. Par drone (DJI Magic Pro), et à l'aide de 16 cibles géoréférencées disposées au sol, nous avons capturé des images du site selon un plan de vol prédéfini, permettant ainsi de reconstruire une orthomosaique ainsi qu'un

modèle microtopographique. Enfin, le nouveau logiciel open-source multi-plateformes en langage Python, Pymagra, a été utilisé pour l’affichage, le traitement et l’inversion des données magnétiques.



Fig. 1 : L’équipement utilisé à Zol-i Zard. A gauche, le magnetomètre avec deux capteurs superposés verticalement ; à droite, le CMD miniExplorer avec un GPS pour localiser les mesures. La muraille de 6 m de haut délimitant la zone est visible au fond. Vue vers le sud.

Résultats

La carte de la conductivité électrique apparente du site de Zol-i Zard est présentée sur la **Fig. 2A**, obtenue à partir du jeu de bobines espacées de 1,18 m. Sur cette image, les zones situées à proximité des murs montrent fréquemment une diminution de la conductivité électrique (zones rouges), possiblement associée à des matériaux plus secs que ceux du reste du site. En raison de la topographie plus élevée, ces secteurs se situent à une altitude supérieure du niveau de la nappe phréatique. Il n’est pas exclu que certaines de ces anomalies résultent de vestiges bâtis. Par ailleurs, l’ellipse noire délimite une zone située sur le tepe A, où les anomalies linéaires rouges pourraient correspondre à des murs, dans le prolongement de structures déjà mises au jour lors de fouilles situées au nord de cette zone.

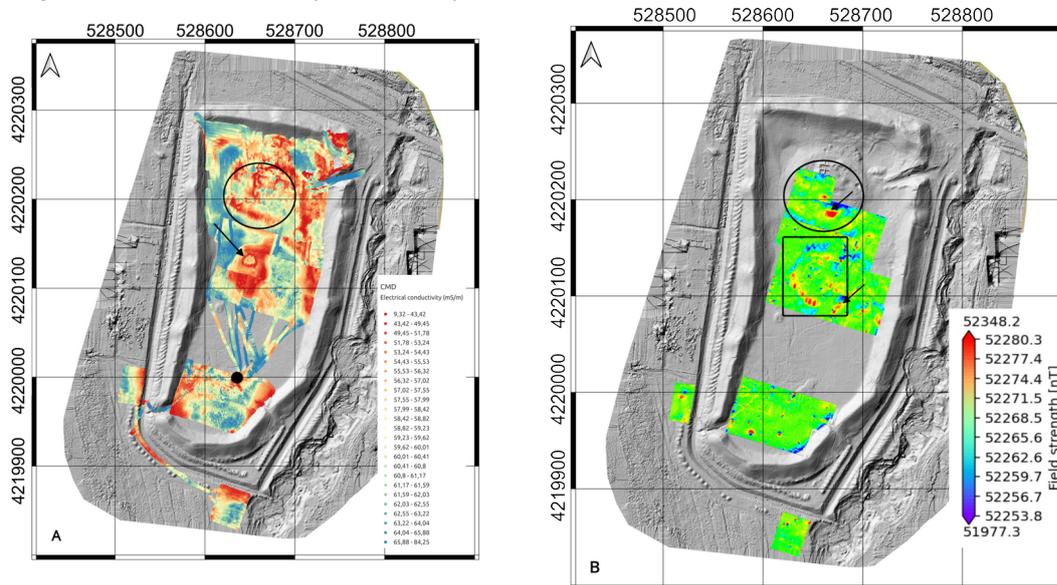


Fig. 2 : **A)** Carte de la conductivité électrique apparente obtenue avec les bobines espacées de 1,18 m (calibration effectuée au point noir, la flèche pointe une dépression liée à une fouille sauvage sur le tepe B). **B)** Carte des anomalies du champ magnétique. Le rectangle noir correspond à la zone de modélisation Pymagra. Les flèches noires indiquent les deux zones de fouilles ouvertes suite à nos mesures. Le cercle noir entoure le tepe A avec une zone de fouilles commencées au Nord. Le modèle de microtopographie obtenue par imagerie drone est en image de fond.

La carte des anomalies magnétiques enregistrées par le capteur du haut (1,4 m au dessus du sol) est présentée sur la **Fig. 2B**. L'inspection visuelle de la topographie obtenue à partir du relevé par drone et des mesures magnétiques nous laisse suspecter une corrélation entre les anomalies magnétiques et la topographie.

Modélisation des données magnétiques

Nous avons modélisé la réponse magnétique des anomalies topographiques en supposant une susceptibilité magnétique uniforme, afin de déterminer la magnétisation moyenne des matériaux proches de la surface. Nous avons utilisé le logiciel Pymagra (<https://github.com/HZeyen/Pymagra>). Nous avons sélectionné pour nos calculs, une zone rectangulaire autour du tepe B, rectangle indiqué sur la **Fig. 2B**. La topographie a été approximée par des prismes rectangulaires de 1×1 m de côté (compromis entre temps de calcul et précision). La hauteur correspond à l'élévation topographique au-dessus du point le plus profond de la zone d'étude. Nous avons simulé des mesures effectuées à 1,4 m au-dessus du sol, conformément aux conditions du terrain. Le résultat est présenté sur la **Fig. 3**.

La susceptibilité optimale obtenue pour ce modèle est de 0,02 SI. Toutefois, cette valeur doit être considérée comme une estimation maximale, car l'épaisseur de la couche de sol pourrait être plus importante que celle modélisée, ce qui impliquerait une susceptibilité moyenne plus faible. Pour le moment, aucun échantillon de sol n'a été prélevé pour valider ce résultat. Sur la **Fig. 3**, il apparaît néanmoins clairement que l'effet de la topographie explique une part significative des anomalies magnétiques mesurées. La **Fig. 3D** met en évidence des anomalies résiduelles, non expliquées uniquement par la topographie.

Suite à ces mesures géophysiques, des fouilles ont été commencées sur deux anomalies locales indépendantes de la topographie, zones de fouilles pointées par les flèches noires sur la **Fig.2B**. À ces emplacements, des amas de galets calcaires ont été mis au jour en sous-sol. Nous interprétons le lien avec les anomalies magnétiques comme étant dû à une aimantation plus faible du calcaire par rapport à celle du sol environnant.

CONCLUSIONS

Le site de Zol-i Zard a été prospecté au sol par induction électromagnétique et au magnétomètre, et cartographié par drone. La carte de variations de conductivité électrique apparente contient des géométries qui pourraient être liées à des vestiges archéologiques. La topographie obtenue par imagerie drone permet de calculer l'effet de la topographie sur les anomalies magnétiques et de mettre en évidence des anomalies associées à autre chose que la topographie. Un effet similaire pourrait être étudié à l'avenir à travers les mesures en mode **in-phase** de l'instrument **CMD**, celles-ci étant proportionnelles à la susceptibilité magnétique du sol. D'or et déjà, nous avons proposé deux nouvelles zones de fouilles archéologiques qui ont mis en évidence des amas de galets associés à des structures funéraires. Mais nous attendons avec impatience les résultats de fouilles plus profondes pour y confronter nos interprétations.

Par ailleurs, la seconde campagne de mesures effectuée en mai 2023 a été l'occasion de former un jeune chercheur de l'Institut d'Histoire, d'Archéologie et d'Ethnographie de Douchanbé au pilotage de drone et à la planification de vol via l'application Pix4D. Un drone a été offert à l'institut afin de soutenir l'ensemble des missions archéologiques menées au Tadjikistan. Nous espérons poursuivre notre collaboration dans l'avenir.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à l'Institut d'Histoire, d'Archéologie et d'Ethnographie de Douchanbé ainsi qu'à la Commission des Fouilles du Ministère français des Affaires étrangères pour leur inestimable soutien qui a grandement contribué au succès de ce projet.

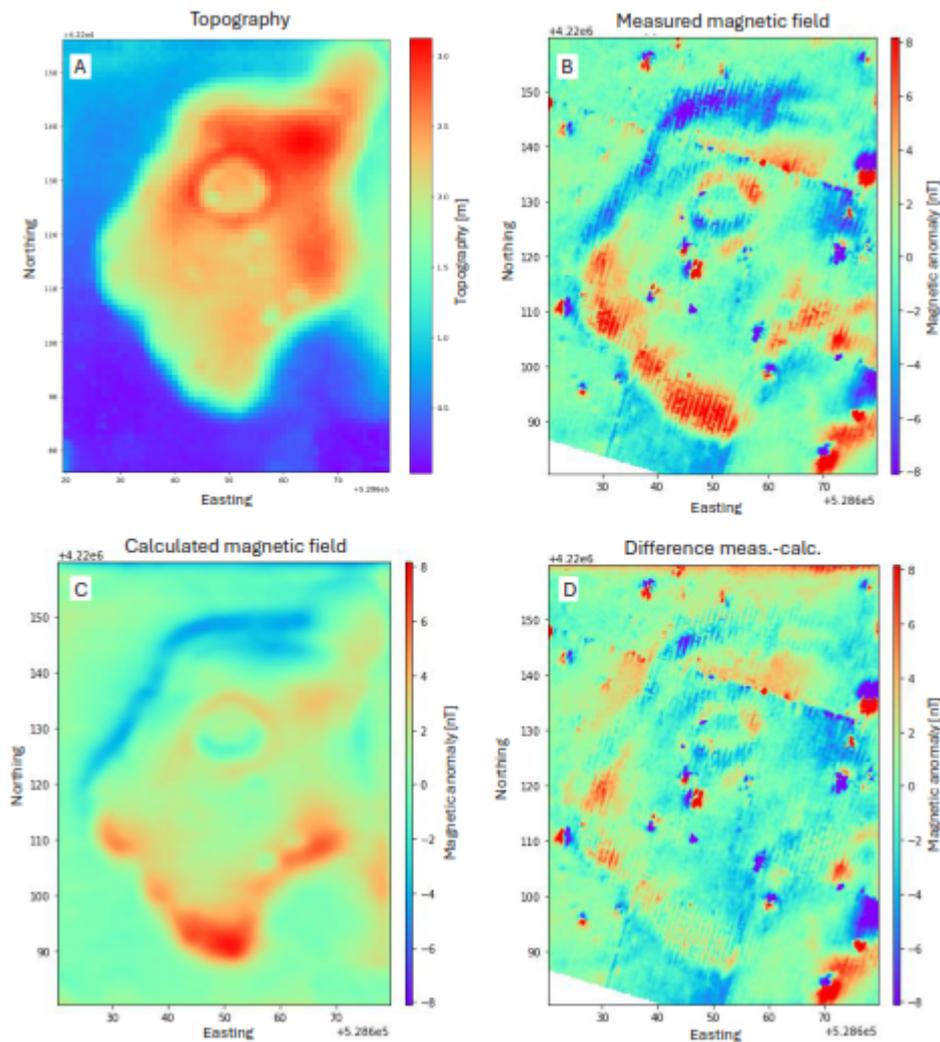


Fig. 3 : *A) Topographie de la zone étudiée. B) Anomalies magnétiques mesurées. Certains effets de bord aux limites des rectangles de mesures sont visibles, en particulier autour de Northing = 140 m. C) Effet magnétique de la topographie calculé avec une susceptibilité de 0,02 SI. D) Différence entre champs magnétiques mesuré et calculé.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gelin M., Yakubov Yu., Filimonova T., Davtian G., Bordeaux O., Karaev A., Ashurmadov I., 2023,** “Исследования Таджикско-Французской Археологической миссии Южного Таджикистана в 2021 году” [Research of the French-Tajik archaeological mission in Southern Tajikistan, 2021], Археологические работы в Таджикистане [Archaeological works in Tajikistan] 44, p. 196-222 <https://hal.science/hal-04223826v1>
- Gelin M., Yakubov Yu., Filimonova T., Bordeaux O., Davtian. G., Ashurmadov I., Karaev A., Ghasemi P., Sainenoy A., Lambert R., in press,** “Исследования Археологической миссии Южного Таджикистана в 2022 году” [Research of the French-Tajik archaeological mission in Southern Tajikistan, 2022], Археологические работы в Таджикистане
- Denisov E., 1979,** “Отчёт о работе Дангаринского отряда в 1974 г.” [Report on the work of the Danghara group in 1974], Археологические работы в Таджикистане 14, p. 214-230.
- Filimonova T. et Akhmetzianov M., 2009,** “Поисковые работы по составлению археологической карты Дангаринского района в 2009 году” [Exploratory works for establishing an archaeological cart in the Danghara district in 2009], Археологические работы в Таджикистане 35, p. 57-114.

DIAGNOSTIC GÉOLOGIQUE ET STRUCTUREL DU CHÂTEAU DE LYS-ST-GEORGES

SEVENET Thibault (1), HERRATI Savéria (1)

1) GEOPAT, Arles, France, contact@geopat.pro

RÉSUMÉ

L'étude géophysique du château de Lys-Saint-Georges (36) a permis d'identifier les causes des désordres structurels. Les analyses géoradar et électriques ont révélé des anomalies dans les maçonneries et des zones de faiblesse dans les sols. La présence de remblais mal compactés, des circulations hydrauliques et une faille géologique contribuent aux instabilités observées. Des solutions de consolidation et de drainage sont préconisées pour stabiliser le site. Cette étude met en lumière l'importance des méthodes géophysiques pour la préservation du patrimoine bâti.

Mots clés : Géophysique, Pathologies, Géologie, Diagnostic, Géotechnique

ABSTRACT

The geophysical study of the Château de Lys-Saint-Georges (36) made it possible to identify the causes of the structural disorders. GPR (Ground Penetrating Radar) and electrical analyzes revealed anomalies in the masonry and areas of weakness in the subsoils. The presence of poorly compacted embankments, hydraulic circulations and a geological fault contribute to the observed instabilities. Consolidation and drainage solutions are recommended to stabilize the site. This study highlights the importance of geophysical methods for the preservation of built heritage.

Key words : Geophysics, Pathologies, Geology, Diagnosis, Geotechnics

L'étude géophysique et géotechnique menée sur le site du château de Lys-Saint-Georges (36) avait pour objectif de comprendre les désordres structurels affectant l'édifice et d'identifier les causes potentielles des fissurations et affaissements observés. Les investigations géophysiques menées par le bureau d'étude GEOPAT ont permis d'établir un diagnostic détaillé et de proposer des solutions de stabilisation et de préservation du bâti.

1. Contexte général du site

Le château de Lys-Saint-Georges est un édifice privé dont le dossier d'étude est réalisé sous la maîtrise d'œuvre de l'architecte en chef des monuments historiques Maël de Quelen. Ce lieu rempli d'histoire est implanté sur un relief marqué et repose sur des formations calcaires. La présence de douves, d'anciennes fondations et d'extensions successives depuis le XII^{ème} siècle contribuent à la complexité des pathologies et des causes possibles. Les désordres relevés concernent principalement des fissurations dans les murs porteurs, des tassements différentiels et des mouvements de terrain qui compromettent l'intégrité du bâti. L'étude géophysique s'inscrit, à ce stade, dans une démarche de conservation et de sécurisation de ce patrimoine architectural, en identifiant les causes des instabilités et en préconisant des solutions de confortement adaptées.

2. Programme d'investigations

La série d'essais mis en œuvre pour cette étude repose sur plusieurs techniques de mesure complémentaires. Le géoradar a été mis en œuvre dans la cour intérieure du château dans l'objectif d'identifier la présence d'ouvrages enterrés et de traces de travaux de déblaiement ou remblaiement des terrains. La tomographie de résistivité électrique apporte des informations sur la nature des terrains et leur structure au travers de leurs caractéristiques de résistivité électrique. Les sondages pressiométriques et pénétrométriques ont permis de mesurer la capacité portante des sols et d'évaluer leur sensibilité aux variations hydriques tout en fournissant des données de calibration aux modèles géophysiques obtenus. Enfin, l'évolution des mouvements du bâti en temps réel est une information complémentaire qui était fournie par un réseau de capteurs, incluant fissuromètres et inclinomètres installé préalablement à notre intervention.



Fig. 1 - Localisation des investigations géophysiques a) Géoradar zone bleue; b) Tomographie électrique (lignes rouges)

Le protocole mis en œuvre pour cette étude s'est déroulé en plusieurs étapes. Une première phase de reconnaissance réalisée principalement par l'équipe de maîtrise d'œuvre a consisté en l'analyse des documents historiques et cartographiques afin de mieux comprendre l'évolution du site et ses contraintes environnementales, historiques et structurelles. Ensuite, les investigations géophysiques ont été réalisées selon un maillage précis couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Chaque technique a été appliquée en fonction de son utilité spécifique : le géoradar avec une double antenne de marque IDS de fréquence centrale 400 et 900 MHz, la prospection électrique avec le résistivimètre 4Point Light LIPPMAN dans un dispositif Wenner-Schlumberger à 48 électrodes. Enfin, les sondages géotechniques ont apporté une caractérisation ponctuelle et fine des sols en profondeur. Les résultats obtenus ont ensuite été croisés pour affiner les analyses et apporter un éclairage complet sur les problématiques structurelles identifiées.

3. Résultats

Les investigations géophysiques ont révélé plusieurs anomalies impactant la stabilité du château de Lys-Saint-Georges. Le géoradar réalisé dans la cour a permis d'analyser le sous-sol jusqu'à une profondeur d'environ 250 cm à l'aide de cinq représentations cartographiques (une seule est présentée en figure xx) avec une forte atténuation au-delà due à la nature argilo-sableuse des terrains comme confirmé par les forages géotechniques. Les mesures effectuées dans la cour intérieure ont révélé une interface moyennement marquée à 90-100 cm de profondeur indiquant un

changement de nature ou de compacité des matériaux de remblai. Ces terrains ne concernent pas l'ensemble des terrains de couverture de la cour intérieure. Les sols de fondation de l'aile nord du château semblent être, tout du moins partiellement, constitués de remblais, ayant subi un phénomène de décompression ou un mauvais compactage. Une seconde zone de remblais hétérogènes est mise en évidence en partie centrale de la cour, mais ne semblent pas affecter directement les terrains de fondations du corps de logis. L'ensemble de ces interprétations sont présentées en figure xx.

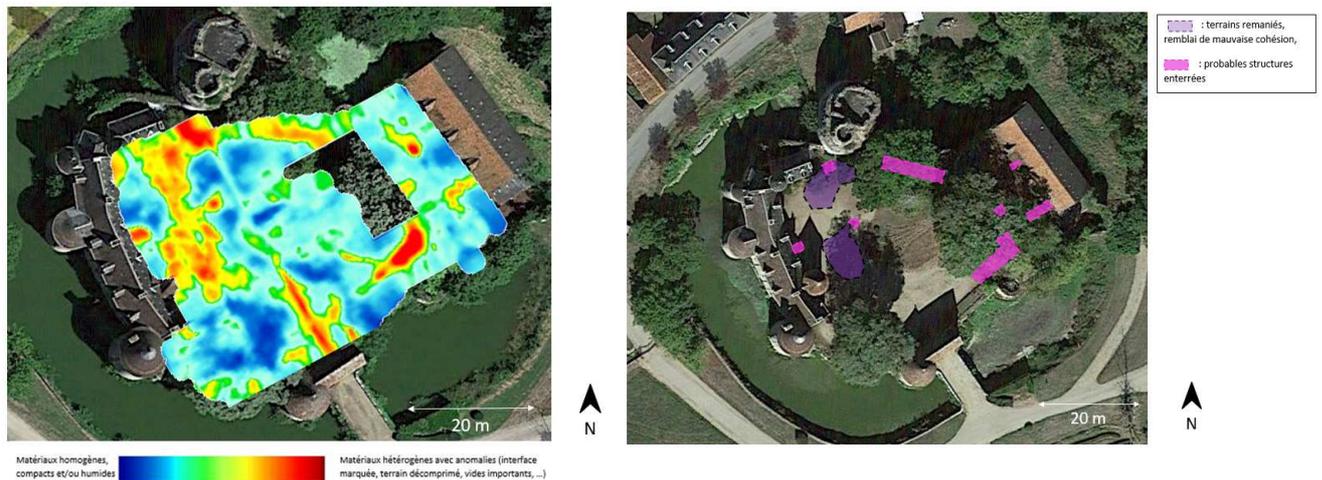


Fig. 2 - Cartographie des anomalies géoradar entre 138 et 161 cm de profondeur à droite, une vue interprétée à gauche

La prospection électrique a mis en évidence des zones à forte hétérogénéité dans les remblais sous-jacents (voir figure 3), indiquant des risques de différences de compacité et des contrastes de résistivité suggérant la présence d'eau dans certaines zones. Ces résultats corroborent les observations issues des forages pressiométriques, qui montrent des capacités portantes faibles et une variabilité importante des caractéristiques mécaniques des sols d'assise.

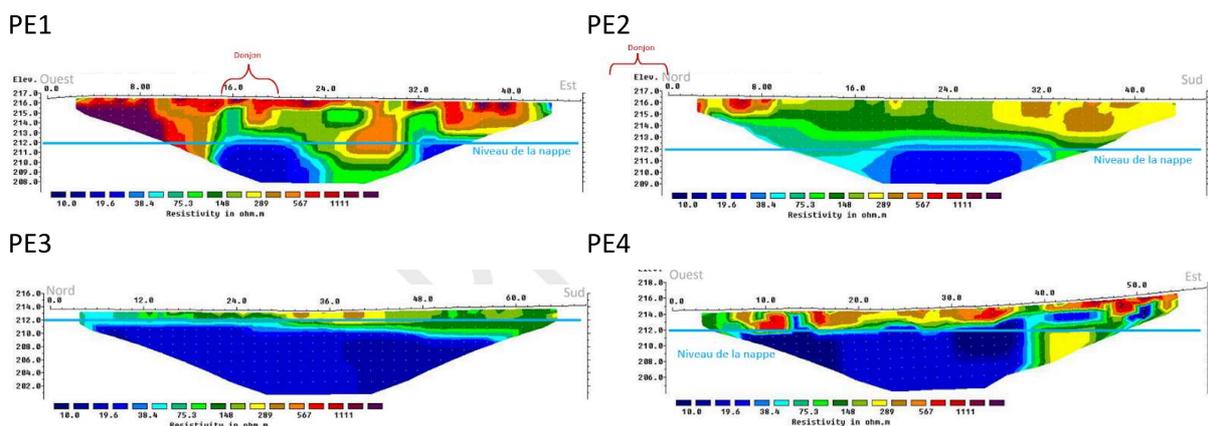


Fig. 3 - Profil de tomographie de résistivité électrique du château

4. Interprétation et conclusions

L'interprétation des résultats met en évidence plusieurs facteurs responsables des désordres structurels observés : la présence de remblais mal compactés favorisant les tassements différentiels,

des circulations hydrauliques affectant les propriétés mécaniques des sols, l'impact d'une faille géologique susceptible d'accentuer les déformations du bâti, notamment les tassements différentiels, l'érosion interne causée par les circulations hydrauliques ayant contribué à la déstabilisation progressive des fondations, favorisant l'apparition de fissures et d'affaissements.

Les comparaisons entre les différentes techniques d'investigation permettent d'apporter une compréhension globale du problème. Par exemple, la corrélation entre les anomalies détectées par géoradar et les mesures de résistivité électrique suggère que certaines zones du sous-sol sont particulièrement vulnérables aux infiltrations d'eau. L'interprétation de ces résultats met en évidence l'influence combinée de plusieurs facteurs sur la stabilité du site. Ces éléments soulignent l'urgence d'une intervention, notamment par la mise en place d'un système de drainage pour limiter les effets des infiltrations d'eau et la consolidation des fondations pour renforcer la stabilité structurelle du château. La combinaison des techniques géophysiques a permis d'aboutir à une compréhension fine des mécanismes mis en jeu et de proposer des solutions ciblées pour assurer la pérennité du château de Lys-Saint-Georges.

5. Synthèse

Ce diagnostic aboutit à plusieurs hypothèses sur l'origine des désordres en fonction de la zone du château concernée. Pour la partie nord du corps de logis, les hypothèses, par ordre de crédibilité, participant à expliquer l'origine des désordres sont les suivantes :

- Détérioration du soubassement en pierre maçonnée ;
- Sous dimensionnement de la fondation et des soutènements ;
- Retrait gonflement des argiles ;
- Présence d'une faille géologique à proximité directe de l'ouvrage.

Tandis que pour l'extension du corps de logis, les hypothèses sont les suivantes:

- Défaut de remblaiement des douves ;
- Gradient hydraulique et déplacement de fine ;
- Sous dimensionnement de la fondation et des soutènements ;
- Détérioration du soubassement en pierre maçonnée.

Des incertitudes persistent cependant notamment concernant la profondeur et la géométrie des fondations, l'étendue des douves remblayées, la cartographie et les variations des niveaux d'eau, la coupe lithologique au nord-ouest de la zone d'étude et sous les douves, les caractéristiques mécaniques des marnes, les caractéristiques mécaniques des argiles. Cette étude illustre l'importance de la géophysique dans la préservation du patrimoine bâti. En combinant différentes méthodes d'investigation, elle offre une compréhension approfondie des mécanismes en jeu et permet de proposer des solutions adaptées. La conservation du château de Lys-Saint-Georges pourra ainsi s'appuyer sur ces données pour assurer la sécurité et la durabilité de l'édifice.

Bibliographie

Barraud L., Sevenet T., 2021 - Rapport d'Étude : Reconnaissance structurelle et diagnostic des sols d'assise par investigations géophysiques, 56 p.

Serre J.B., Pascuttini N., 2022 - Sécurisation du château de Lys-St-Georges (36) Diagnostic d'ouvrages géotechniques G5, 133 p.

PREMIERS RESULTATS D'UNE ACQUISITION DOUBLE-SYSTEME FD-EMI BASEE SUR L'EMPLOI D'UN APPAREIL MULTI-FREQUENCES : CAS D'ETUDE SUR LE SITE DE BIBRACTE

SIMON F.-X.^{1,2}, SPITALIER B.³, FORES B.^{3,2}, HULIN G.^{3,2}

¹ Inrap, Paris, France, francois-xavier.simon@inrap.fr

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

³ Inrap, Paris, France

RESUME

Les systèmes EMI sont aujourd'hui utilisés en archéologie mais bien moins que les méthodes radar, électrique ou magnétique. La principale raison vient de la plus faible résolution spatiale de ces dispositifs. Si l'empreinte du système est relativement restreinte pour les petits écartements, il est à ce jour peu courant d'utiliser plusieurs systèmes en parallèle au cours d'une même acquisition, ce qui permettrait un gain en résolution spatiale alors comparable à la méthode magnétique. Nous présentons ici les premiers résultats d'une expérimentation consistant en une acquisition reposant sur un double-système GEM-2.

Mots clés : *susceptibilité magnétique, induction électromagnétique, système multi-capteurs, archéologie*

ABSTRACT

EMI systems are used in archaeology nowadays, but much less frequently than GPR, resistivity or magnetic methods. The main difference lies in the lower spatial resolution of these devices. While the footprint of the system is relatively small for small spacings, it is currently difficult to use several systems in parallel during the same acquisition, which would enable a gain in spatial resolution and time that would then be comparable to the magnetic method. We present here the initial results of an experiment involving a dual GEM-2 system.

Key words: *magnetic susceptibility, electromagnetic induction, multi-sensors platform, archaeology*

INTRODUCTION

Les systèmes EMI (ou Slingram) font partie intégrante des outils géophysiques mis en œuvre dans les études de sites archéologiques. L'intérêt de l'utilisation de ces systèmes a été démontré dès les années 70 (Tabbagh, 1986). L'une des caractéristiques les plus intéressantes de ces outils est la mesure conjointe de la susceptibilité magnétique et de la conductivité électrique. La caractérisation de la conductivité électrique permet la reconnaissance des sols, mais bien souvent, c'est la susceptibilité magnétique qui offre le meilleur contraste pour la caractérisation des structures archéologiques. Malgré ces avantages, la méthode EMI à basse fréquence est peu utilisée en archéologie comparativement aux méthodes magnétiques, électriques ou plus récemment radar. Pour cause : dans la plupart des cas, la plus faible amplitude des contrastes cartographiés, la dérive temporelle des instruments, les difficultés associées à l'étalonnage, mais également la résolution spatiale plus faible de ces dispositifs comparés à celles d'autres méthodes. De récents travaux ont cependant montré que la sensibilité spatiale de ces dispositifs était relativement faible (Klose *et al.*, 2018) et qu'une mesure effectuée sur des profils distants de plus de 0,5 m pouvait entraîner un sous-échantillonnage. En parallèle, lorsqu'il s'agit de mesurer les propriétés magnétiques des sols, les récents systèmes fluxgate permettent des mesures avec des profils tous les 50 cm (voire 25 cm), sur des systèmes de mesures multi-sondes. Ces systèmes offrent la possibilité de réaliser des cartes avec une haute résolution spatiale et sur de très grandes surfaces (de l'ordre de plusieurs hectares par jour).



Fig. 1 – Système Mag-EM tracté utilisé par l’Inrap.

Pour satisfaire le besoin d’une caractérisation fine des anomalies magnétiques tout en profitant des informations issues de la cartographie électromagnétique, l’Inrap utilise un système permettant de combiner les mesures magnétiques et électromagnétiques sur un même dispositif tracté (fig. 1). De récents tests ont montré que les mesures EMI n’avait pas d’impact sur la mesure magnétique du fait de l’emploi d’une mesure de type fluxgate. Vice-versa, le système EMI est très peu sensible à la présence des sondes à condition que ces dernières soient immobiles par rapport à l’appareil EMI. Le principal défaut de cette combinaison de systèmes réside dans la différence de résolution offerte par les deux techniques : 50 cm entre les profils pour le système magnétique et 2 m entre les profils pour la méthode électromagnétique. Cela entraîne un sous-échantillonnage des données EMI. Une plateforme associant un système magnétique à plusieurs systèmes EMI permettrait de surmonter cette difficulté. Or, le grand problème des systèmes réside dans leur incapacité à fonctionner simultanément à des fréquences identiques. C’est ce que nous avons essayé de résoudre en contournant ce problème par l’emploi d’un système multi-fréquences.

CHOIX DU SYSTEME ET TEST STATIQUE

Choix de l’appareil multi-fréquences

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons utilisé le GEM-2 de Geophex Ltd. Ce système est un appareil de type Slingram multi-fréquences et mono-écartement. Les bobines sont espacées de 1,66 m et l’appareil contient une « bucking coil » distante de 1,035 m de l’émettrice. Il est possible de sélectionner jusqu’à cinq fréquences de mesure, s’échelonnant entre 300 Hz et 90 kHz. Il est également possible de réaliser des mesures jusqu’à cinq fréquences différentes en même temps, avec une distribution des fréquences suivant une loi logarithmique ou arithmétique, ce qui limite quelque peu le choix. Plusieurs filtres sont disponibles pour atténuer le bruit. Pour cette expérimentation, nous avons utilisé le GEM-2 de l’Inrap et loué un second appareil dans une version plus récente. Les interfaces et modes d’enregistrement, ainsi que les formats de fichiers, ont légèrement évolué entre les deux versions, mais les caractéristiques de base (choix des fréquences, etc.) restent les mêmes sur ces deux versions.

Test statique

Dans un premier temps, nous avons exploré les différentes possibilités offertes par ce double système afin de vérifier si le fonctionnement synchronisé de deux appareils en statique n’entraînait pas un niveau de bruit trop élevé. Les deux systèmes ont donc été posés au sol et nous avons testé plusieurs fréquences de 5 à 90 kHz, ainsi que différentes configurations de fréquences. La distance entre les systèmes a également été examinée afin de déterminer si cette dernière avait un impact significatif sur les phénomènes d’interférences. Sans surprise, lorsque la fréquence choisie est la même sur les deux systèmes, le signal est complètement perturbé, excluant ainsi toute possibilité de réaliser ce type d’expérimentation sur des systèmes mono-fréquence (tels que les systèmes multi-écartements de GF

Instruments, DualEM ou Geonics par exemple). Nous avons ensuite fait varier les fréquences de mesure de l'un des deux systèmes et avons observé que le bruit était rapidement atténué lorsque les fréquences étaient différentes. Pour une différence de 1 kHz, les signaux étaient quasiment stables, sans perturbation apparente. Le seul bémol réside dans le fait que, si la fréquence de l'un des systèmes se trouve dans une harmonique de la fréquence de l'autre, cela perturbe significativement le signal. Dans le cas d'une acquisition en mode multi-fréquences, nous avons observé une perturbation assez forte. Dès que la fréquence de mesure du premier système est comprise dans l'intervalle des fréquences du deuxième système (et ce quelles que soient les fréquences choisies), un bruit assez important apparaît sur le signal.

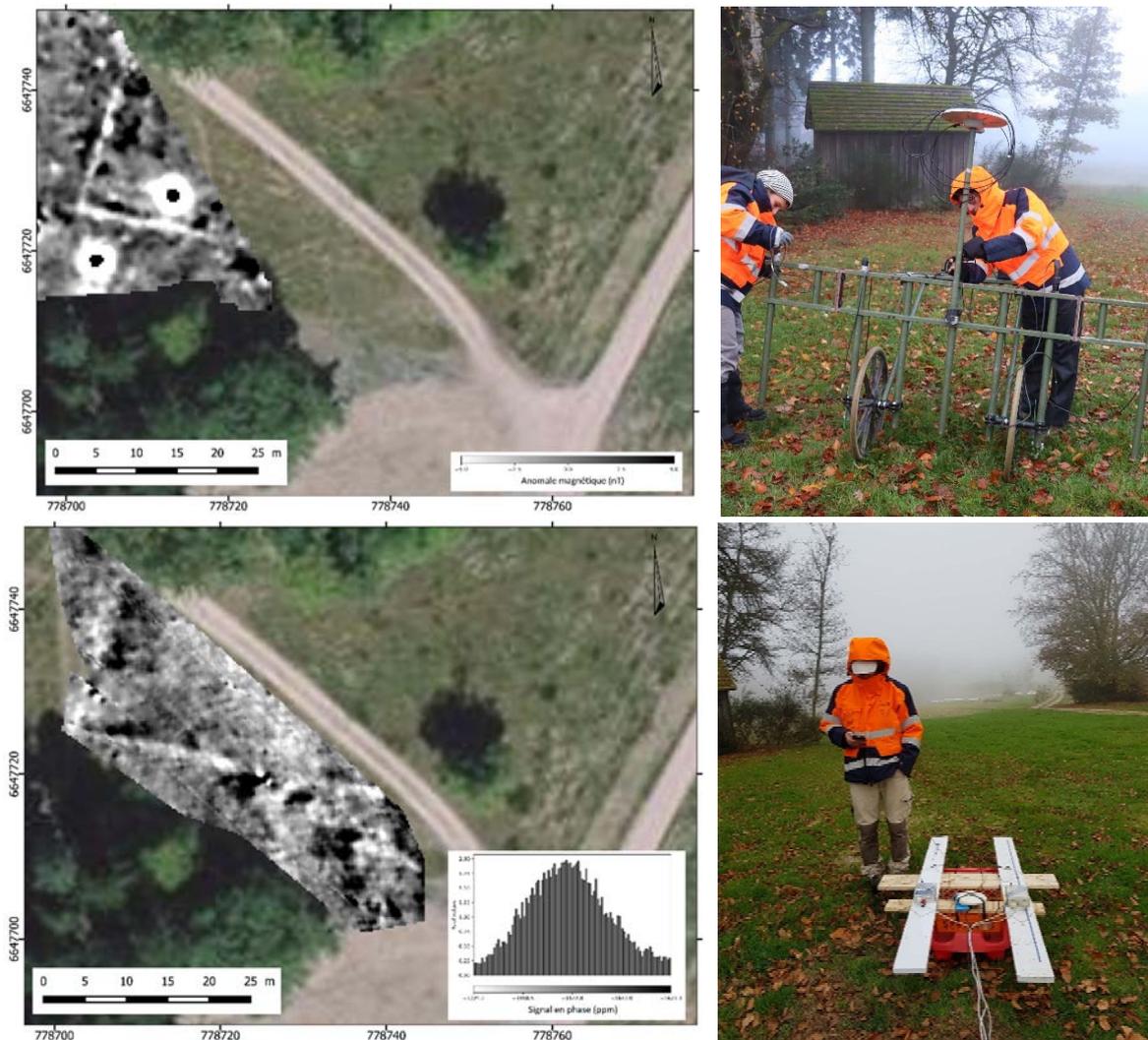


Fig. 2 – Carte des anomalies magnétiques (en haut) et carte du signal en phase (en bas) obtenues par l'emploi d'une plateforme à deux systèmes FD-EMI à deux fréquences différentes.

TEST SUR LE SITE ARCHEOLOGIQUE DE BIBRACTE

Bibracte, situé en Bourgogne sur le massif du Morvan, a été choisi comme site test. Il s'agit de l'un des plus vastes oppida connus dans l'aire culturelle celtique. Ce site a fait l'objet de nombreuses prospections au cours des vingt dernières années notamment avec la méthode magnétique et la méthode radar (Golanova *et al.*, 2023). Une précédente acquisition magnétique réalisée par la cellule géophysique de l'Inrap nous a permis de choisir un secteur avec des contrastes d'aimantation positifs et inversés de l'ordre de quelques nT. La conductivité du terrain est ici très faible. Les deux systèmes ont été fixés sur un support léger constitué d'une luge et d'un support en bois sans composant magnétique (fig. 2). Celui-ci a été tiré manuellement et associé à un système de positionnement de

type GNSS RTK avec une correction centimétrique en temps réel du signal (réseau Teria). Les deux systèmes étaient connectés à la même antenne GNSS située au centre du dispositif. L'écartement entre les deux GEM-2 était de 50 cm afin de tester la possibilité d'une acquisition avec une haute résolution (comparativement aux caractéristiques géométriques du dispositif).

Les cartes obtenues (Fig. 2) montrent un signal en phase plutôt stable, permettant une bonne comparaison avec les mesures de la différence de la composante verticale du champ magnétique terrestre (réalisées avec des sondes fluxgate de Sensys). On y observe ainsi une partie d'un bâtiment ainsi que plusieurs anomalies du signal en phase pouvant être associées à des fosses et des structures de chauffe. Avec cet échantillonnage, on constate que la résolution spatiale du système s'approche très fortement de celle de la carte des anomalies du champ magnétique terrestre alors que l'emploi d'un seul système avec un profil tous les mètres ne permet pas de visualiser aussi nettement les anomalies visibles sur la carte magnétique. Étant donné les faibles valeurs de conductivité électrique du terrain, les mesures de ce paramètre ne permettent pas de distinguer d'anomalies significatives ni de conclure sur l'intérêt d'un tel dispositif pour les mesures de conductivité électrique.

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus sont tout à fait encourageants. Une acquisition multi-systèmes basée sur l'emploi de deux GEM-2 combinés est envisageable. Il devient, dès lors, possible de disposer d'une plateforme combinant une acquisition par méthode magnétique avec un système de 2 m de large avec plusieurs systèmes de mesures électromagnétiques (EMI) espacés de 50 cm (ou de 1 m en fonction des problématiques). Néanmoins, ces tests montrent que la capacité à réaliser des mesures multi-fréquences n'est plus envisageable. Alors que de tels systèmes permettent d'appréhender la viscosité magnétique et la permittivité diélectrique des sols, l'absence de mesure à plusieurs fréquences rend difficile, voire impossible, leur estimation. Pour obtenir le même rendu et approcher ces paramètres il faudrait donc doubler le temps d'acquisition. Dans le cas d'une plateforme multi-instrumentale comme présentée ici, il faut donc se « contenter » de la mesure de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique. Le gain en termes de résolution spatiale obtenu avec le double système semble néanmoins permettre une amélioration significative pour l'amélioration des cartes de susceptibilité magnétique. Cette approche permettrait une comparaison plus précise, facilitant ainsi l'interprétation conjointe des données magnétiques et électromagnétiques, tout en atténuant la perte de résolution spatiale généralement associée aux systèmes électromagnétiques à basse fréquence.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le centre archéologique européen de Bibracte EPCC et son équipe pour l'accès au site lors des tests instrumentaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GOLANOVA P., MILO P., HAJNALOBA M., 2023** – Oppidum as an urban landscape. A multidisciplinary approach to the study of space organization at Bibracte. *Bibracte-Centre archéologique européen, Collection Bibracte 33*, 464 pp.
- KLOSE T., GUILLEMOTEAU J., SIMON F.-X., TRONICKE J., 2018** – Toward subsurface magnetic permeability imaging with electromagnetic induction sensors: Sensitivity computation and reconstruction of measured data. *Geophysics*, 83, E335-345.
- TABBAGH A., 1986** – Applications and advantages of the Slingram EM method for archaeological prospecting. *Geophysics*, 51(3), 576-584.

CARACTERISATION ET IMAGERIE DE STRUCTURES VOLCANIQUES ENFOUIES AU SEIN D'UNE CARRIERE : UNE APPROCHE MULTI-METHODE

BETTEGA Chloé¹, SEIVE Benjamin²

¹ Géolithe, Crolles, France, chloe.bettega@geolithe.com

² Géolithe, Crolles, France, benjamin.seive@geolithe.com

RESUME

Cette prospection géophysique a pour objectif de caractériser un gisement de matériaux d'origine volcanique situé au droit d'une carrière, avec un focus particulier sur l'évaluation des volumes disponibles des dépôts de scories et de basalte au sein de deux périmètres d'études. Des investigations de tomographie par sismique réfraction ont été réalisées en complément de profils de tomographie électrique existants (données GEOLITHE), de données magnétiques aéroportées (Morin,2019), de données d'électromagnétisme aéroportées à grande échelle (Tissoux et al.,2019) et, enfin, de forages carottés et destructifs. La corrélation de ces données a permis de générer des cartographies matérialisant l'épaisseur et la profondeur des zones d'intérêt.

Mots clés : *Prospection, gisement volcanique, volumes, multiméthodes, cartographie 2D*

ABSTRACT

This geophysical survey aims to characterize a volcanic material deposit located at a quarry, with a particular focus on assessing the available volumes of slag and basalt deposits within two study areas. Refraction seismic tomography investigations were conducted alongside existing electrical tomography profiles (GEOLITHE data), airborne magnetic data (Morin,2019), large-scale airborne electromagnetics data (Tissoux et al.,2019), and core and destructive drilling. The correlation of these data allowed the generation of maps outlining the thickness and depth of the areas of interest.

Mots clés : *Survey, volcanic deposit, volumes, multi-method, 2D mapping*

INTRODUCTION

Dans le contexte de cette étude, l'objectif est de qualifier la géométrie d'un gisement volcanique (basalte, scories) dont la distribution précise n'est pas visible en surface. Dans le cadre de cet article, nous présentons principalement les investigations par sismique de réfraction, bien que d'autres méthodes (comme la tomographie électrique ou l'électromagnétisme) aient également été mises en œuvre et analysées séparément.

La sismique de réfraction, de manière générale, est une méthode fiable pour la caractérisation des massifs rocheux. L'analyse des vitesses et de la propagation des ondes fournit des informations sur l'état de fracturation, d'altération ou encore sur le degré de rippabilité d'un massif rocheux, ce qui permet indirectement de définir la constitution du sol (Magnin et al.,2005 ; Reynolds,1997). Néanmoins, la méthode présente certaines limites, telles que la sensibilité aux bruits ambiants ou le fait d'abstraire les inversions de vitesse verticale, qui sont d'autant plus présentes en milieux volcaniques où il est courant d'observer des alternances de couches de propriétés mécaniques variables et décroissantes en profondeur. L'intérêt principal de cette étude est la corrélation des données sismiques avec les données de tomographie électrique et les sondages intrusifs, ainsi que la comparaison des résultats vis-à-vis des campagnes aéroportées de moindre résolution. L'intégralité des données mises à contribution a permis de cibler des zones d'intérêt et de fournir un modèle géologique le plus abouti possible.

METHODOLOGIE

Acquisition

Le schéma d'acquisition consiste à implanter des géophones (dans notre cas de 4,5 Hz) dans le sol afin de récupérer les signaux réfractés créés en surface à la suite d'un ébranlement (source de 40 kg). Les investigations en sismique de réfraction réalisées dans le cadre de cette étude concernent un linéaire total de 1 440 m. Chaque profil est une unité de 120 m (24 géophones espacés de 5 m) et 9 tirs sismiques sont réalisés par profil, dont 2 offsets à 30 m de chaque extrémité. Pour chaque tir, le signal a été échantillonné toutes les 0,25 ms sur une durée de 1 s. Chaque tir est reproduit plusieurs fois, puis sommé afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. Le matériel utilisé est présenté en **Fig. 1**.



Fig. 1 – Dispositif d’acquisition sismique à gauche (source) et au centre (Smartseis -Geometrics), à droite dispositif électrique (Syscal Pro – IRIS Instruments).

Traitement

Le traitement des données est réalisé avec le logiciel ZondST2D, et consiste en deux étapes :

1. Le pointé manuel des premières arrivées des ondes de compression (onde P) afin de réaliser les coupes dromochroniques de chaque série de tirs, Afin d’améliorer la lecture du signal altéré par le bruit ambiant, des filtres passe-bande, centrés sur la fréquence du signal.
2. Le calcul d’un modèle de vitesse d’onde P à l’aide d’un algorithme d’inversion des temps d’arrivées des ondes P. Cette méthode mathématique converge les mesures vers un modèle de terrain « optimal ».

L’inversion est régie et optimisée par différents paramètres, notamment :

- **le type d’inversion.** On utilise une inversion par moindres carrés utilisant un opérateur de lissage et une minimisation du contraste.
- **Le modèle de vitesse de référence.** Il est possible d’intégrer un modèle initial en couches basé sur l’assignation des vitesses effectuée sur les hodochrones. Cependant, après plusieurs tests, nous avons opté pour l’utilisation de la médiane du modèle à l’itération en cours, car elle semble améliorer le RMS. Cette méthode est en effet mieux adaptée aux modèles de type « gradient », qui reflètent des schémas d’altération typiques des milieux volcaniques. Les RMS finaux, compris entre 3 et 5, attestent de la bonne convergence du modèle de vitesse. La **Fig. 2** permet de comparer les résultats obtenus.
- **Le nombre d’itération** qui est définie une fois que le modèle devient stable afin de limiter les artéfacts de calcul (selon le RMS).
- **Le maillage du modèle.** On définit un maillage plus grossier en profondeur afin de réduire les paramètres d’inversion dans la zone la moins résolue
- **Le facteur de lissage,** qui permet de définir le rapport entre le degré de lissage dans les directions horizontale et verticale.
- **Le type de modèle.** On se base sur le principe de l’élargissement des raies d’onde en profondeur.

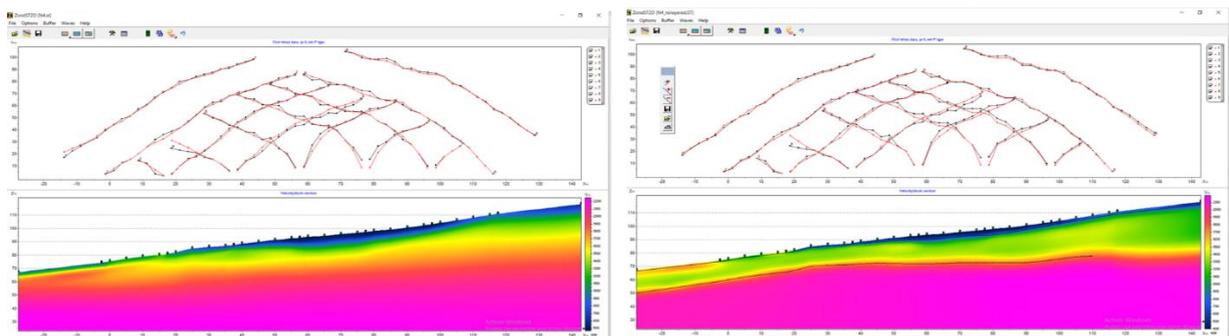


Fig. 2 – Résultats d’inversion pour un même profil (à gauche modèle de référence basé sur l’inversion, à droite modèle initiale en couche).

Interprétation

L’interprétation des modèles de vitesses consiste à distinguer plusieurs ensembles distincts, établis à partir des connaissances géologiques (sondages, affleurements, etc.), ainsi que des valeurs et de l’aspect géométrique des isovitesse, ou encore à partir des résistivités associées obtenues sur les profils géophysiques. Il faut garder à l’esprit qu’une même gamme de vitesses peut être associée à différentes lithologies, permettant de construire un modèle géologique du terrain. La figure ci-dessous présente un des modèles géophysiques traités puis interprétés en modèle géologique (**Fig. 3**). Cinq ensembles géologiques ont ainsi été déterminés sur l’ensemble du site d’étude selon leurs

caractéristiques de compacité, d'hétérogénéité et de rippabilité (Weaver,1975 ; Singh et al.,1987).

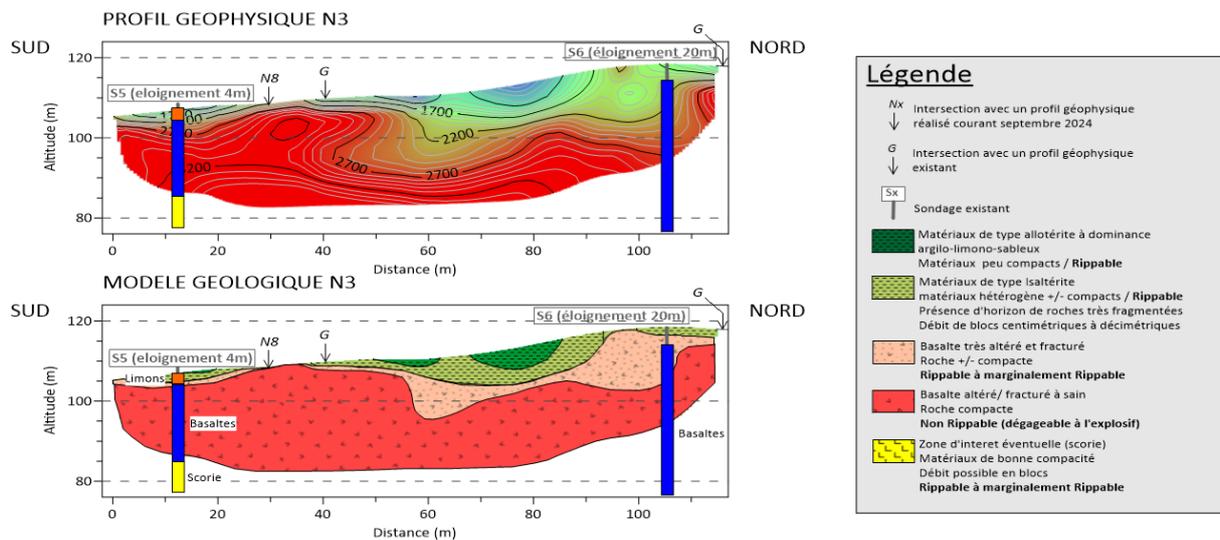


Fig. 3 – Exemple de résultat d'interprétation

Ainsi, nous partons du principe qu'un massif de scories devrait présenter des vitesses sismiques (V_p) relativement élevées, tout en restant globalement inférieures à celles du basalte pour une même profondeur. En effet, le basalte est une roche géologiquement plus dense et compacte. Les scories, quant à elles, sont des roches poreuses, ce qui devrait théoriquement entraîner une diminution des vitesses V_p associées. La coupe sismique présentée (Fig. 3) montre la correspondance entre les intervalles de vitesse élevés (> 1900 m/s) et les niveaux basaltiques reconnus en forage, soulignant la cohérence du modèle.

En termes de résistivités, les résultats restent plus aléatoires et les limites moins tranchées. Sur site, en surface, les scories présentent des résistivités inférieures à celles du basalte (Fig. 4) alors qu'en profondeur on obtient un schéma inverse. Les résultats étant confrontés par forage, il est clair que les valeurs de résistivités sont très fortement affectées et dépendantes de l'état d'altération des massifs.

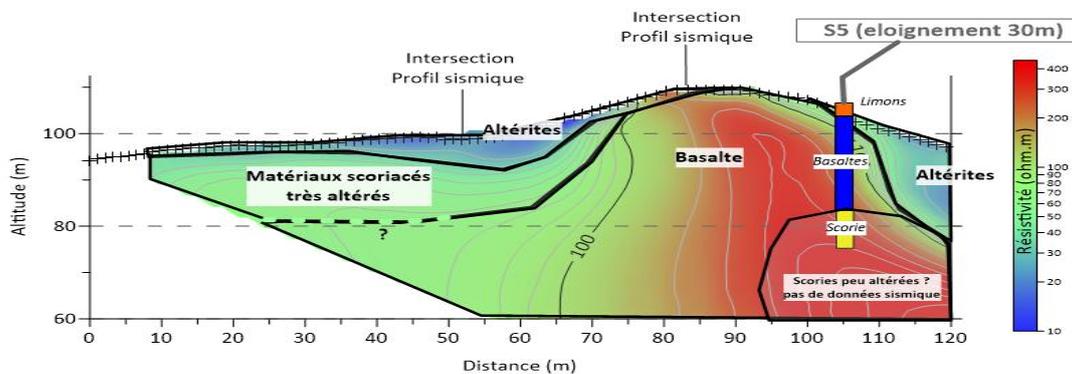


Fig. 4 – Extrait d'un profil de tomographie électrique

Afin de définir des zones potentiellement intéressantes, sur la base des interprétations et de la connaissance du site par le client, nous faisons l'hypothèse qu'un massif de scories exploitable présente des résistivités très variables mais une gamme de vitesses de l'ordre de 1700 à 2300 m/s et que le basalte présente des vitesses exclusivement supérieures à 1900 m/s et des résistivités de l'ordre de 100 à 400 ohm.m.

RESULTATS

L'objectif de l'étude étant d'estimer des volumes de gisements exploitables, des cartographies de profondeur et d'épaisseur ont été générées en digitalisant les limites géologiques interprétées à partir des modèles sur le logiciel Surfer (Golden Software). Les données sont ensuite interpolées par la méthode de maillage « natural neighbor ». Les volumes sont quant à eux estimés à partir d'une commande du logiciel, en soustrayant les profils d'altitudes de

chaque gisement, avec comme limite d'interpolation les polygones parcellaires du site. Un exemple est donné en Fig. 5.

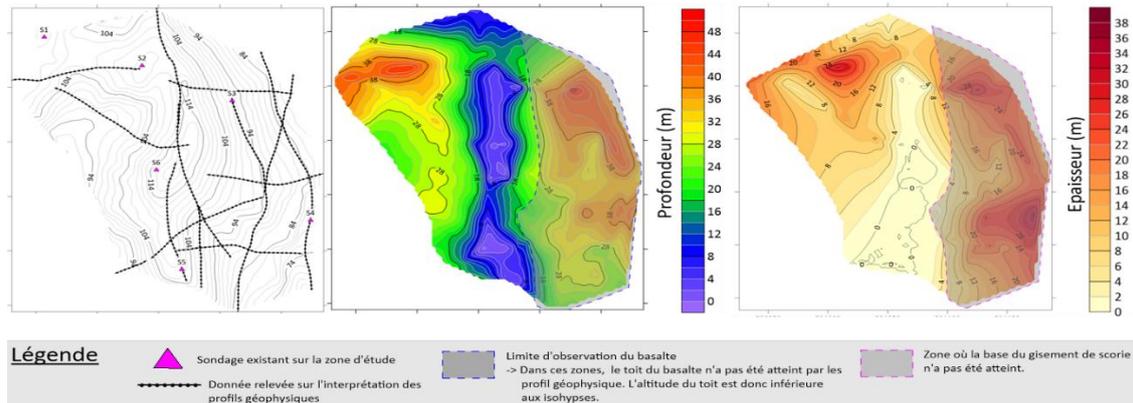
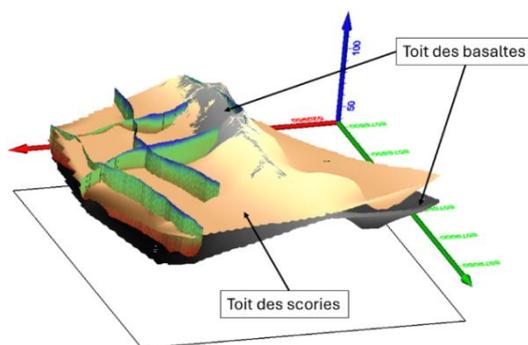


Fig. 5 – Exemple de cartographies de la zone nord. A gauche ensemble des données utilisées, au centre cartographie de la profondeur des basaltes, à droite cartographie de l'épaisseur des scories



Un modèle 3D réalisé sur le logiciel Voxler (Golden software) a également été réalisé (Fig. 6).

Fig. 6 – Modélisation des interfaces géologiques

CONCLUSION

Au regard des résultats, nous avons ciblé les zones de plus fort intérêt et recommandé des sondages intrusifs afin de confronter les hypothèses géophysiques. Au-delà, plusieurs observations ont été faites à partir de cette étude :

- La corrélation des données aéroportées aux données terrestres est globalement compliquée du fait des différences de gamme de résolution. Néanmoins, on retrouve des gammes de résistivités cohérentes.
- Les résultats sismiques montrent une certaine anisotropie du milieu, traduite par une propagation des vitesses en partie dépendante de la direction d'acquisition. Cette spécificité est démontrée par des vitesses globalement plus faibles sur les profils orientés Est-Ouest. Dans le cas d'une excavation du site, il semble plus avantageux de décaisser selon cette orientation.
- On observe globalement une profondeur d'investigation réduite au niveau des massifs de basalte (sur les profils sismiques). Sur le profil N3, la base du modèle est d'ailleurs marquée par le toit d'une couche profonde de scories qui se localise en dessous de l'horizon basaltique (vérifié par sondage carotté).
- Très bonne complémentarité entre la méthode électrique et la méthode sismique : la sismique ne nous permet pas de dissocier les gammes de matériaux scoriacés, contrairement à la tomographie électrique. Néanmoins, la tomographie sismique est plus précise en termes de différenciation des limites géologiques majeures (hors inversion de vitesse).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **MAGNIN O., BERTRAND Y.**, 2005 – Cahiers de l'AGAP, guide de sismique réfraction. LCPC, Paris, p.3-91.
- **MORIN M.**, 2019 – Rapport d'intervention, géophysique aéroportée. RP.50-03062019, juin, p.1-14. (Rapport d'intervention)
- **REYNOLDS J.M.**, 1997 – An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley, UK, p.1-796.
- **SINGH R. N., DENBY B., EGRETI I.**, 1987. Development of new rippability index for coal measures excavations, Proc. 28 th US Symp. on Rock Mech., Tuscon, p 935-943.
- **TISSOUX H., RENINGER P.A., SERRAND A.S., SERNIQUET H., DECTOT G.**, 2019 – Recherche de nouveaux gisements pour la production de granulat à Mayotte. BRGM/RP-68743-FR, mars, p.1-61. (Rapport BRGM)
- **WEAVER J.M.**, 1975, Geological factors significant in the assessment of rippability, Civil Eng. in South Africa, Vol : 17, p.131-136

IMPACT DES BIOCHARS SUR LES FONCTIONS DU SOL : APPROCHE GÉOPHYSIQUE

LADEN A. ¹, THIESSON J. ¹, PASQUET S. ^{1,2}, GUERIN R. ¹, BODET L. ¹, JOUGNOT D. ¹, PERONNE L. ¹, AUBRY E. ¹, QUENEA K. ¹, DUQUENOY G. ³, DELARUE F. ¹

¹ UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris, alicia.laden@sorbonne-universite.fr

² UAR 3455 OSU ECCE TERRA, CNRS, Sorbonne Université, Paris

³ Île-de-France Nature, Saint Ouen

RESUME

Le biochar, produit de la pyrolyse de biomasse végétale, est incorporé dans les sols pour stocker du carbone et favoriser la rétention en eau. À ce jour, son impact sur ces fonctions sur des sols urbains en milieu tempéré n'est pas documenté. Dans ce cadre, nos travaux visent à caractériser l'impact des modifications physico-chimiques du biochar sur les propriétés hydriques d'un technosol situé en Île-de-France par polarisation provoquée spectrale (PPS) et sismique active.

Mots clés : biochar, carbone, technosol, PPS, sismique, rétention en eau

ABSTRACT

By-product of the pyrolysis of organic biomass, biochar is incorporated in soils to store carbon while promoting water retention. Today, its impact on these functions of urban soils in temperate climate has not been documented. Our work therefore aims to characterize the effect of the physico-chemical modifications of biochar on the hydric properties of a technosol located in the Île-de-France region by spectral induced polarization (SIP) and active seismic.

Keywords : biochar, carbon, technosol, SIP, seismic, water retention

INTRODUCTION

À l'horizon 2050, des températures pouvant atteindre 50°C sont attendues à Paris en période estivale (Viguié *et al.*, 2020), conséquences de l'interaction entre le phénomène d'îlot de chaleur et le changement climatique. De telles températures pourraient modifier les propriétés hydriques des sols et ainsi, menacer de nombreux espaces verts. Le développement de ces espaces constitue une des stratégies de lutte contre le changement climatique en milieu urbain. L'incorporation de biochar dans les sols émerge en tant que solution pour limiter l'impact du changement climatique sur ces espaces verts présents en ville.

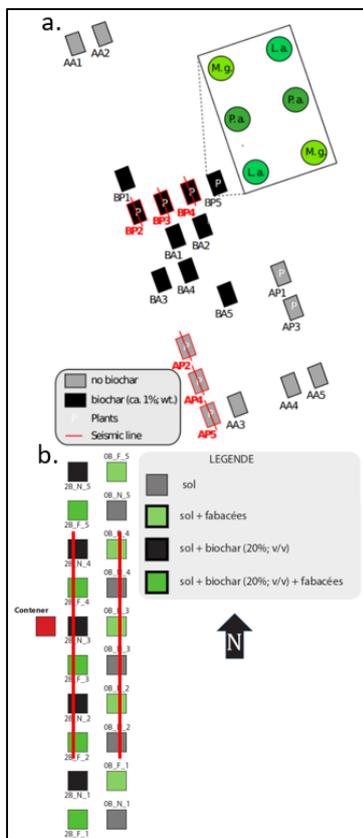
Le biochar (bio-charbon) est le résidu de la pyrolyse de matière organique végétale. D'un point de vue chimique, il est constitué de cycles aromatiques (Tsolis et Barouchas, 2023) lui octroyant une stabilité biogéochimique à l'échelle du siècle voir du millénaire. Cette stabilité lui a permis d'être identifié comme un puits de carbone potentiel pour atténuer les émissions actuelles de CO₂ (Shukla *et al.*, 2022). En outre, le biochar peut présenter une surface spécifique et une porosité élevée (Srinivasan et Sarmah, 2015), facilitant la rétention de l'eau et des nutriments via la modification de la structure du sol et/ou de la capacité intrinsèque de rétention du biochar (Acharya *et al.*, 2024 ; Wang *et al.*, 2019). Il favoriserait alors la croissance des plantes (Agegnehu *et al.*, 2016; Hossain *et al.*, 2010) et pourrait donc être un atout pour améliorer les propriétés hydriques des sols en milieu urbain. Cependant, si ses effets sur les sols ont été documentés en milieu tropical dans le cadre de pratiques agricoles ancestrales (« terra preta ») ou actuelles, son impact sur les sols en milieu urbain sous climat tempéré ne l'est pas. D'autre part, il est à noter que la persistance de l'effet des biochars sur la rétention en eau des sols amendés n'est pas décrite quand bien même celle-ci est susceptible d'être modifiée par le vieillissement physico-chimique des biochars (fragmentation et oxydation, Wang *et al.*, 2019).

L'objectif de ces travaux est de documenter l'évolution physico-chimique des biochars et son impact sur les propriétés hydriques d'un technosol (sol avec forte influence humaine contenant des quantités importantes d'artefacts) situé à Limeil-Brévannes (94). Des mesures ponctuelles ne prendraient en

compte que de faibles volumes de sol non représentatifs du technosol hétérogène. La géophysique est donc utilisée pour étudier les propriétés du technosol à l'échelle de placettes. Les méthodes employées sont la polarisation provoquée spectrale (PPS) et la sismique active. Pour assurer le suivi des placettes, les mesures sont faites à l'identique tous les mois sur 10 placettes avec et sans biochar faites de la même manière.

La PPS est utilisée pour suivre le devenir quantitatif et physico-chimique des biochars (migration, fragmentation et oxydation) *via* l'observation des spectres de résistivité électrique ρ ($\Omega.m$) et de phase φ (mrad) à fréquences multiples (Gao *et al.*, 2019; Delarue *et al.*, en révision). La sismique active est par ailleurs proposée pour le suivi des propriétés mécaniques et hydriques des sols notamment à travers la vitesse des ondes de cisaillement (V_s en m/s), sensible à la teneur en eau du milieu traversé (Dangeard *et al.*, 2021; Solazzi *et al.*, 2021). Dans ce travail, la vitesse des ondes de surface (en particulier des ondes de Rayleigh, V_r) est choisie comme proxy de V_s (Viktorov, 1967) associé au couple porosité/ teneur en eau.

1. LE SITE EXPÉRIMENTAL



Le site expérimental est un espace vert de la région Île-de-France riche en métaux lourds (cadmium, cuivre, plomb et zinc). Il est composé de deux zones d'études faisant l'objet de deux projets (Fig. 1). Le premier projet, Limeil 1 (Fig. 1a), a vu le jour en 2021 avec 20 placettes de 2 m x 3 m x 30 cm de profondeur. Du biochar d'épicéa avec une résistivité électrique supérieure à celle du sol a été incorporé à 1 % massique dans 10 de ces placettes.

Le projet Limeil 2 a démarré en octobre 2024 dans le cadre du projet ANR OPTISOIL. Cette partie du site est composée de 20 placettes de 2 m x 2 m x 1 m de profondeur (Fig. 1b). Sur 10 de ces placettes, du biochar issu de la pyrolyse de bois de hêtre (410 mS/m pour un taux d'humidité de 65.9 %) a été incorporé à environ 2 % massique. Sur 10 placettes (5 avec et 5 sans biochar), des fabacées ont été plantées au centre.

Fig. 1 - (a) Plan du projet Limeil 1 (b) Plan du projet Limeil 2.

2. MISES EN ŒUVRE DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Afin de caractériser l'évolution physico-chimique des biochars, des mesures PPS sont réalisées depuis décembre 2024 sur le site de Limeil 2. Nous avons utilisé un SIP Fuchs III (Radic Research) avec un émetteur de puissance 50 W permettant d'améliorer le rapport signal sur bruit. Le dispositif est composé de 3 dipôles : 1 dipôle d'injection au centre avec un espacement de 30 cm entre les électrodes, et 2 dipôles de mesure avec des

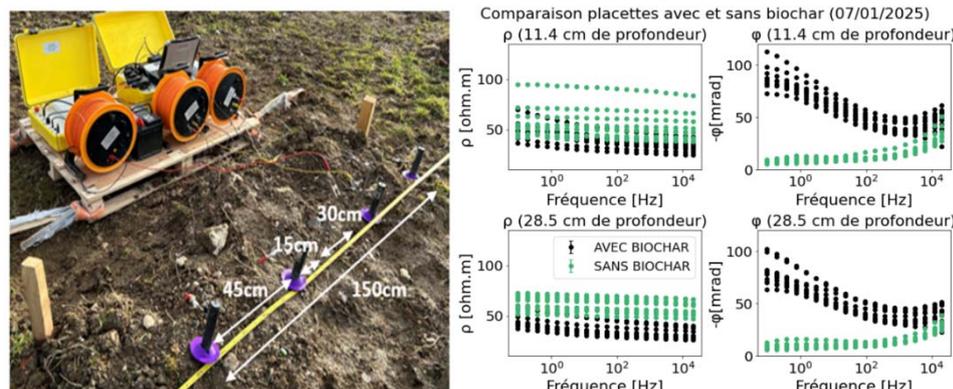


Fig. 2 - Photo de la mise en œuvre de la méthode PPS sur le site de Limeil 2 ainsi que les résultats obtenus lors de la campagne du 07/01/2025

électrodes de potentiel impolarisables espacées de 60 cm et 150 cm (Fig. 2). Les dipôles de mesure permettent d'étudier les propriétés du sol à deux profondeurs : ~11 cm et ~28 cm (Barker, 1989).

Par ailleurs, les mesures sismiques ont été réalisées sur les 10 placettes avec plantes de Limeil 1, 5 avec biochar, 5 sans biochar. Les profils sont composés de 24 géophones espacés de 20 cm. 25 tirs sismiques ont été réalisés entre chaque géophones et aux extrémités des profils à l'aide d'une masse de 2.5 kg. L'approche proposée par Pasquet et Bodet (2017) est ici choisie pour extraire une courbe de dispersion (évolution de V_r avec la fréquence des ondes de Rayleigh) comme « signature sismique » observée à l'aplomb d'une fenêtre de 11 géophones (équivalente à 2 m) centrée sur chaque placette. À Limeil 2, un dispositif similaire est reproduit : comprenant 2 profils composés de 121 géophones espacés de 20 cm traversant chacun 6 placettes (6 avec et 6 sans biochar, Fig. 1b).

3. RÉSULTATS

En janvier 2025, la moyenne des résistivités des placettes avec biochar mesurée en PPS (Fig. 2) à 93.75 Hz pour une profondeur d'investigation de ~28 cm est de 35.22 (\pm 5.91) Ω .m et sans biochar de 60.52 (\pm 7.21) Ω .m. À même fréquence et même profondeur, la moyenne de phase pour les placettes avec biochar est de 42.73 (\pm 6.50) mrad et de 10.95 (\pm 1.46) mrad pour celles sans biochar.

Les mesures sismiques faites à Limeil 1 (Fig. 3) montrent qu'avec biochar, V_r est plus faible pour des fréquences supérieures à 50 Hz (plus la fréquence est élevée plus la mesure reflète l'état du milieu en proche surface). Cette observation se fait lors de toutes les campagnes de mesure sauf en juin 2023 où les deux types de placettes ont des vitesses similaires. Les données acquises à Limeil 2 seront traitées prochainement.

4. DISCUSSION

Les formes des courbes en phase permettent de distinguer la présence de biochar dans les sols à l'instar de Gao *et al.*, (2019) et Delarue *et al.*, (en révision). Ces mêmes travaux suggèrent que la teneur en eau et le vieillissement (oxydation et fragmentation) des biochars sont susceptibles de modifier les spectres PPS initialement obtenus. Ainsi, le suivi mensuel PPS offrira, à terme, la possibilité de documenter l'évolution physico-chimique des biochars à condition de dissocier l'effet de la saturation en eau et des propriétés chimiques des biochars sur les spectres PPS.

À Limeil 1, V_r diminue lors de toutes les campagnes de mesure sauf sous le temps sec de juin 2023 (Fig. 3). La baisse de V_r en présence de biochar peut être due à une augmentation de la teneur en eau ou de la porosité du milieu (Dangeard *et al.*, 2021; Solazzi *et al.*, 2021). Ces changements seraient cohérents avec l'impact du biochar sur les propriétés hydriques des sols (Wang *et al.*, 2019). La teneur en eau du sol lors de la prise des mesures étant variable (Fig. 3b), la baisse de V_r en présence de biochar serait alors liée à une variation de celle-ci plutôt qu'à une variation de porosité. Le biochar aurait un

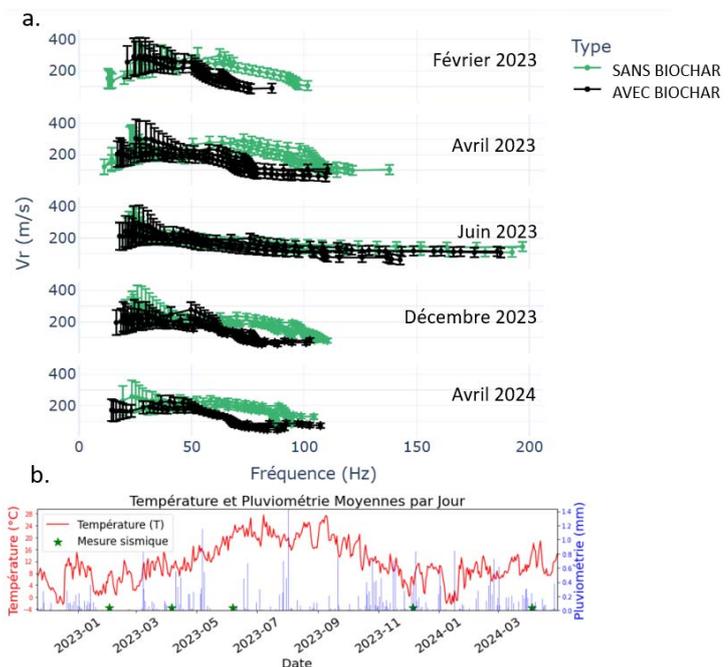


Fig. 3 - (a) Résultats du pointé des images de dispersion des données obtenues à Limeil 1 (b) Données météorologiques provenant de la station d'Orly (94)

effet saisonnier sur la rétention en eau du sol. Sous temps sec, lorsque les plantes ont besoin d'une réserve d'eau accessible, les résultats de sismique active ne soulignent pas un éventuel effet positif des biochars sur les teneurs en eau du sol.

CONCLUSIONS

Les résultats de PPS permettent de distinguer la présence de biochar. À ce stade, les spectres PPS n'ont pas encore été affectés par les modifications physico-chimiques du biochar (fragmentation et oxydation) associées à son « vieillissement ». La sismique active suggère une augmentation de la teneur en eau du sol grâce au biochar. Toutefois, afin d'évaluer la saisonnalité de l'effet des biochars sur la teneur en eau du sol, des mesures sismiques additionnelles sous temps sec sont nécessaires. En complément de ces travaux associés aux modifications physico-chimiques des biochars et aux propriétés hydriques des sols, la tomographie de résistivité électrique sera appliquée aux sols pour évaluer l'impact des biochars sur la croissance/santé des plantes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR OPTISOIL (ANR-23 CE22 0013) pour le support financier de ces travaux. Ils remercient également Île-de-France Nature et la société Eurovert pour respectivement la mise à disposition et l'entretien du site d'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acharya B.S., Dodla S., Wang J.J., Pavuluri K., Darapuneni M., Dattamudi S., Maharjan B., Kharel G., 2024. Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. *Biochar*, 6, 34.
- Agegehu G., Bass A.M., Nelson P.N., Bird M.I., 2016. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment* 543, 295–306.
- Barker R.D., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54 (8), 1031-1037.
- Dangeard, M., Rivière, A., Bodet, L., Schneider, S., Guérin, R., Jougnot, D. and Maineult, A., 2021. River corridor model constrained by time-lapse seismic acquisition. *Water Resources Research*, 57(10), p.e2020WR028911.
- Delarue F., Mendieta A., Maineult A., Abiven S., Luo H., Vásconez-Maza M., Finco C., Jougnot D., Thiesson J., en révision. Toward characterization of aromatic rich organic matter by spectral-induced polarization: preliminary investigation and perspectives. *Soumis dans Geophysical Journal International*.
- 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, 180213.
- Hossain M.K., Strezov V., Yin Chan K., Nelson P.F., 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 78, 1167-1171.
- Pasquet S., Bodet L., 2017. SWIP: An integrated workflow for surface-wave dispersion inversion and profiling. *Geophysics* 82, WB47–WB61.
- Shukla P.R., Skea J., Slade R., Fradera R., Pathak M., Khourdajie A.A., Belkacemi M., Van Diemen R., Hasija A., Lisboa G., Luz S., Malley J., McCollum D., Some S., Vyas P., 2022. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Mitigation of climate change*, Chapitre 7, 747-860.
- Solazzi S., 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, e2021JB022074.
- Srinivasan P., Sarmah A.K., 2015. Characterisation of agricultural waste-derived biochars and their sorption potential for sulfamethoxazole in pasture soil: A spectroscopic investigation. *Science of the Total Environment* 502, 471–480.
- Tsolis V., Barouchas P., 2023. Biochar as soil amendment: The effect of biochar on soil properties using VIS-NIR diffuse reflectance spectroscopy, biochar aging and soil microbiology—A Review. *Land* 12, 1580.
- Viguié V., Lemonsu A., Hallegatte S., Beaulant A., Marchadier C., Masson V., Pigeon G., Salagnac J., 2020. Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environmental Research Letters*, 15(7), 075006.
- Viktorov I.A., 1967. Rayleigh and Lamb waves. *Springer New York, NY*.154p.
- Wang D., Li C., Parikh S.J., Scow K.M., 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. *Geoderma* 340, 185–19.

DEVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE ENSEMBLISTE POUR CONVERTIR LES DONNEES DE TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE EN TENEUR EN EAU

LOISEAU B.¹, CARRIERE S.D.^{1,2}, MARTIN-STPAUL N.K.³, CLEMENT R.⁴, CHAMPOLLION C.⁵, MERCIER V.⁶, THIESSON J.², PASQUET S.^{2,7}, DOUSSAN C.⁶, HERMANS T.⁸, JOUGNOT D.²

¹ HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IMT, IRD, Montpellier, France (bertille.loiseau@ird.fr)

² UMR METIS, Sorbonne Université, UPMC, CNRS, EPHE, 75005 Paris, France.

³ URFM, INRAE, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84000 Avignon, France.

⁴ REVERSAAL Research Unit, INRAE, Villeurbanne, 69626, France.

⁵ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

⁶ INRAE - Avignon Université, UMR EMMAH, 84914, Avignon, France.

⁷ UAR 3455 OSU ECCE TERRA, CNRS, Sorbonne Université, Paris, France.

⁸ Department of Geology, Ghent University, 9000 Gent, Belgium.

RESUME

La teneur en eau du sol, une propriété essentielle mais difficile à estimer, est de plus en plus étudiée à l'aide de la tomographie de résistivité électrique (ERT). Cependant, la conversion de la résistivité en teneur en eau reste complexe. Nous avons développé la méthode Ensemble Approach ERT (EA-ERT) pour construire un modèle d'ensemble de la résistivité électrique du sous-sol calibré sur des données in situ et le convertir en une distribution spatiale de la teneur en eau. Cette méthode permet de contourner le problème du choix des paramètres de l'inversion, de fournir une estimation de l'incertitude du modèle final et de convertir les données en teneur en eau. La méthode est simple et robuste et pourrait être automatisée pour la rendre accessible.

Mots clés : hydrogéophysique, tomographie de résistivité électrique, teneur en eau du sol, approche d'ensemble

ABSTRACT

Soil water content, an essential but difficult-to-estimate property, is increasingly studied using Electrical Resistivity Tomography (ERT). However, converting the resistivity into water content remains complex. We have developed the Ensemble Approach ERT (EA-ERT) method to build an ensemble model of subsurface electrical resistivity calibrated on in situ data and convert it into a water content spatial distribution. This method bypasses the issue of inversion parameterization, provides an estimate of the uncertainty of the final model and converts the data into water content. The method is simple and robust, and could be automated to make it accessible.

Key words: hydrogeophysics, electrical resistivity tomography, soil water content, ensemble approach

INTRODUCTION

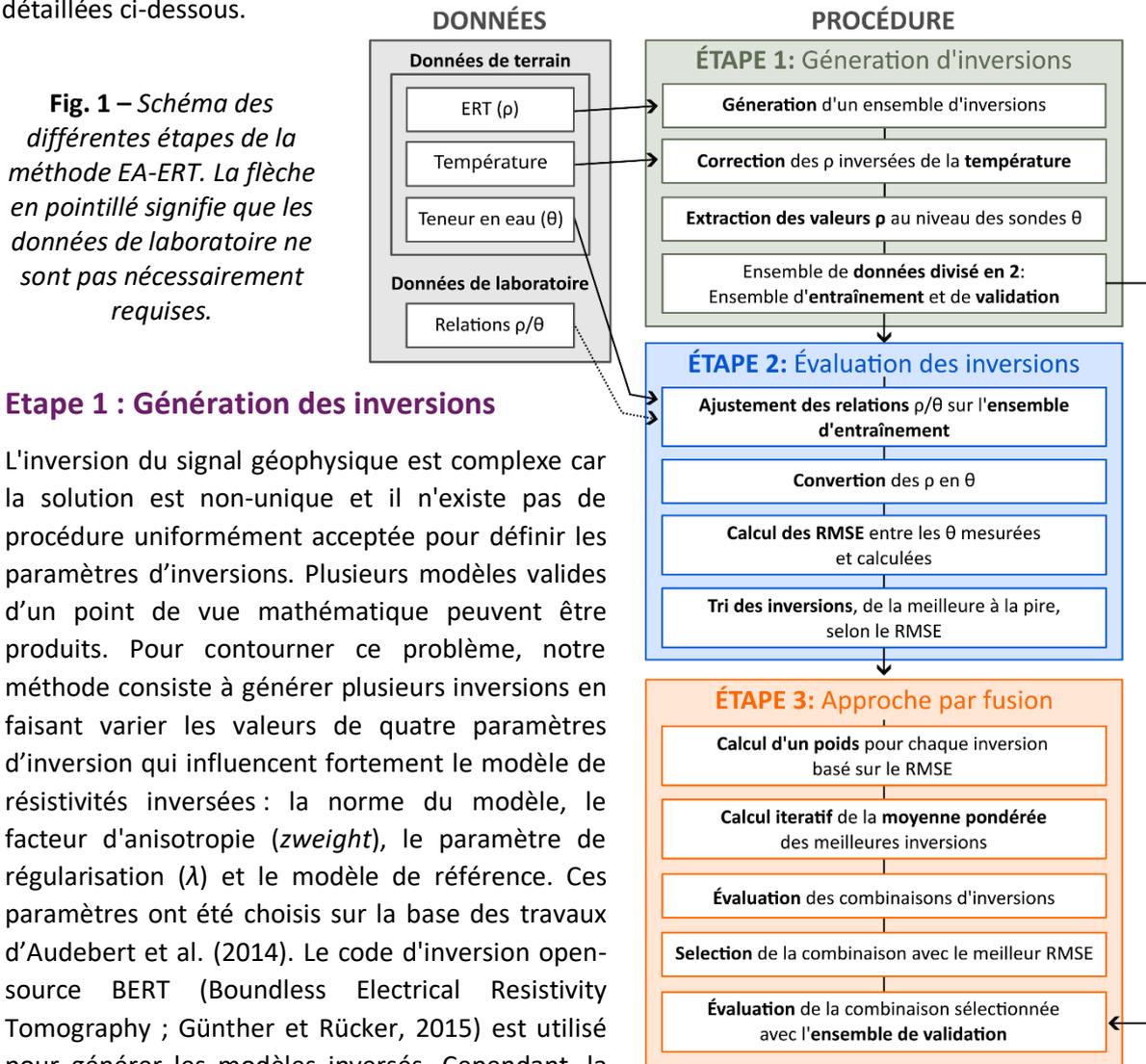
La tomographie de résistivité électrique (ERT) est de plus en plus utilisée pour étudier les processus hydrologiques souterrains. Ses domaines d'application se sont élargis (e.g., agronomie, écologie) et son utilisation s'est étendue aux non-spécialistes qui cherchent à obtenir des estimations spatialisées de la teneur en eau à différentes résolutions. Cependant, la conversion du signal de résistivité en teneur en eau est complexe car les relations ne sont pas linéaires et dépendent des conditions locales du sol. Cette situation encourage le développement d'approches permettant d'augmenter la robustesse des estimations tout en facilitant l'évaluation des incertitudes.

Nous proposons une nouvelle méthode appelée *Ensemble Approach ERT* (EA-ERT) pour traiter et convertir les données d'ERT en une distribution spatiale quantitative de la teneur en eau du sous-sol. L'objectif est de proposer une méthode simple et robuste pour construire un modèle de résistivité électrique basée sur l'analyse et la combinaison de plusieurs inversions, calibré sur des données *in situ*,

qui pourrait être automatisée et accessible aux utilisateurs de l'ERT, même sans expertise en géophysique. Nous présentons dans un premier temps les différentes étapes de la méthode (Fig. 1) puis dans un second temps son application sur l'observatoire du Larzac.

EA-ERT : UNE NOUVELLE METHODE POUR TRAITER LES DONNEES D'ERT

La méthode EA-ERT nécessite à minima des données temporelles d'ERT et de teneur en eau du sol issues de sondes d'humidité à différentes positions et profondeurs. Elle se divise en trois étapes (Fig. 1) détaillées ci-dessous.



Étape 1 : Génération des inversions

L'inversion du signal géophysique est complexe car la solution est non-unique et il n'existe pas de procédure uniformément acceptée pour définir les paramètres d'inversions. Plusieurs modèles valides d'un point de vue mathématique peuvent être produits. Pour contourner ce problème, notre méthode consiste à générer plusieurs inversions en faisant varier les valeurs de quatre paramètres d'inversion qui influencent fortement le modèle de résistivités inversées : la norme du modèle, le facteur d'anisotropie (*zweight*), le paramètre de régularisation (λ) et le modèle de référence. Ces paramètres ont été choisis sur la base des travaux d'Audebert et al. (2014). Le code d'inversion open-source BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography ; Günther et Rücker, 2015) est utilisé pour générer les modèles inversés. Cependant, la méthodologie pourrait facilement être adaptée à d'autres logiciels. Les valeurs de résistivité électrique inversées et corrigées de l'effet de la température, selon le modèle de Campbell et al. (1948), sont ensuite extraites du profil ERT aux emplacements des sondes d'humidité pour chaque pas de temps et chaque inversion.

Étape 2 : Evaluation des inversions

La méthode consiste dans une deuxième étape à intégrer les mesures directes de teneur en eau pour évaluer la capacité de chacune des inversions à expliquer les données *in situ*. Des relations pétrophysiques sont ajustées entre la résistivité électrique mesurée avec l'ERT et la teneur en eau mesurée avec les capteurs ponctuels. Une relation pétrophysique par horizon de sol est ajustée pour chaque modèle inversé en utilisant le modèle de Waxman et Smits (1968). Des mesures en laboratoire

sur échantillons peuvent aider à ajuster les relations ou compléter les horizons sans mesures directes. Les valeurs de résistivité électrique inversées extraites du profil ERT sont converties en teneur en eau et comparées aux valeurs de teneur en eau mesurées avec les sondes. Le RMSE (*Root Mean Square Error*) est utilisé comme indicateur pour évaluer la différence entre ces valeurs pour chaque inversion. Les inversions sont classées de la meilleure, c'est-à-dire celle dont le RMSE est la plus faible, à la plus mauvaise.

Etape 3 : Approche d'ensemble

L'objectif de la troisième étape est d'obtenir un modèle d'ensemble géoélectrique qui explique au mieux les données de teneur en eau issues des sondes d'humidité. Pour cela, les modèles de résistivités sont moyennés selon le tri effectué afin d'obtenir une combinaison de modèles plus performante que les modèles seuls. Les deux meilleurs modèles inversés selon le RMSE sont d'abord moyennés, puis les modèles suivants sont ajoutés de manière itérative, un par un, jusqu'à ce que la moyenne de tous les modèles soit calculée. Chaque modèle d'ensemble est évalué de la même façon que les inversions individuelles dans l'étape 2. Le modèle d'ensemble présentant le RMSE le plus faible est sélectionné. Il correspond à la meilleure adéquation avec les données de terrain parmi tous les modèles considérés. La sélection d'un modèle d'ensemble basé sur plusieurs modèles inversés permet d'évaluer l'incertitude en calculant la dispersion entre les différents modèles moyennés.

EA-ERT : APPLICATION SUR LE TERRAIN

Site d'application et instruments utilisés

La méthode EA-ERT a été appliquée sur l'observatoire du Larzac (OREME, SNO H+ OZCAR). Sur ce site, 13 mesures d'ERT ont été répétées le long d'un profil de 71.25 m d'avril 2022 à septembre 2023. Les mesures d'ERT ont été acquises à l'aide d'un Syscal Pro Switch 48 accompagné d'un Switch Pro (IRIS Instruments), avec 96 électrodes espacées de 75 cm et laissées en place au fil du temps. Un dispositif Wenner-Schlumberger a été utilisé pour être sensible aux structures horizontales. Les mesures ont été acquises à chaque fois en mode normal et en mode réciproque pour évaluer leur qualité.

Le profil d'ERT est installé à cheval entre une prairie et un peuplement de pins noirs sur un sol dolomitique hétérogène en domaine karstique. Des capteurs pour mesurer la température et la teneur en eau du sol (Campbell CS650) ont été installés dans chacune des deux zones à 20, 30, 40, 50 et 70 cm de profondeur. Ils mesurent la permittivité diélectrique puis la teneur en eau est calculée avec l'équation de Topp et al. (1980). Les données ne sont pas corrigées de l'effet de la température. Des échantillons de sol de chaque fosse où les capteurs ont été installés, ainsi qu'un échantillon de dolomie, ont été prélevés et soumis à des mesures de résistivité électrique à différentes saturations, comme dans l'étude de Doussan et Ruy (2009).

Résultats

Les résultats de l'application de la méthode EA-ERT sur le jeu de données provenant du site du Larzac montrent son efficacité et sa robustesse. Un modèle d'ensemble de la distribution de la résistivité électrique du sous-sol a pu être sélectionné et converti en teneur en eau. Une corrélation satisfaisante a été obtenue entre les teneurs en eau calculées avec l'ERT et celles mesurées avec les capteurs ponctuels, avec un coefficient de corrélations élevées de 0.94 et un RMSE relativement faible de 2.26 % vol. Une cohérence satisfaisante entre les valeurs mesurées et calculées peut être observée sur les profils 1D de teneur en eau présentés sur la Fig. 2. L'approche d'ensemble a permis d'identifier des zones moins fiables dans le modèle d'ensemble grâce à l'analyse de la dispersion entre les modèles moyennés. Le coefficient de variation a été calculé pour avoir une estimation de l'incertitude du

modèle d'ensemble, complétant l'évaluation classique du modèle avec des indicateurs fournis par le code d'inversion (e.g., la matrice de résolution ou de sensibilité).

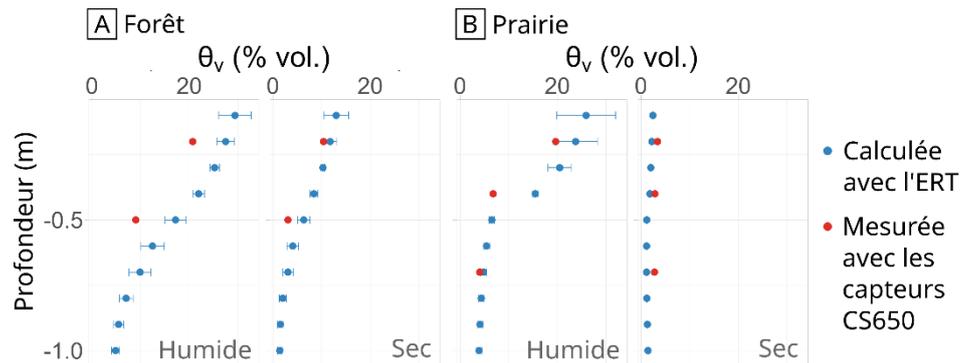


Fig. 2 – Profils 1D de la teneur en eau calculée avec l'ERT (en bleu) et de celle mesurée (en rouge) à une date humide (05/2022) et une date sèche (07/2022) A) sous la forêt et B) sous la prairie.

CONCLUSIONS

La méthode EA-ERT est une méthode simple et robuste qui permet de convertir les données temporelles d'ERT en données de teneur en eau du sous-sol. La méthode propose d'intégrer des mesures directes de la teneur en eau pour déterminer un modèle de résistivité cohérent avec les données de terrain. Elle permet i) de contourner le problème du choix des paramètres d'inversion en évaluant la fiabilité d'un grand nombre de modèles d'inversion par rapport à la teneur en eau *in situ*, ii) d'évaluer la variabilité du modèle d'ensemble final en calculant la dispersion entre les modèles d'inversion combinés, et iii) de convertir les sections de résistivité électrique en teneur en eau.

La méthode EA-ERT est novatrice par rapport au traitement et à l'analyse conventionnels des données ERT. L'automatisation de cette méthode permettrait de la rendre accessible à l'ensemble des utilisateurs de l'ERT. Elle est ici appliquée pour estimer des teneurs en eau mais elle pourrait être appliquée pour convertir les données ERT en d'autres paramètres associés (e.g., température, salinité, conductivité électrique de l'eau) et améliorer ainsi la surveillance des processus dans le sous-sol. Cette méthode ouvre de nouvelles perspectives pour conduire des études quantitatives sur les stocks et les flux d'eau, et contribuer à une meilleure compréhension de processus écohydrologique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUDEBERT M., CLEMENT R., TOUZE-FOLTZ N., GÜNTHER T., MOREAU S., DUQUENNOI C., 2014 – Time-lapse ERT interpretation methodology for leachate injection monitoring based on multiple inversions and a clustering strategy (MICS). *Journal of Applied Geophysics* 111, 320–333.

CAMPBELL R.B., BOWER C.A., RICHARDS L.A., 1948 – Change of Electrical Conductivity With Temperature and the Relation of Osmotic Pressure to Electrical Conductivity and Ion Concentration for Soil Extracts. *Soil Science Society of America Journal* 13, 66–69.

DOUSSAN C., RUY S., 2009 – Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity: Soil hydraulic-electrical conductivity. *Water Resources Research*, 45.

GÜNTHER T., RÜCKER C., 2015 – Boundless Electrical Resistivity Tomography BERT 2 – the user tutorial.

TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., 1980 – Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574–582.

WAXMAN M.H., SMITS L.J.M., 1968 – Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands. *Society of Petroleum Engineers Journal* 8, 107–122.

Prospection sismique haute résolution pour la caractérisation géophysique d'un sous-sol agricole : Estimation des vitesses des ondes P et S

PELLORCE Léna¹, MESGOUEZ Arnaud¹, VALOIS Rémi¹,
DOUSSAN Claude², BODET Ludovic³, GUERIN Roger³, GINOUX Cyril¹

¹ Avignon Université, INRAE, UMR EMMAH, F-84000 Avignon, France.

² INRAE, Avignon Université, UMR EMMAH, F-84000 Avignon, France.

³ Sorbonne Université, CNRS, UMR METIS, Paris, France.

Résumé

Nous présentons un jeu de données sismiques acquis en janvier 2025 sur une parcelle agricole ("Lysimètre") de l'UMR EMMAH (INRAE Avignon). L'objectif est de caractériser en 1D les propriétés géophysiques du sous-sol via une analyse préliminaire des temps d'arrivée des ondes P (V_P) et des hodochrones. Les vitesses des ondes S (V_S) sont estimées à partir des ondes de surface par la méthode MASW. Ces premiers résultats apportent des éléments sur les propriétés mécaniques du sous-sol et son interaction avec la nappe, et serviront de base pour des inversions 2D. L'étude vise à améliorer la gestion de la ressource en eau dans un contexte de changement climatique ainsi que la compréhension des flux hydriques dans le sol. Celle-ci s'appuie sur une connaissance fine de la lithologie, de la granulométrie et des paramètres physico-chimiques, couplée à un suivi in situ (température, teneur en eau volumique, pression de succion).

Mots clés : Géophysique, Sismique, Analyse des temps d'arrivée, Ondes P, Ondes S, Nappe phréatique, Modélisation 1D, Propriétés mécaniques, Hydrogéophysique.

Abstract

We present a seismic dataset acquired in January 2025 on an agricultural field ("Lysimètre") at the EMMAH lab (INRAE Avignon). The aim is to characterize 1D geophysical properties of the subsurface through a preliminary analysis of P-wave arrival times (V_P) and hodographs. S-wave velocities (V_S) are derived from surface wave analysis using MASW. These results offer insights into the mechanical properties of the subsurface and its interaction with the water table, and will support further 2D inversion. The study contributes to improving water resource management under climate change as well as understanding soil water fluxes. This understanding is based on detailed knowledge of lithology, granulometry, and physico-chemical parameters, combined with in situ monitoring (temperature, volumetric water content, pressure head).

Keywords : Geophysics, Seismic, Arrival time analysis, P-waves, S-waves, Water table, 1D modeling, Mechanical properties, Hydrogeophysics.

1 Introduction

Dans le cadre d'une collaboration entre les UMR EMMAH et METIS, nous avons réalisé une prospection sismique haute résolution sur la parcelle agricole "Lysimètre" du site Saint-Paul INRAE Avignon, bien documentée. L'objectif de cette étude est de caractériser les propriétés géophysiques du sous-sol à l'aide de mesures sismiques pour estimer les vitesses des ondes P (V_P) et des ondes S (V_S). Ces paramètres sont essentiels pour comprendre les structures géologiques et les interactions entre les propriétés mécaniques et hydrogéologiques du sol. Cette analyse initiale, couplée aux données géotechniques existantes, servira de base pour des modélisations 2D et permettra de mieux représenter la distribution spatiale de l'eau dans le sol, contribuant ainsi à une gestion durable de la ressource en eau.

2 Description du site et des données à disposition

Le site (Figure 1[a]) est une parcelle agricole en climat méditerranéen, un fluvisol avec une nappe phréatique variant de 2-3 m en été à 6-7 m en hiver, en raison de l'activité humaine. Le sol est constitué de couches successives d'argiles limoneuses (0-1 m), de limons argileux, de sables (2 m), et de graviers sableux jusqu'aux marnes gris-bleus à 9 m. La parcelle est équipée de piézomètres et de 10 mesures continues en profondeur (température, teneur en eau, pression de succion jusqu'à 1,3 m). Des analyses géotechniques ont fourni des profils lithologique, pédologique, granulométriques et physico-chimiques (densité, calcite, matière organique, carbone, ions,...) tels que dans le rapport de di Pietro et al. (2004). La construction d'un lysimètre (Tison et al. (2016), Chapelet et al. (2012)), ainsi que différentes recherches (Bogner et al. (2004), Marc et al. (2024)) ont permis une connaissance accrue de ce site.

3 Configuration et traitements des données sismiques

Les mesures sont réalisées avec 144 géophones verticaux de 14 Hz, espacés de 25 cm, et une source sismique de type massette appliquée sur une plaque de polyéthylène (5×5×2 cm), entre chaque géophone et aux extrémités.

3.1 Traitement des ondes de compression (P)

Pour estimer la vitesse des ondes P à partir des données de terrain, le pointé de la première onde arrivée a été effectué sur Pickwin. Avant l'inversion des temps d'arrivée, une analyse des hodochrones a révélé une légère variation latérale. Malgré cela, une analyse 1D a été réalisée pour obtenir une estimation des vitesses des ondes P en fonction de la profondeur et des épaisseurs de couches. La Figure 1[b] présente les données de temps d'arrivée avec le tracé des hodochrones des tirs direct et inverse desquels sont issus deux profils de V_P .

3.2 Traitement des ondes de surface (Rayleigh)

La vitesse des ondes S est estimée via SWIP, code académique développé par Pasquet et Bodet (2017), basé sur la méthode MASW (*Multi-Channel Analysis of Surface Waves*). Nous avons d'abord réalisé la courbe de dispersion (Figure 2) en utilisant les sismogrammes des tirs direct et inverse. Cela nous a permis d'obtenir a priori des vitesses des ondes S en 1D, en paramétrant un modèle à cinq couches. Ce modèle servira ensuite pour l'inversion en profils pseudo-2D.

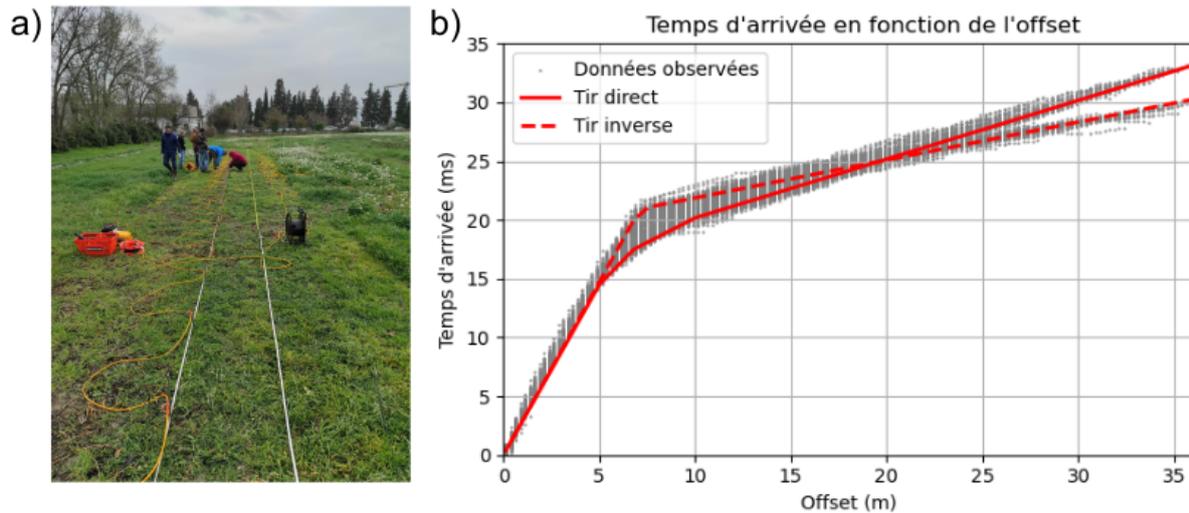


FIGURE 1 – [a] Photo du site. [b] Graphique des temps d'arrivée en fonction de l'offset avec le tracé des hodochrones des tirs direct et inverse.

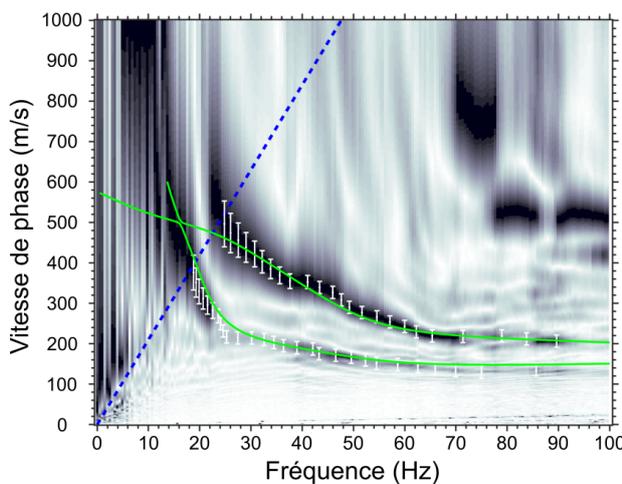


FIGURE 2 – Courbes de dispersion des données de terrain (avec seulement les tirs direct et inverse); en blanc les pointées des courbes et en vert la courbe de dispersion reconstruite pour le modèle 1D par SWIP. La droite bleue représente la coupure de sensibilité donc tout pointé au-delà n'est pas pris en compte dans l'inversion.

4 Résultats préliminaires

Nous obtenons ainsi les profils des vitesses de V_P et de V_S en Figure 3, avec une incertitude de 10 % arbitrairement posée. Ces courbes nous permettent d'avoir un premier aperçu des vitesses des ondes en fonction de la profondeur et de leur comportement vis-à-vis de la nappe phréatique mesurée *in situ* et indiquée sur les profils. Les résultats préliminaires mettent en évidence une variation des vitesses avec la profondeur. Cette évolution sera comparée aux observations lithologiques réalisées sur le site, ainsi qu'à la profondeur de la nappe phréatique, où l'on s'attend à une augmentation rapide de V_P (Leong & Cheng, 2016), sans pour autant observer de sensibilité marquée de V_S .

5 Conclusion et perspectives

Ces premiers profils 1D serviront de base à une inversion 2D prochaine pour affiner les modèles d'inversion sismique. Ils nous permettent d'obtenir un premier a priori sur les propriétés mécaniques du sous-sol et de mieux conditionner les inversions par pyGIMLi (Rücker et al., 2017) pour V_P et par SWIP pour V_S .

À terme, ces travaux seront intégrés à des mesures d'ERT (*Electrical Resistivity Tomography*), car l'inversion simultanée voire conjointe de différentes approches géophysiques améliore la compréhension des processus hydrogéophysiques. Des études telles que celles de Dangeard et al. (2021), Mollaret et al. (2020), Pasquet et al. (2016) et Blazevic et al. (2020) montrent l'efficacité de ces méthodes combinées pour quantifier les dynamiques de l'eau et la structure des milieux.

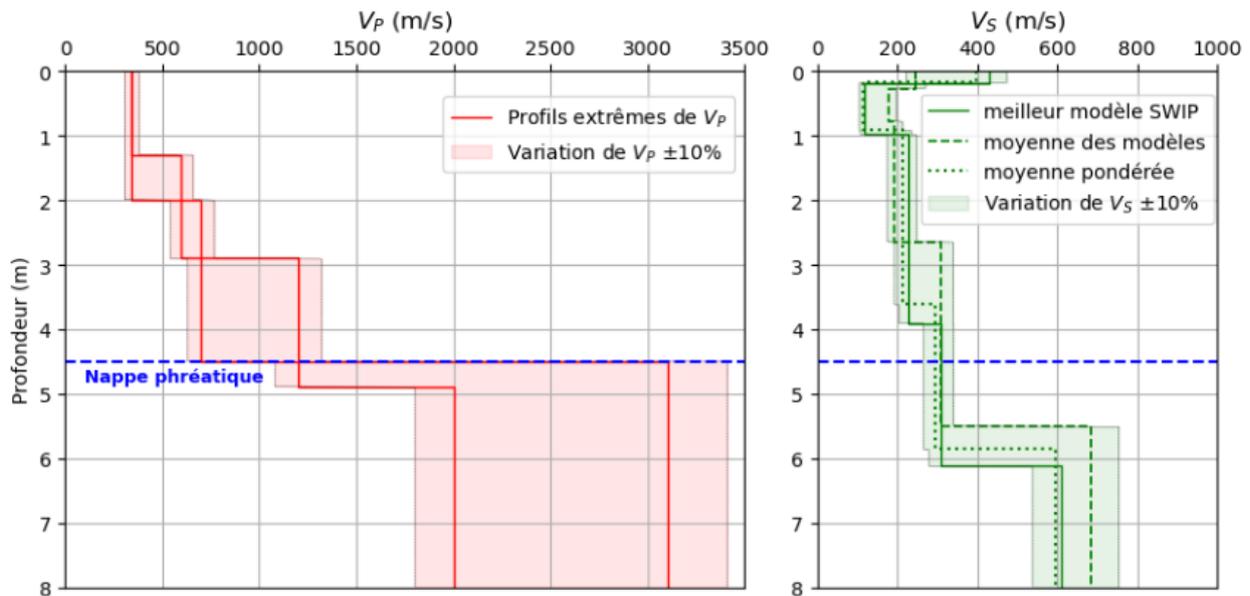


FIGURE 3 – Profils 1D de [a] vitesse des ondes P, issus du tracé des hodochrones des tirs direct et inverse, et [b] vitesse des ondes S, issus d’une inversion par SWIP.

Références

- Blazevic L., Bodet L., Pasquet S., Linde N., Jougnot D., Longuevergne L., 2020 - Time-Lapse Seismic and Electrical Monitoring of the Vadose Zone during A Controlled Infiltration Experiment at the Ploemeur Hydrological Observatory, France. *Water*, 12, 5230, doi : 10.3390/w12051230.
- Bogner C., Marc V., Di Pietro L., Doussan C., Ruy S., Gaudu J.-C., Perrin P., Cognard-Plancq A.L., Emblanch C., Daniel M., Simler R., 2004 - Tracer study of infiltration in a field soil – simulated rainfall experiment on a large lysimeter. *International Workshop on the Application of Isotope Techniques in Hydrological and Environmental Studies*, 6–8 November 2004, Paris.
- Chapelet A., Debroux M., Tison F., Di Pietro L., Doussan C., et al., 2012 - An experimental setup in Avignon (South of France) composed of an agricultural field and of a large scale undisturbed lysimeter for the multiscale study of preferential flow in soil and of groundwater recharge processes. *4th International Congress EUROSOIL*, Jul. 2012, Bari, Italy, (hal-01606187).
- Dangeard M., Rivière A., Bodet L., Schneider S., Guérin R., Jougnot D., Mainault A., 2021 - River Corridor Model Constrained by Time-Lapse Seismic Acquisition. *Water Resources Research*, 57, doi : 10.1029/2020WR028911.
- Leong E.C., Cheng Z.Y., 2016 - Effects of confining pressure and degree of saturation on wave velocities of soils. *International Journal of Geomechanics*, 16(6), doi : 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000727.
- Marc V., Tison F., Doussan C., Dupont J., Babic M., Simler R., Ruy S., 2024 - Assessing the Hydrological Impact of Gravity-Fed Irrigation on Groundwater Recharge Using Long-Term Isotope Monitoring and Modelling. *Hydrological Processes*, doi : 10.1002/hyp.70022.
- Mollaret C., Wagner F., Hilbich C., Scapozza C., Hauck C., 2020 - Petrophysical Joint Inversion Applied to Alpine Permafrost Field Sites to Image Subsurface Ice, Water, Air, and Rock Contents. *Frontiers in Earth Science*, 8, 85, doi : 10.3389/feart.2020.00085.
- Pasquet S., Holbrook S., Carr B., Sims K., 2016 - Geophysical imaging of shallow degassing in a Yellowstone hydrothermal system. *Geophysical Research Letters*, 43, doi : 10.1002/2016GL071306.
- Pasquet S., Bodet L., 2017 - SWIP : An integrated workflow for surface-wave dispersion inversion and profiling. *Geophysics*, 82, 1–56, doi : 10.1190/geo2016-0625.1.
- di Pietro, L., Doussan, C., Ruy, S., Gaudu, J.-C., Perrin, P., Pallut, R., Renard, D. (2004). Site atelier Fontanille : infiltration, recharge, écoulements préférentiels et transport de polluants vers les nappes. Rapport Interne INRAE - UMR EMMAH. <hal-02832296v1>
- Rücker C., Günther T., Wagner F., 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.
- Tison F., Gaudu J.-C., Pallut R., Ruy S., Doussan C., et al., 2016 - Mesure de débit sur un lysimètre en milieu agricole à sol non remanié. *Cahier des Techniques de l'INRA*, N° Spécial : Mesure et Métrologie, 7–29, (hal-01607374).

ETUDE DE L'EVOLUTION DES CONTAMINANTS D'HYDROCARBURES PAR METHODE DE RESISTIVITE DANS UNE GRANDE VILLE A MADAGASCAR

RAKOTOMANDRINDRA P. F. M.¹, RAMANITRA N. A.², MANDIMBIHARISON A. J.³

¹ Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, Madagascar, rafarapascale@gmail.com

² Ecole Normale Supérieure, Antananarivo, Madagascar, manitra2007ok@gmail.com

³ Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar, raory@yahoo.fr

RESUME

Depuis quelques années, une grande ville à Madagascar, site tenu confidentiel, a subi une pollution d'hydrocarbures. Une étude géophysique, utilisant la méthode de résistivité, a été menée dans cette ville polluée afin de déterminer les sources et l'extension de ces polluants. Les résultats ont révélé que les sources étaient des fuites provenant de quelques réservoirs et d'un bassin de séparateur d'eau et d'huile. Les nappes de certains sites pollués présentent une gamme de résistivité élevée tandis que d'autres présentent une tendance à la baisse au fil du temps.

Mots clés : Contaminants, hydrocarbures, méthode de résistivité, Madagascar

ABSTRACT

In recent years, one of the big city in Madagascar, site kept confidential, has suffered from hydrocarbon pollution. A geophysical survey, using the resistivity method, was carried out in this polluted city to determine the sources and extent of these pollutants. The results revealed that the sources were leaks from some tanks and an oil/water separator basin. The water tables at some polluted sites show a high resistivity range, while others show a decreasing trend over time.

Key words: Contaminants, hydrocarbons, resistivity method, Madagascar

INTRODUCTION

Les polluants hydrocarbures font partie des problèmes environnementaux rencontrés un peu partout dans le monde entier. Ces problèmes sont accentués pour les grandes villes malgaches par l'absence de politique de gestion de ces types de déchets. Leurs sources sont diverses mais les plus grandes quantités proviennent souvent de fuites de réservoirs pétroliers ou de déversements provenant d'accidents lors de leur transport. Ces polluants sont nocifs pour l'environnement et surtout pour la santé humaine.

Récemment, dans l'une des grandes villes de Madagascar, une pollution par des hydrocarbures de la nappe d'eaux souterraines a été remarquée. Une étude géophysique a été menée afin de déterminer les sources et l'extension de cette pollution. La présence des hydrocarbures fraîchement arrivés dans la nappe phréatique est supposée augmenter la résistivité de celle-ci. Pour faire l'étude donc, l'équipe de terrain a opté pour la méthode de résistivité utilisant particulièrement l'imagerie par tomographie électrique. Cette méthode a été utilisée dans de nombreuses expériences et études sur terrain concernant la contamination des nappes par hydrocarbures. Elle s'avère être efficace dans l'étude de ces polluants (Sauk, 1998, Atekwana *et al.*, 2000, Blondel *et al.*, 2014). Les résultats obtenus en géophysique ont été appuyés par une analyse d'échantillons des eaux de ces nappes au laboratoire.

1. Méthodes et matériels utilisés

1.1. Méthode de résistivité

La méthode de résistivité est basée sur l'injection de courant continu dans le sous-sol à l'aide de deux électrodes appelées électrodes de courant et d'en recueillir une différence de potentiel avec deux autres électrodes appelées électrodes de potentiel.

L'imagerie par tomographie électrique est une des techniques utilisées en méthode de résistivité. C'est un dispositif multiélectrode permettant d'avoir une image 2D du sous-sol. Lorsque les substances polluantes présentent un contraste de résistivité relativement élevé par rapport à la structure polluée, cette technique permet d'observer à la fois l'extension latérale des polluants et l'épaisseur de la zone contaminée. Les données obtenues ont été inversées avec RES2DINV (version 3.54) en utilisant la méthode d'inversion par moindres carrés (Loke et Barker, 1996).

L'appareil de mesure utilisé lors de la campagne géophysique a été le résistivimètre IRIS SYSCAL R1 plus utilisant 32 électrodes. La distance interélectrode choisie est de 3 m maximale avec le dispositif Wenner. Ce dispositif permet en même temps d'atteindre le toit du substratum argileux de la nappe à environ 14 m de profondeur et de mettre en évidence la zone contaminée. La partie superficielle est constituée de dunes vives et l'aquifère est formé de sables à grains moyens.

Pour suivre l'évolution des contaminants, des campagnes géophysiques ont été effectuées à différents moments.

1.2. Analyse des eaux

Des échantillons d'eaux des nappes sur les sites où l'on a effectué les mesures géophysiques ont été prélevés pour analyse au laboratoire. L'analyse a été effectuée par chromatographie et sert à interpréter les résultats géophysiques obtenus. Il est important de noter que l'objectif est uniquement d'évaluer la quantité d'hydrocarbures totaux dans les échantillons sans distinguer les types de polluants d'hydrocarbures existants.

2. Résultats et interprétation

Deux sites ont été étudiés pour le suivi de l'évolution de la résistivité des hydrocarbures polluants la structure aquifère. Le site 1 a été contaminé en 2021 et le site 2 en 2023. Des levés géophysiques ont été effectués en ces périodes. Puis, en 2024, de nouvelles mesures géophysiques et un prélèvement d'échantillons d'eaux souterraines ont été réalisés sur les deux sites afin de documenter l'évolution de la résistivité de ces polluants.

2.1. Résultats géophysiques

Site 1

Les deux coupes géoélectriques des fig. 2 et 3 ont été obtenues respectivement en été 2021 et étiage 2024 sur le même endroit.

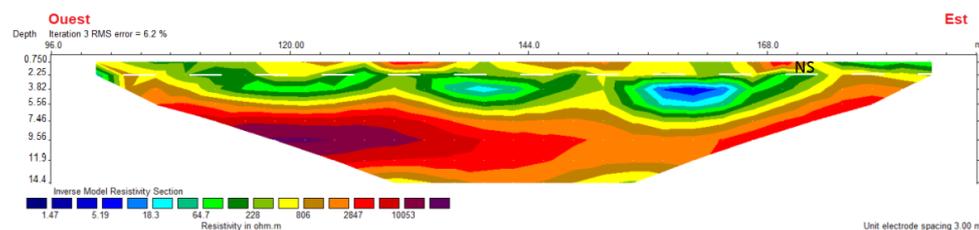


Fig. 2 : Coupe géoélectrique du site 1 en été 2021

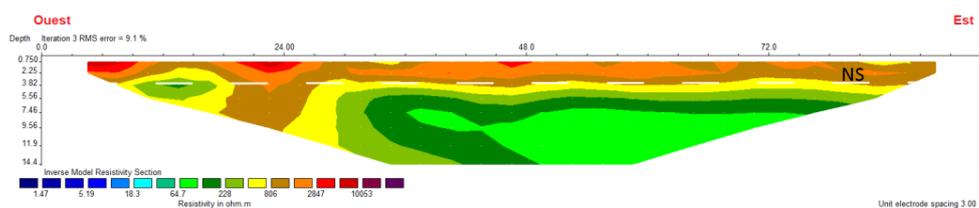


Fig. 3 : Coupe géoélectrique du site 1 en étiage 2024

Pendant la campagne géophysique en 2024, le niveau statique de la nappe sur ce site était à 3.75 m. Les profils sont perpendiculaires à la direction des écoulements souterrains qui a été déterminée avec

un réseau de piézomètres. Entre les deux observations, une diminution de la résistivité a été observée dans la zone saturée après 3 ans. En 2021, le niveau statique a été à 2 m, la gamme de résistivité de la nappe était comprise entre 500 à 10000 Ωm environ. Tandis qu'en 2024, elle était comprise entre 60 à 600 Ωm .

La présence d'hydrocarbures en 2021 aurait fait augmenter la résistivité de la nappe. Mais depuis, une certaine quantité de ces contaminants a été extraite toutes les semaines ce qui explique leur diminution en quantité. La diminution de la résistivité pourrait être aussi expliquée par la biodégradation naturelle de ces polluants (Sauk, 1998). Cette biodégradation générerait des acides carboxyliques et organiques.

Site 2

Les quatre profils des fig.4, 5, 6 et 7 ont été étalés au bord de la mer. La nappe observée est constituée par le biseau salé et son niveau fluctue avec les marées.

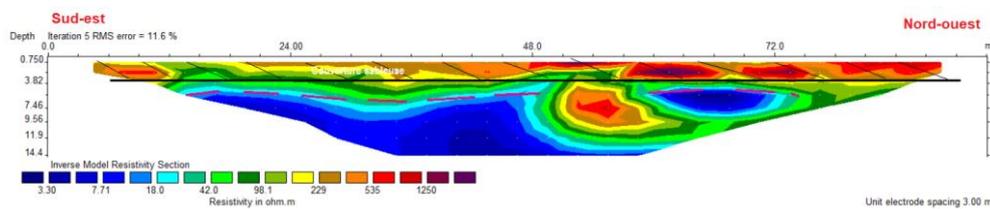


Fig.4 : Coupe géoélectrique en amont du site 2 en été 2023

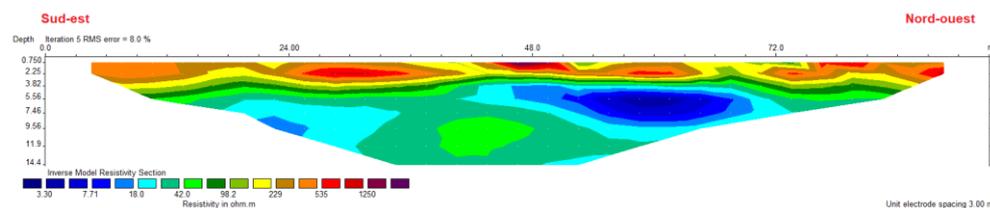


Fig.5 : Coupe géoélectrique en amont du site 2 en étiage 2024

La partie superficielle résistante sur les deux coupes serait constituée de dunes vives. Mais, au centre de la coupe réalisée en 2023, à une profondeur de 3.5 m environ, une anomalie résistante a été identifiée. Cette anomalie pourrait correspondre à la pollution initiale par les hydrocarbures. Il est à remarquer que cette anomalie n'a pas été observée sur la coupe réalisée en 2024 car, comme ce point se trouve en amont du site 2, il est possible que les contaminants se soient écoulés vers l'aval. Il ne resterait plus qu'une petite partie des contaminants dans cette zone, comme le suggère la résistivité un peu plus élevée (passant de moins de 10 à 50 Ωm environ) de la coupe de la fig.5 réalisée en 2024.

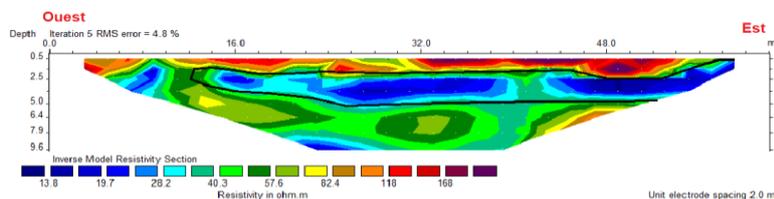


Fig.6 : Coupe géoélectrique en aval du site 2 en été 2023

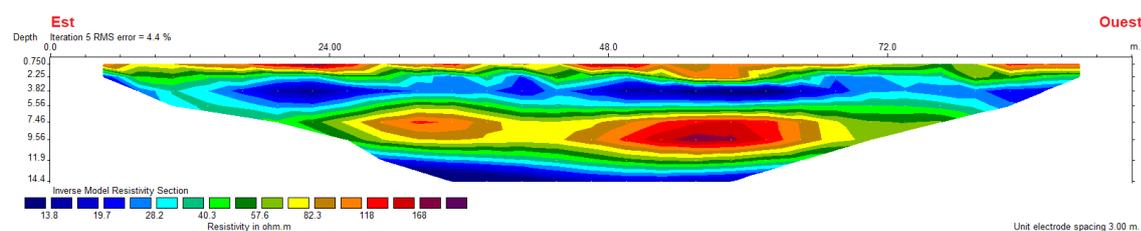


Fig.7 : Coupe géoélectrique en aval du site 2 en étiage 2024

Sur les deux coupes des fig.6 et 7, une couche plus résistante, comprise entre deux couches conductrices, occupe la partie centrale des coupes. Une augmentation nette de la résistivité (de 20 à 60 Ω m environ vers 50 à 160 Ω m environ) est observée au niveau de cette couche résistante depuis 2023. Comme ces profils ont été réalisés en aval du site 2, cette augmentation de la résistivité serait expliquée par l'arrivée des contaminants depuis l'amont de ce site. La zone contaminée est surmontée d'une couche fine d'eau saumâtre.

2.2. Résultats d'analyse au laboratoire

L'analyse des échantillons d'eau pris dans des piézomètres de la zone contaminée a confirmé les résultats géophysiques observés en 2024. Malheureusement, aucune analyse de ces eaux n'a pas été faite au moment de la contamination mais, l'analyse du sol a donné une valeur en hydrocarbures totaux supérieure à 50 000 mg/kg.

Sur le site 1, le résultat montre une baisse de la résistivité depuis le moment de la contamination jusqu'en 2024. Le résultat d'analyse de l'échantillon a donné une concentration en hydrocarbures totaux de 14.53 mg/L. Cette valeur est légèrement faible.

Sur le site 2 où la résistivité de la nappe a augmenté, la concentration en hydrocarbures totaux a donné 10647.06 mg/L. Cette valeur est très élevée du fait que les contaminants n'ont affecté ce site 2 qu'en 2023 et qu'aucune mesure de décontamination n'a été prise que récemment aussi, d'une part et que d'autre part, la biodégradation naturelle n'a pas encore eu le temps nécessaire pour bien démarrer.

CONCLUSION

Cette étude a été faite pour suivre l'évolution des contaminants d'hydrocarbures dans une grande ville à Madagascar. La méthode de résistivité a été entreprise pour déterminer la présence et l'extension de ces contaminants dans la nappe de la zone d'étude. Les résultats géophysiques ont confirmé l'hypothèse que la présence des hydrocarbures fraîchement arrivés dans la nappe a tendance à augmenter la résistivité de celle-ci. Tandis que le temps de résidence de ces contaminants dans la nappe joue un rôle sur leur évolution et la baisse de la résistivité au fil du temps. En effet, la biodégradation naturelle des hydrocarbures produit des acides carboxyliques et organiques qui ont tendance à diminuer la résistivité de la nappe. Les résultats géophysiques ont été appuyés par l'analyse des eaux de la nappe des sites étudiés. Le site 1 où la pollution a débuté il y a trois ans avant l'étude en 2024 a donné une concentration faible en hydrocarbures totaux tandis que, le site 2, nouvellement contaminé, présente une concentration très élevée d'hydrocarbures totaux.

Pour améliorer cette étude, un suivi géophysique devrait être mené périodiquement à une même période de l'année afin de suivre de près l'évolution de la résistivité due uniquement aux effets de ces contaminants. Il faudra aussi compléter les mesures géophysiques par des analyses de l'eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ATEKWANA, E. A., SAUCK, W. A., WERKEMA JR, D. D., 2000. - Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of applied Geophysics*, 44, no 2-3, p. 167-180.

BLONDEL, A., SCHMUTZ, M., FRANCESCHI, M., TICHANE, F., CARLES, M., 2014. - Temporal evolution of the geoelectrical response on a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, 103, p. 161-171.

LOKE, M. H., BARKER, R. D., 1996 - Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

SAUCK, W. A. A., 1998 - Conceptual model for the geoelectrical response of LNAPL plumes in granular sediments. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1998*. Society of Exploration Geophysicists, p. 805-817.

OPTIMISATION DES ACQUISITIONS TL-ERT POUR OHMPI AVEC DÉCLENCHEMENT BASÉ SUR DES CAPTEURS : UNE ÉVALUATION NUMÉRIQUE

BADER HANIFA¹, MARCAIS JEAN¹, CARLUER NADIA¹, LASSABATERE LAURENT², CLEMENT REMI³

¹ UR RiverLy, INRAE, Villeurbanne, France, hanifa.bader@inrae.fr

² UMR LEHNA, ENTPE, Vaulx-en-Velin, France

³ UR REVERSAAL, INRAE, Villeurbanne, France, remi.clement@inrae.fr

RESUME

Le déclenchement des mesures de tomographie de résistivité électrique (ERT) est souvent basé sur le temps, ce qui n'est pas toujours judicieux. Cette étude explore des stratégies d'acquisition optimisées en Time-Lapse (TL-ERT) pour suivre les processus d'infiltration induits par la présence d'une haie. En particulier, nous évaluons des stratégies de déclenchement d'acquisition ERT basées sur des mesures de précipitations et d'humidité du sol en les comparant à une approche « classique » d'acquisition à pas de temps régulier. Pour cela, un modèle numérique sous Hydrus simule l'infiltration différenciée sous haie vs sous prairie. Pour chaque temps d'acquisition, les teneurs en eau sont ensuite traduites en distribution de résistivité électrique, sur laquelle est testée l'efficacité de ces stratégies à capturer la dynamique du processus d'infiltration. Les différentes séries d'acquisition TL-ERT sont alors comparées entre stratégies d'acquisition.

Mots clés : Haie, modèle hydrogéophysique, HYDRUS 2D, suivi temporel ERT, infiltration de l'eau.

ABSTRACT

The triggering of Electrical Resistivity Tomography (ERT) measurements is often time-based, which is not always optimal. This study explores optimized Time-Lapse ERT (TL-ERT) acquisition strategies to monitor infiltration processes induced by a hedge. Specifically, we evaluate ERT acquisition triggering strategies based on rainfall measurements or soil moisture sensors, comparing them to a "classical" fixed-time-step approach. A numerical Hydrus model simulates the different infiltration processes under a hedgerow versus a prairie. At each acquisition time, water contents are converted into electrical resistivity, on which the effectiveness of these strategies in capturing infiltration dynamics is assessed. The different TL-ERT acquisition series are then compared across acquisition strategies.

Key words: hedge, hydrogeophysical model, HYDRUS 2D, Time-lapse ERT, water infiltration.

INTRODUCTION

Des décennies d'agriculture intensive ont réduit la densité des haies en Europe (Robinson et Sutherland, 2002). Pourtant, les haies jouent un rôle essentiel dans la réduction de l'érosion des sols, la gestion des flux d'eau, ainsi que dans la promotion de la biodiversité. En hydrologie, leur influence ne se limite pas aux processus de surface, mais s'étend également à la redistribution de l'eau en subsurface, affectant ainsi la répartition de l'humidité du sol et l'infiltration de l'eau. Cela se produit notamment à travers leurs systèmes racinaires, qui créent des chemins préférentiels d'écoulement. Les haies contribuent également à une augmentation de l'évapotranspiration. Quantifier l'impact spatio-temporel de ces processus sur la dynamique de l'eau reste un défi en raison de la complexité des processus hydrologiques souterrains.

Les techniques géophysiques non invasives offrent des solutions prometteuses pour étudier ces dynamiques souterraines en capturant les mouvements de l'eau au fil du temps. La tomographie de résistivité électrique en mode Time-Lapse (TL-ERT) s'est révélée être une technique efficace pour surveiller la dynamique de l'eau autour et au sein des plantes. Chaque campagne de suivi TL-ERT est définie par des paramètres clés, classés en paramètres spatiaux et temporels (Dimech et al., 2022). Tout d'abord, les paramètres spatiaux déterminent l'étendue, la résolution et la profondeur d'investigation. Ces paramètres varient considérablement dans la littérature et sont optimisés en

fonction des objectifs de l'étude. Ensuite, les paramètres temporels définissent la fréquence des mesures, qui peut aller d'un pas horaire à hebdomadaire ou mensuel. Dans certains cas, les mesures ERT sont réalisées manuellement à des moments spécifiques, en fonction de l'expertise des chercheurs.

L'optimisation des paramètres d'acquisition temporels représente un défi majeur pour capturer des processus hydrologiques rapides tout en minimisant le volume de données acquises et en préservant l'autonomie des batteries lors d'un suivi de longue durée. Se fier uniquement à des intervalles fixes ou à des mesures déclenchées par des événements peut conduire à manquer des processus transitoires essentiels. OhmPi, un résistivimètre open-source doté d'une connectivité à distance (Clément et al., 2020), répond à ces défis en permettant une optimisation automatisée et en temps réel des acquisitions ERT en fonction des conditions environnementales. Ce système, développé pour améliorer l'efficacité du suivi hydrologique, s'appuie sur une automatisation en Python afin d'ajuster dynamiquement la planification des mesures en fonction des conditions de terrain. Cela permet une détection améliorée des variations hydrologiques et des mesures plus ciblées et efficaces.

Cette étude présente le développement de nouvelles stratégies d'acquisition TL-ERT visant à optimiser la temporalité des mesures TL-ERT pour une meilleure compréhension des processus hydrologiques. Notre objectif est d'identifier la stratégie la plus efficace pour capturer la dynamique hydrologique, notamment l'infiltration de l'eau sous les haies après des épisodes pluvieux. Pour ce faire, nous évaluons divers scénarios d'acquisition TL, incluant une approche régulière, une approche basée sur les précipitations, une approche basée sur la saturation du sol, ainsi qu'une approche combinant plusieurs capteurs. Ces scénarios sont testés via une expérimentation numérique développée avec le modèle Hydrus, qui simule les processus d'infiltration différenciés sous une haie et sous la prairie avoisinante. La comparaison de la dynamique de l'eau entre la haie et la matrice vise à caractériser l'impact de l'infiltration préférentielle induite par les systèmes racinaires des haies.

I. Approche numérique

Pour atteindre notre objectif, nous avons appliqué une approche numérique classique afin de tester différentes stratégies d'acquisition ERT en utilisant OhmPi. Cette approche est bien établie dans la littérature géophysique. La Figure 1 résume les principales étapes de cette méthodologie. Le processus commence par le développement d'un modèle hydrologique sous Hydrus, intégrant la géométrie complète d'une haie située sur une pente entre deux prairies, incluant un système racinaire hypothétique, sous des conditions environnementales reproduisant la topographie réelle de notre site d'étude à Pollionnay, France. Les données de teneur en eau extraites d'Hydrus sont ensuite converties en valeurs de résistivité électrique réelle à l'aide de relations pétrophysiques à différents pas de temps (Archie, 1942). Une étape de modélisation directe suit, où des jeux de données synthétiques de résistivité apparente sont générés à l'aide de Comsol Multiphysics, couplé à un script Matlab (F3DM – Forward 3D Modeling) (Clément et al., 2011). Ensuite, les modèles géoélectriques initiaux sont reconstruits par inversion des données électriques à l'aide de BERT (Günther et al., 2006). Enfin, nous définissons des métriques pour évaluer et comparer l'efficacité des différentes stratégies synthétiques de déclenchement TL-ERT en ce qui concerne le suivi des processus d'infiltration sous la haie. Ces métriques incluent le suivi de l'épaisseur du front d'infiltration (zone de transition d'humidité) ainsi que le volume des bulbes d'infiltration sous la haie et la prairie.

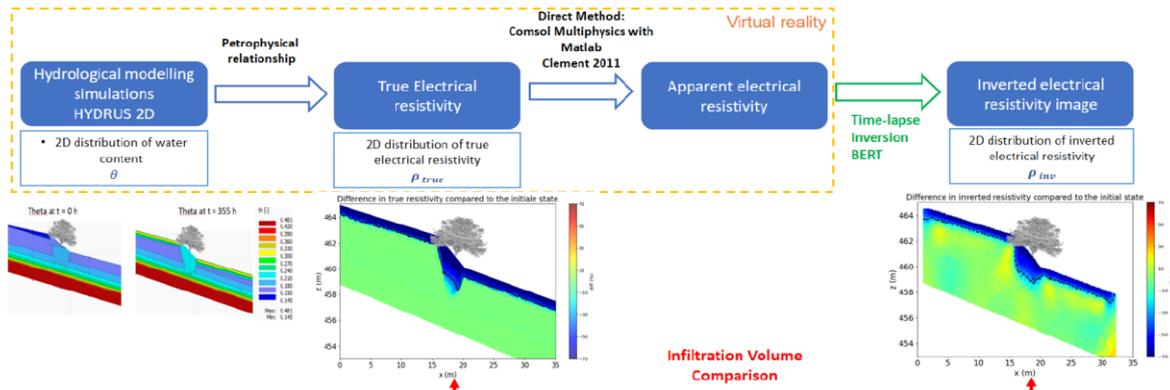


Fig. 1 –Aperçu de la stratégie numérique utilisé pour évaluer les différentes stratégies d’acquisition de TL-ERT.

II. Nouvelles stratégies d’acquisition

Dans cette section, nous présentons deux nouvelles stratégies d’optimisation des acquisitions ERT afin de mieux capturer les processus d’infiltration. Ces stratégies reposent sur l’utilisation de données de précipitations et ou de variations de l’humidité du sol mesurée *in situ* comme déclencheurs pour des mesures plus précises et opportunes. Toutes les variables de forçage et les paramètres sont représentatifs du site d’étude.

1. Stratégie basée sur les précipitations : les mesures sont déclenchées à tout moment lorsque les précipitations cumulées sur une période de 3 heures atteignent 5 mm. Des mesures supplémentaires sont également effectuées quotidiennement à 0 h (lignes verticales mauves), si aucune mesure n’a été déclenchée au cours des 24 heures précédentes (voir Fig. 2).

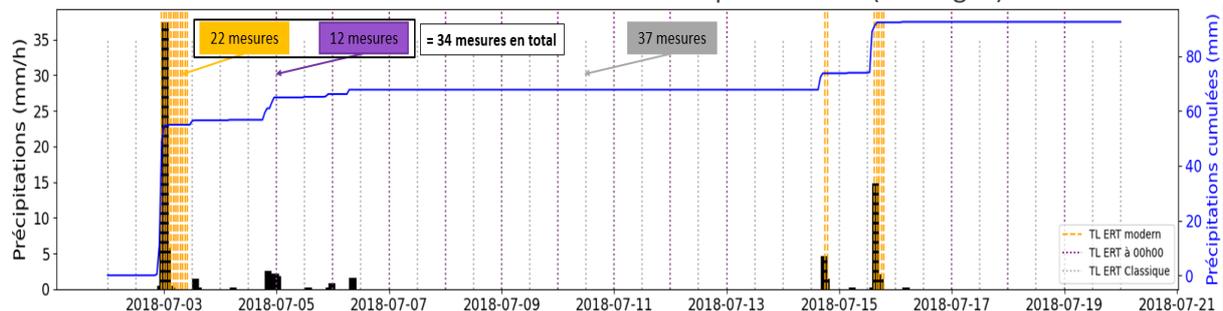


Fig. 2 – Stratégie basée sur l’intensité des précipitations (courbe rouge) et les valeurs cumulées (courbe bleue). Acquisition TL-ERT basée sur les précipitations (22 lignes verticales oranges) par rapport à la méthode classique (37 lignes verticales grises).

2. Stratégie basée sur l’humidité du sol : les mesures sont déclenchées en fonction des changements de saturation à différentes profondeurs du sol (30 cm et 60 cm) sous la haie. Un changement de saturation de 5 % ou plus déclenche une nouvelle mesure. Des mesures supplémentaires sont effectuées quotidiennement à 0 h (lignes verticales mauves), si aucune mesure n’a été déclenchée au cours des 24 heures précédentes (voir Fig. 3).

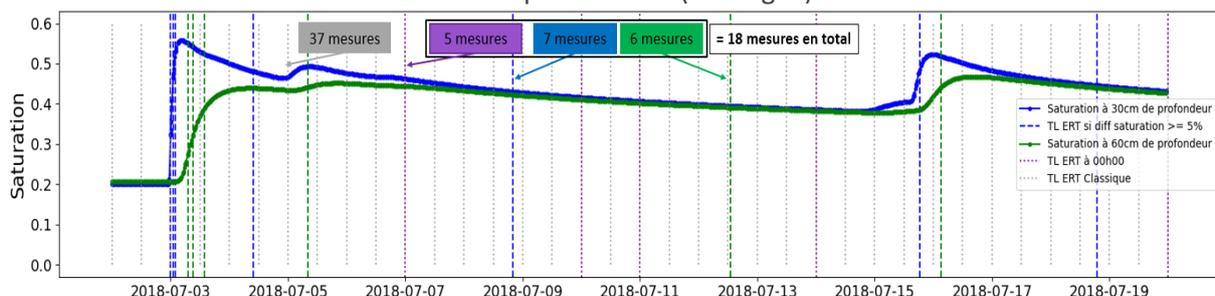


Fig. 3 – Stratégie basée sur les données de saturation pour deux profondeurs différentes (courbe bleue pour 30 cm et courbe verte pour 60 cm). Acquisition TL-ERT basée sur les précipitations (13 lignes verticales vertes et bleues) par rapport à la méthode classique (37 lignes verticales grises).

L'analyse des cartes ERT (non présentées ici) et des courbes de surface des bulbes d'infiltration sous la haie (Fig. 4), calculées lorsque la variation de résistivité vraie ou inversée dépasse -40 % par rapport à l'état initial ($t = 0$ h), montre que la stratégie finale, basée sur l'humidité du sol, est la plus efficace. Elle fournit des informations pertinentes sur la dynamique de l'eau dans le sol : les lignes vertes, reliant les points verts représentant les mesures déclenchées par cette stratégie, correspondent bien à la courbe rouge du volume d'infiltration. De plus, elle réduit le nombre de mesures par rapport à la méthode classique (18 mesures contre 37, Fig. 3), grâce à un déclenchement optimisé selon les variations de teneur en eau. Cette stratégie permet notamment de mieux capturer les écoulements préférentiels sous la haie.

La deuxième stratégie, basée sur les précipitations, détecte bien les premières variations rapides au début de la simulation (entre 24 et 50 h), mais elle manque des phases d'infiltration importantes entre 50 et 300 h, car elle ne prend pas en compte le temps de propagation de l'eau dans le sol. Cela souligne l'importance d'ajouter des mesures supplémentaires quotidiennement si aucune acquisition n'a été déclenchée au cours des 24 heures précédentes (comme déjà précisé).

Enfin, la stratégie classique se révèle peu pertinente : elle ne capte pas toutes les fortes variations initiales (24–50 h) et génère des mesures redondantes, car associées à des volumes d'infiltration similaires et à des profils de teneur en eau peu évolutifs en profondeur.

III. CONCLUSIONS

Cette étude examine les stratégies d'acquisition optimisées de TL-ERT, déclenchées par des changements de précipitations ou d'humidité du sol, pour surveiller l'eau souterraine sous les haies. La dernière stratégie semble être la meilleure. En effet, l'automatisation ajuste la fréquence des mesures en fonction des changements significatifs dans les conditions météorologiques ou du sol, réduisant ainsi les données inutiles et fournissant des résultats pertinents. Les simulations offrent des informations sur le rôle des haies dans l'infiltration de l'eau, jetant les bases de futures applications sur le terrain utilisant OhmPi et un suivi plus efficace. De plus, les travaux futurs pourraient intégrer des stratégies combinant ces sources de données et d'autres pour un suivi encore plus efficace.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CLEMENT, R., BERGERON, M., & MOREAU, S. (2011). COMSOL Multiphysics Modelling for Measurement Device of Electrical Resistivity in Laboratory test cell.
- CLEMENT, R., FARGIER, Y., DUBOIS, V., GANCE, J., GROS, E., & FORQUET, N. (2020). OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale. *HardwareX*, 8, e00122. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00122>
- DIMECH, A., CHENG, L., CHOUTEAU, M., CHAMBERS, J., UHLEMANN, S., WILKINSON, P., MELDRUM, P., MARY, B., FABIEN-OUELLET, G., & ISABELLE, A. (2022). A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years: Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699–1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>

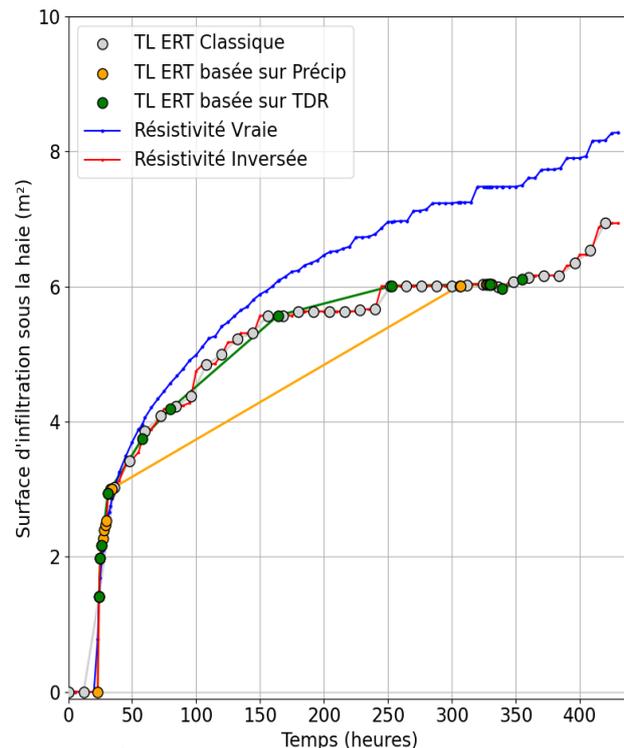


Fig. 4 – Évolution des surfaces des bulbes d'infiltration détectés sous la haie par ERT avec les différentes stratégies de déclenchement (points en gras).

VERS UNE BOÎTE À OUTILS OPERATIONNELLE POUR LA CARACTERISATION MÉCANIQUE PAR ONDES DE SURFACE DE LA PLATEFORME FERROVIAIRE ET DU SOL SUPPORT

BURZAWA A.¹, BODET L.¹, CÁRDENAS J.¹, CUNHA TEIXEIRA J.^{1,2}, RADIC N.^{1,3}, HALLIER A.², DANGEARD M.², BOISSON-GABORIAU J.², DHEMAIED A.²

¹ Sorbonne Université, CNRS EPHE UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75252 Paris 05, France, audrey.burzawa@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

La performance, la pérennité et la sécurité du réseau ferroviaire dépendent en partie des bonnes conditions mécaniques de la plateforme ferroviaire (PF) et de son sol support. De récentes études ont démontré la pertinence de la méthode sismique par ondes de surface pour évaluer la vitesse des ondes de cisaillement (Vs) en lien avec des anomalies de maintenance le long des voies ferrées. Chaque étape de la méthode de diagnostic (acquisition, traitement, inversion et interprétation), a été abordée en vue de proposer une boîte à outils optimisée et adaptée à l'exploitation ferroviaire.

Mots clés : Plateforme ferroviaire, Ondes de surface, Apprentissage profond, Inversion bayésienne

ABSTRACT

The performance, sustainability, and safety of the railway network partly depend in part on the mechanical conditions of the railway earthwork (RE) and its supporting soil. Recent studies have demonstrated the relevance of the surface-wave seismic method for the assessment of shear-wave velocity (Vs) in relation to maintenance anomalies along railway tracks. Each step of the diagnostic method (acquisition, processing, inversion, and interpretation) has been addressed to propose an optimized and railway-adapted toolbox.

Key words: Railway Earthwork, Surface waves, Deep learning, Bayesian inversion

INTRODUCTION

La conception, la régénération et la maintenance des voies ferrées nécessitent un suivi régulier de l'état mécanique des plateformes ferroviaires (PF) et du sol support. La portance (module EV2) et la compacité sont les paramètres clés pour dimensionner les couches de la PF. Les essais géotechniques associés ne sont réalisables que pendant les travaux, une fois la voie retirée. Pour la phase de diagnostic, divers outils géotechniques (sondages pénétrométriques, prélèvements, essais) permettent d'évaluer l'état mécanique, mais sont cependant coûteux et à faible rendement.

Face à ces limites, des approches géophysiques ont émergé, notamment l'utilisation des méthodes sismiques par ondes de surface pour évaluer la vitesse des ondes de cisaillement (Vs), critère reconnu pour le diagnostic des PF (Dhemaied et al., 2014). Des travaux récents ont permis de définir un protocole adapté aux contraintes ferroviaires (Bodet et al., 2017 ; Burzawa, 2024). L'approche a également été proposée pour le suivi de site dans le temps pour des problématiques d'effondrement et d'impact de l'hydrologie sur les propriétés des sols, en utilisant les signaux générés par les trains (Bardainne et al., 2023 ; Cunha Teixeira et al., 2025a,b ; Cunha Teixeira, 2025).

Pour appliquer ces approches le long de grands linéaires, il s'agit d'améliorer leur efficacité (de l'acquisition à l'interprétation). La présente étude se concentre sur l'optimisation en vue de l'automatisation. L'étape d'acquisition a été réalisée avec un dispositif de géophones tractés appelé landstreamer (Burzawa et al., soumis). Pour le traitement de la dispersion des ondes de surface, un outil basé sur l'apprentissage profond a été développé (Cárdenas et al., 2025). Enfin, pour améliorer la quantification des incertitudes et l'interprétabilité des résultats lors du processus d'inversion, le formalisme probabiliste a été adopté (Burzawa et al., 2023).

DISPOSITIF D'ACQUISITION SISMIQUE À HAUT RENDEMENT

Afin d'être compatible avec l'exploitation ferroviaire, l'acquisition de données sismiques doit être réalisée à l'axe de la voie (Fig. 1a) et avec un rendement suffisant. En ce sens, l'utilisation d'un dispositif de géophones tractés paraît pertinente. Afin de valider l'utilisation de tels dispositifs, les données sismiques obtenues (sismogrammes, images de dispersion et courbes de dispersion) ont été comparées à celles issues d'une configuration sismique dite "classique" (*i.e.*, collection de géophones plantés dans le sol). Cette comparaison systématique des données a consisté à placer les deux types de dispositifs à la même position et sur la piste pour garantir un bon couplage entre les géophones et le sol. Les deux jeux de données ont montré des similitudes remarquables (Burzawa et al., soumis).

Après validation de l'utilisation du landstreamer, celui-ci a été placé à l'axe de la voie (Fig. 1a) dans une zone particulière de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Sud Est Européenne présentant des remontées boueuses dans le ballast. 300 mètres linéaires ont été auscultés avec le landstreamer. Son utilisation a permis de tripler l'efficacité de l'acquisition. Le diagnostic de la zone de désordre a consisté dans un premier temps à comparer deux positions : hors de la zone (Fig. 1b) et dans la zone de désordre (Fig. 1c). L'inversion des données à ces deux positions a montré une couche de plus faible vitesse à 2 m de profondeur. Cette couche s'épaissit le long du profil, allant de 1 m jusqu'à atteindre 4 m d'épaisseur dans la zone de désordre (Fig. 1d). L'épaississement de cette couche de plus faible vitesse est remarquablement situé au droit de la zone de désordre observée en surface.

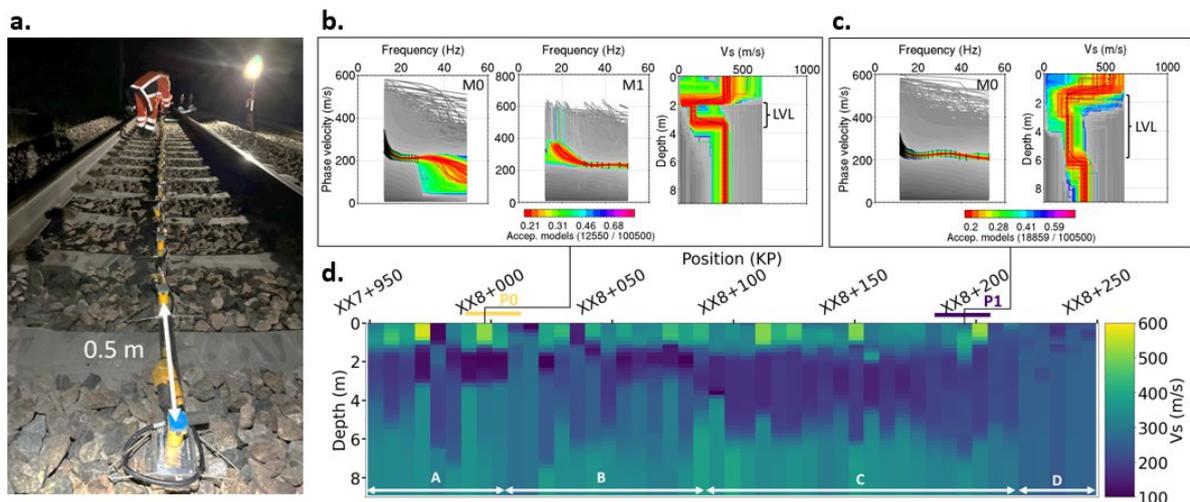


Fig. 1 - **a.** Landstreamer placé sur la voie (48 géophones espacés de 0,5 m et fréquence de coupure de 4,5 Hz). **b. et c.** Résultats des inversions pour les profils situés respectivement en dehors (P0) et dans la zone de désordre (P1). **d.** Profil inversé complet. Modifié d'après Burzawa et al. (soumis)

VERS UNE AUTOMATISATION DU TRAITEMENT DE LA DISPERSION

L'analyse des ondes de surface consiste à étudier les maxima d'énergie associés aux modes de propagation dans les images de dispersion (Foti et al., 2018). L'identification de ces maxima, bien que semi-automatisée, reste chronophage et requiert un opérateur qualifié. Pour automatiser ce traitement, des algorithmes d'apprentissage profond peuvent être utilisés. Dai et al. (2020) assimilent l'extraction des courbes de dispersion à une tâche de segmentation d'instances. L'architecture U-net, basée sur un réseau encodeur-décodeur et une succession de réseaux de neurones convolutifs (CNN), est couramment employée pour cette tâche.

Le modèle développé par Cárdenas et al. (2025), nommé U2-pick, est composé de deux U-net différenciés par la donnée prédite en sortie du modèle (Fig. 2a). Le premier modèle consiste à pointer les maxima d'énergie, correspondant à des modes de propagation présents dans l'image de dispersion (Fig. 2b). Le deuxième modèle attribue le rang de chaque mode (mode fondamental M0, modes supérieurs M1, M2, etc.) (Fig. 2c). L'apprentissage a été réalisé à partir d'une base de données d'images de dispersion synthétiques, caractéristiques des PF, en considérant différents états mécaniques (voir plus de détails dans Cárdenas et al., 2025). Les résultats du modèle sur des données

de terrain acquises en contexte ferroviaire sont présentés à la Fig. 2b et 2c. Ils montrent que le second modèle est précis pour M0, mais a des difficultés à identifier les modes supérieurs, en particulier lorsque la dispersion est "effective" ou "apparente". Les résultats des deux modèles sont ensuite associés en post-apprentissage pour obtenir la précision d'identification du premier et l'attribution des modes du second (Fig. 2d).

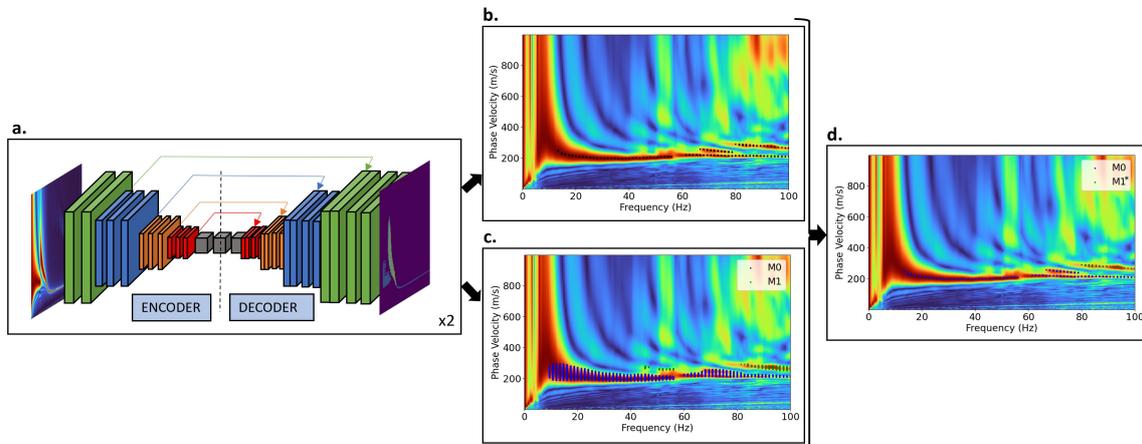


Fig. 2 - a. Architecture type Unet. b. Identification des maxima dans l'image de dispersion. c. Identification du rang (M0, M1) des modes de dispersion. d. Association des résultats en post apprentissage. Modifié d'après Cardenas et al. (2025).

L'INVERSION PROBABILISTE POUR UNE MEILLEURE INTERPRETATION

Une interprétation rigoureuse des résultats d'inversion de la dispersion des ondes de surface est cruciale pour une caractérisation fiable des PF. Une approche intégrant la quantification des incertitudes via l'inversion probabiliste a donc été développée (Burzawa et al., 2023). Le formalisme probabiliste (ou bayésien) permet d'inclure des informations *a priori* sur la structure de la PF en respectant les fortes contraintes imposées par le contexte ferroviaire. C'est notamment le cas dans un contexte de LGV où la connaissance de la structure de la PF et de ses matériaux est forte.

L'outil d'inversion développé a été appliqué sur des données de la LGV Nord Européenne où la voie présentait des désordres de stabilité et de maintenance. Dhemaied et al. (2014) ont montré que cette anomalie était en lien avec des diminutions de V_s en profondeur. Les *a priori* ont permis de fortement contraindre l'espace des paramètres et réaliser une inversion par recherche systématique. La Fig. 3 présente la densité de probabilité marginale (pdf) *a posteriori* du module de cisaillement G le long du tronçon étudié, où $G = \rho V_s^2$ (avec ρ la densité). On observe que la moyenne des pdf *a posteriori* indique des valeurs plus faibles de G dans la zone de désordre (en bleu). Par ailleurs, les pdf y sont nettement plus resserrées avec des incertitudes plus faibles sur les estimations. Les différences de résolution du problème inverse le long du tronçon peuvent être expliquées par la non-linéarité du modèle et la corrélation des paramètres, qui sont potentiellement plus complexes pour les profils représentés en orange.

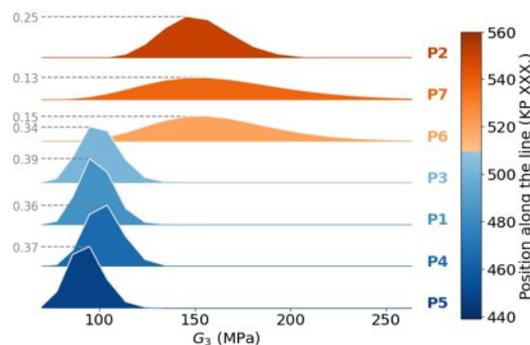


Fig. 3 - Densité de probabilité *a posteriori* du module de cisaillement G ($G = \rho V_s^2$), dans la PF le long de la voie, exprimé en point kilométrique (PK).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'utilisation à grande échelle d'un dispositif d'acquisition sismique à haut rendement type landstreamer sur la plateforme est désormais possible, offrant un gain significatif en efficacité. Grâce au modèle U2-Pick développé, la tâche de pointé automatique peut être réalisée en quelques secondes, contre plusieurs minutes avec une méthode classique, ce qui le rend particulièrement adapté au traitement de grands volumes de données. Par ailleurs, l'inversion bayésienne permet d'intégrer des informations *a priori* et de mieux quantifier les incertitudes, ouvrant ainsi la voie à des approches d'inversion jointe combinant différents types de données (notamment radar). Un travail reste à mener sur les liens entre les résultats d'inversion et les propriétés mécaniques, les premiers résultats étant prometteurs. Enfin, la portabilité de cette approche vers les systèmes de détection acoustique distribuée (DAS) et son utilisation en monitoring offrent des perspectives intéressantes pour le suivi en temps réel de l'état mécanique des infrastructures ferroviaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARDAINNE T., CAI C., REBERT T., TARNUS R., ALLEMAND T., 2023** – Passive seismic monitoring using trains as sources to characterize near-surface and prevent sinkholes. *European Association of Geoscientists & Engineers*, 1–5. doi:10.3997/2214-4609.2023101262
- 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. *Rapport technique interne*.
- BURZAWA A., BODET L., DANGEARD M., DHEMAIED A., BARRETT B., BYRNE D., WHITEHEAD R., CHAPTAL C., ERIKSEN A., CUNHA TEIXEIRA J., CÁRDENAS J., SANCHEZ GONZALEZ R., (soumis)** – Improving and increasing yield of railway earthworks' mechanical characterisation with a towed seismic setup: a case study along a High Speed Line. *Near Surface Geophysics*.
- BURZAWA A., 2024** – Diagnostic multi-échelle de la plateforme ferroviaire par ondes mécaniques guidées. *Thèse de doctorat. Paris, France: Sorbonne Université*. tel-04960807
- BURZAWA A., BODET L., DHEMAIED A., DANGEARD M., PASQUET S., VITALE Q., BOISSON-GABORIAU J., CUI Y., 2023** – Detecting mechanical property anomalies along railway earthworks by Bayesian appraisal of MASW data. *Construction and Building Materials*, 404(e.g.), 133224. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133224
- CÁRDENAS J., BURZAWA A., RADIC N., BODET L., VIDAL R., DIOP K., DANGEARD M., DHEMAIED A., 2025** – Deep learning contribution to the automatic picking of surface-wave dispersion for the characterization of railway earthworks. *Computer and Geosciences*, doi: 10.1016/j.cageo.2025.105883
- CUNHA TEIXEIRA J., BODET L., DANGEARD M., GESRET A., HALLIER A., RIVIÈRE A., BURZAWA A., CÁRDENAS CHAPELLÍN J. J., FONDA M., SANCHEZ GONZALEZ R., DHEMAIED A., BOISSON GABORIAU J., 2025a** – Nondestructive testing of railway embankments by measuring multi-modal dispersion of surface waves induced by high-speed trains with linear geophone arrays. *Seismica*, 4(1). doi:10.26443/seismica.v4i1.1150
- CUNHA TEIXEIRA J., BODET L., RIVIÈRE A., HALLIER A., GESRET A., DANGEARD M., et al., 2025b** – Physics-guided deep learning model for daily groundwater table maps estimation using passive surface-wave dispersion. *Water Resources Research*, 61, e2024WR037706. doi: 10.1029/2024WR037706
- CUNHA TEIXEIRA J., 2025** – Exploitation du monitoring sismique du sous-sol en milieu ferroviaire. *Thèse de doctorat. Paris, France: Sorbonne Université*.
- DAI T., XIA J., NING L., XI C., LIU Y., XING H., 2020** – Deep learning for extracting dispersion curves. *Surveys in Geophysics*, 42(1), 69–95.
- DHEMAIED A., CUI Y.J., M. T.A., 2014** – Étude de la sensibilité de la raideur mécanique des sols supports à la variation de la teneur en eau. *Rapport d'activité*.
- FOTI S., 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 A., 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(6), 2367–2420.

INTEGRATION DE LA GEOLOGIE DE SUBSURFACE DU BASSIN DE MONS (BE) DANS LE TRAITEMENT DES ACQUISITIONS EN SISMIQUE REFLEXION

CAMPEOL Quentin¹, MIQUELIS Florian², HANOT Franck², DUPONT Nicolas¹, KAUFMANN Olivier¹

¹ University of Mons, Faculty of Engineering, Department of Geology and Applied Geology, 9, rue de Houdain, 7000 Mons, Belgium. Nicolas.dupont@umons.ac.be, Olivier.kaufmann@umons.ac.be, Quentin.campeol@umons.ac.be,

² CDP Consulting, 7, Boulevard Chanzy, 41000, Blois, France. f.miquelis@cdpconsulting.fr, f.hanot@cdpconsulting.fr

RESUME

Dans la région transfrontalière franco-belge, les variations rapides de vitesses et d'épaisseurs des terrains lents en subsurface impactent l'imagerie sismique réflexion 2D des réservoirs géothermiques profonds. Ce travail vise à améliorer le calcul des corrections statiques et les modèles de vitesse de sommation en intégrant l'effet des terrains méso-cénozoïques. Ces corrections contribuent à améliorer la sommation des réflecteurs profonds et leur migration.

Mots clés : *sismique réflexion, correction statique enterrée, valorisation de données géophysiques, Bassin de Mons*

ABSTRACT

In the France-Belgium border region, rapid thickness and velocity variations of slow subsurface deposits have an impact on 2D seismic reflection imaging of deep geothermal reservoirs. The aim of this work is to improve the calculation of static corrections and summation velocity models by integrating the effect of Meso-Cenozoic deposits. These corrections help to improve the summation of deep reflections and their migration.

Key words: *seismic reflection, deep-seated static correction, data enhancement, Mons Basin*

INTRODUCTION

En Wallonie, la région transfrontalière franco-belge, située à proximité le long du front varisque, est la principale zone où les ressources géothermiques profondes sont prouvées [Petitclerc and Vanbrabant 2011]. La ressource géothermique y est située dans le réservoir des calcaires carbonifères. Néanmoins, de nombreuses incertitudes persistent quant à l'extension et la caractérisation de cet aquifère en profondeur.

Pourtant, cette vaste zone d'étude dénombre plusieurs campagnes de sismique réflexion comme Boulogne-Maubeuge (1979-82), BELCORP1986, Hainaut1979, Mons2012 et Hainaut2019. Cependant, l'interprétation de l'imagerie sismique 2D le long du front varisque reste difficile du fait de la faible qualité des sections. En effet, de nombreux facteurs géologiques et anthropiques compliquent l'acquisition et les traitements sismiques [Dupont, 2021].

Dans ce travail, l'impact des dépôts méso-cénozoïques du Bassin de Mons, dont l'épaisseur varie fortement, est examiné. Leurs effets sur les corrections statiques et les modèles associés de vitesse de sommation ont été étudiés au travers du retraitement de lignes de la campagne Hainaut2019.

Contexte géologique de la zone d'étude

Dans la partie nord de la région transfrontalière du Hainaut franco-belge, les dépôts du Carbonifère inférieur du Parautochtone brabançon sont peu déformés et affleurent par endroits. Vers le sud, les terrains paléozoïques sont fortement déformés au sein de l'Allochtone ardennais et d'écaïlles tectoniques. La zone située entre les unités allochtone et parautochtone est caractérisée par une série de failles de chevauchement dont un accident principal, la Faille du Midi [Belanger et al. 2012].

Au centre de la région, ces unités sont recouvertes par des formations méso-cénozoïques plus jeunes formant l'unité du Bassin de Mons. Cette structure en bassin est étirée sur une quarantaine de kilomètres selon une direction est-ouest et s'étend en moyenne sur une dizaine de kilomètres du nord au sud. L'épaisseur très variable des dépôts peuvent atteindre jusque 400 m par endroits et sa base se caractérise par une géométrie singulière constituée de "caves" et de "dômes" témoignant du résultat d'un processus de subsidence karstiques et tectoniques complexe [Dupont 2021].

Cette géologie particulière de subsurface qui comporte *a priori* des terrains plus lents que ceux des terrains encaissants du Paléozoïque a été représentée sur la coupe géologique détaillée le long d'un profil sismique à la fig. 1. Pour ce faire, les cartes géologiques et géotechniques, ainsi que des sondages belges et français projetés le long des profils (également représentés sur la fig. 1) ont été employés. Cette coupe géologique permet d'illustrer la géologie superficielle et les faciès rencontrés le long de la direction des lignes afin de, par exemple, situer les zones de plaine alluviale où la concentration en alluvions est importante, les poches de sable et de craie ainsi que les limites des unités structurales principales (Bassin de Mons, Parautochtone et Allochtone).

Problématique régionale concernant l'imagerie sismique

Ce contexte géologique complexe impacte fortement l'imagerie sismique et limite le potentiel et l'intérêt des acquisitions. De prime abord, les structures fortement plissées et accidentées rencontrées dans les terrains de l'Allochtone ardennais représenteraient le principal défi pour l'imagerie sismique. Dans les faits, cette imagerie rencontre également des difficultés dans les terrains plus tabulaires du Parautochtone brabançon. En effet, une perte quasi totale du signal est enregistrée dans la zone située au nord de l'émergence de la Faille du Midi sur chacun des profils sismiques 2D des campagnes d'acquisition citées ci-avant.

Selon [Dupont 2021, Dejonghe et al. 1992], cette incapacité à imager correctement les structures profondes situées sous le Bassin de Mons tirerait son origine de la présence en profondeur d'un nombre important d'anciennes exploitations minières et d'une zone fortement urbanisée. Néanmoins, ces deux critères ne sont pas systématiquement rencontrés dans la zone où la qualité des sections sismiques diminue.

Une autre hypothèse étudiée ici est l'influence des terrains méso-cénozoïques superficiels du Bassin de Mons qui engendrerait des problèmes importants de statique et de modélisation des vitesses de sommation sous le *datum* sismique (DP). La présence de ce bassin créerait notamment d'importantes erreurs lors de l'addition entre les rais sismiques ayant traversés, ou non, ces terrains. En effet, la morphologie du Bassin de Mons dont les bordures présentent un fort pendage, ainsi que les forts contrastes de vitesses observés entre les formations méso-cénozoïques du Bassin de Mons et les formations paléozoïques sous-jacentes entraînent des difficultés d'addition dans un traitement en temps classique. La profondeur (oscillant entre la surface et 400 m de profondeur) et la géométrie du Bassin de Mons entraînent une double difficulté dans une approche conventionnelle d'un traitement sismique. Ce problème, déjà observé et étudié dans d'autres contextes géologiques [Miquelis et al., 2016 ; Miquelis et al., 2019], a montré que ces difficultés d'addition ne pouvaient être palliées par des approches de traitement de type PSDM ou FWI, principalement en raison de la tranche de profondeur (faible profondeur/courts offsets) des séries géologiques présentant ces importants contrastes de vitesses. De même, une approche conventionnelle des corrections statiques de surface intégrant LVL, carottages VT ou encore pointé de first breaks, ne permet pas en général de corriger de manière satisfaisante ces contrastes de vitesses. Cela est d'autant plus vrai dans les zones où la profondeur du Bassin de Mons tend à augmenter ou encore sur les zones de bordure du Bassin où la densité des points de contrôle ne permet pas systématiquement d'en préciser la géométrie.

Ces problèmes nécessitent alors d'aborder le traitement sous un autre angle, en essayant d'y intégrer un modèle géologique de vitesse du bassin de Mons sous forme de corrections statiques « profondes » dont la méthode a pu déjà prouver son apport dans des contextes équivalents.

Intégration multiphasée de la géologie de surface dans les étapes de traitement

La construction du modèle de corrections statiques primaires suit une démarche itérative et innovante dans le secteur d'étude, basée sur l'étude géologique détaillée des profils et sur l'analyse de stacks à vitesse constante (CVS), mise en œuvre récemment dans des configurations analogues [Miquelis et al., 2019 ; Do Couto et al., 2024].

Dans un premier temps, une approche classique des corrections statiques [Hanot et al., 1992] vise à corriger les variations de vitesse de proche surface à la faveur d'un modèle géologique multicouche intégrant l'ensemble des informations disponibles (cartes géologiques, forages, LVL). Cette approche permet notamment de maîtriser les poches lentes que peuvent constituer certains dépôts superficiels (poches de sable, alluvions et colluvions, tourbières, etc.). Elle permet également une correction de moyenne longueur d'onde par l'intégration de la partie superficielle des dépôts crayeux du Bassin de Mons dans la limite des profondeurs bien représentée par les forages existants (une centaine de mètres en moyenne).

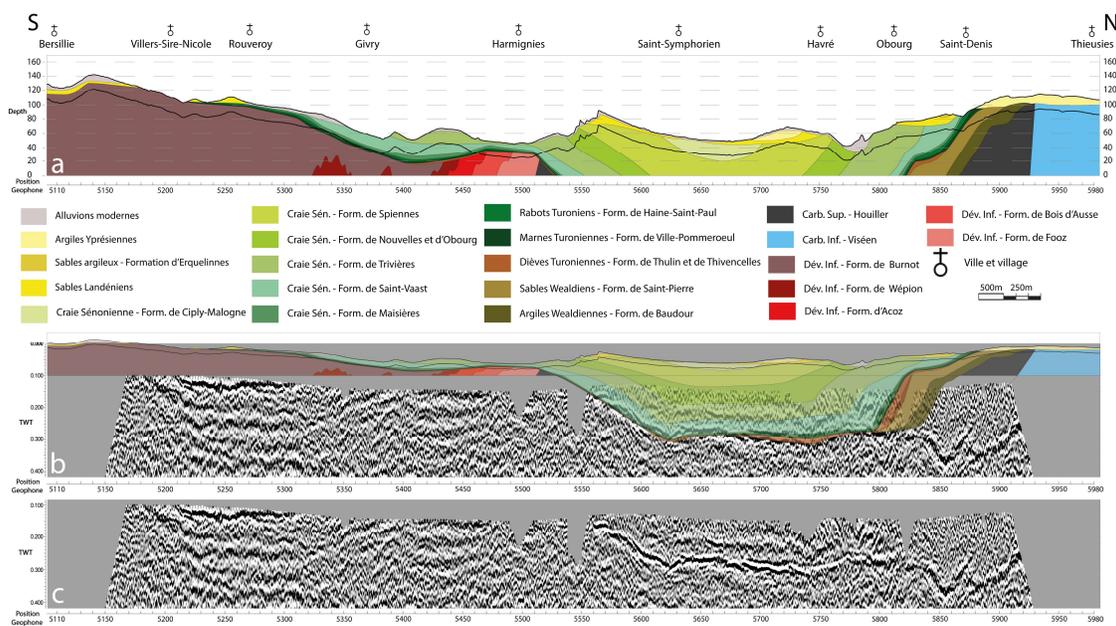


Fig. 1 – Coupe géologique réalisée le long du profil 1905 de la campagne Hainaut2019 (a). Sections sismiques obtenues après addition à vitesse de sommation constante de 2500 m/s en vis-à-vis (b) ou non (c), de la coupe géologique prolongée jusque la base du Bassin de Mons.

Dans un deuxième temps, la mise à jour du modèle de corrections statiques « profondes » vise à intégrer les hétérogénéités verticales et latérales qu'engendrent des dépôts crayeux profonds du Bassin de Mons. Ces statiques « profondes » s'appuient sur une cartographie précise le long des profils 2D de la partie basale du bassin de Mons ainsi que sur les vitesses associées des formations géologiques le caractérisant. Cette étape s'appuie à la fois sur les données de forages rencontrant le toit du Paléozoïque et l'analyse des stacks à vitesses constantes (CVS) mettant en évidence des réflecteurs s'apparentant aux bases du Thanétien et du Mésozoïque du Bassin de Mons (cf. fig. 1). Cette approche a également permis d'observer une différence significative dans les vitesses de tranches de la craie mésozoïque (2500 m/s) et des sédiments thanétiens (1700 m/s) relativement aux formations encaissantes dévono-carbonifères (4000 m/s). De ce travail a donc résulté le calcul de statiques profondes appliquées aux positions points de tirs et géophones, en sus des corrections statiques de surface initialement calculées.

Appliqué à la ligne L1905 et L1903, la construction de ce type de modèle statique a permis d'améliorer fortement le résultat. Sa comparaison avec les stacks construits sur base d'un modèle

topographique avec d'une vitesse de correction unique et d'un modèle reprenant les résultats d'une campagne LVL a permis d'illustrer les zones où la géologie de surface détériore le signal.

Cette approche a permis également d'affiner l'approche des vitesses NMO et de migration et de renforcer la qualité de l'addition. En effet, la construction du modèle de vitesse de sommation s'est à nouveau basée sur l'analyse des CVS et sur les données de forages en accordant une attention particulière à la cohérence du modèle de vitesse avec la géologie profonde et de subsurface. Notamment, les variations d'épaisseur de sables et de craies ont démontré un impact clair sur le champ de vitesse en profondeur et leur prise en compte permet de récupérer la continuité de certains réflecteurs. Il apparaît également que la création d'un tel modèle de vitesse limite l'introduction de bruits de migration lié à des lois de vitesses mal affinées.

CONCLUSIONS

L'objectif principal étant la valorisation des données de sismique réflexion, la prise en compte de la géologie de surface dans les étapes préliminaires de traitement a prouvé son intérêt suite à une nouvelle qualité d'imagerie bien supérieure à celle résultant des anciens traitements. Ces étapes généralement fortement simplifiées, se justifient pleinement ici puisque les faciès sismiques sont bien mieux exprimés sur l'image obtenue. Certains réflecteurs apparaissent d'ailleurs pour la première fois sous le Bassin de Mons tandis que ceux déjà apparents dans les anciens traitements sont désormais plus continus et sur une plus large distance. C'est pourquoi finalement, la prise en compte de la géologie de proche surface est primordiale puisqu'elle permet d'améliorer grandement les résultats après sommation et migration.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELANGER I., DELABY S., DELCAMBRE B., GHYSEL P., HENNEBERT M., LALOUX M., MARION J., MOTTEQUIN B., PINGOT J., 2012 - *Redéfinition des unités structurales du front varisque utilisées dans le cadre de la nouvelle Carte géologique de Wallonie (Belgique)*. *Geologica Belgica*, 15, 169-175.

DEJONGHE L., DELMER A., HANCE L., 1992 - *Les enseignements d'une campagne sismique conduite en Belgique, dans le Hainaut, selon l'axe Erquelines-Saint-Ghislain*. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 1(2) :135-142.

DO COUTO D., CUSHING E.M., MOCOCHAIN L., RUBINO, J-L, MIQUELIS F., HANOT F., FROMENT, B. GELIS C., CAMUS H., BAGAYOKO N., BELLIER O., 2024- *Messinian canyons morphology of the Rhône and Ardèche rivers (south-east France): new insights from seismic profiles*. *BSGF- Earth Science Bulletin* 2024, 195, 19

DUPONT N., 2021 - *Analyse de la structure du socle paléozoïque hainuyer. Implications sur les caractéristiques des réservoirs profonds*. Thèse de Doctorat, Université de Mons, Faculté Polytechnique Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, Belgique, 374 pp.

HANOT F., 1992 - *Seismic applications of a Paris Basin shallow geology databases*. *FIRST BREAK VOL 10, NO 5, MAY 1992/175*

MIQUELIS F., HANOT F., VICELLI J., PICORNELL V, 2016 - *Diagénèse de la Craie: application sismique*. *RST Caen*.

MIQUELIS, F., POULIQUEN, S., HANOT, F., 2019- *Apport de la modélisation géologique de corrections statiques profondes dans le traitement sismique en ondes P dans un contexte de paléo-canyon* . *Journées scientifiques de l'AGAP Qualité*

PETITCLERC E., VANBRABANT Y., 2011 - *Développement de la plate-forme Géothermique de la Wallonie. Rapport final. Rapport public*. Direction Générale Opérationnelle de l'Aménagement du territoire, du Logement, du Patrimoine et de l'Energie (DGO4) Département de l'Energie. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Service Géologique de Belgique, 228 pp.

Caractérisation d'une source sismique verticale à partir de mesures géophysiques expérimentales

DIDIER Quentin¹, ARHAB Slimane¹, BODET Ludovic²,
GINOUX Cyril¹, LEFEUVE-MESGOUEZ Gaëlle¹, MESGOUEZ Arnaud¹

¹Avignon Université, INRAE, UMR EMMAH, F-84000 Avignon, France.

²Sorbonne Université, CNRS, UMR METIS, Paris, France.

Résumé

Dans cet acte, nous présentons une méthode de caractérisation d'une source sismique générée par l'impact d'une massette sur une plaque en téflon, dans un contexte de sismique de surface haute résolution. Le champ des vitesses de déplacements verticaux est enregistré par des géophones disposés en cercle autour de la zone d'impact. À partir des relations de réciprocité et d'une modélisation directe par éléments finis 3D du milieu environnant, la composante verticale de la contrainte d'excitation est estimée en fréquence, puis reconstruite dans le domaine temporel par transformée de Fourier inverse. Cette approche intègre les spécificités des conditions expérimentales, comme la géométrie de l'impact, et met en évidence une variabilité des signaux reconstruits selon l'opérateur.

Mots clés : Force d'excitation, Estimation, Principe de réciprocité, Mesures sismiques de terrain, Modélisation, Éléments finis.

Abstract

In this paper, we present a method for characterising a seismic source generated by the impact of a sledgehammer on a Teflon plate, in a high-resolution surface seismic context. The vertical displacement velocity field is recorded by geophones arranged in a circle around the impact zone. Based on reciprocity relations and direct 3D finite element modelling of the surrounding environment, the vertical component of the excitation stress is estimated in frequency and then reconstructed in the time domain using inverse Fourier transform. This approach takes into account the specifics of the experimental conditions, such as the impact geometry, and highlights the variability of the reconstructed signals depending on the operator.

Key words : Excitation force, Estimation, Reciprocity theorem, Seismic field data, Simulation, Finite element.

1 Introduction

Dans un contexte de sismique haute résolution, la caractérisation des propriétés physiques de la proche surface est un enjeu majeur, notamment face aux défis liés au changement climatique, qui entraîne sécheresses et inondations, impactant non seulement la ressource en eau mais également la structure des sols. Parmi les méthodes de prospection géophysique active figure la sismique (Dangeard et al. (2021)). Dans ce cadre, l'inversion en forme d'onde complète (FWI) est particulièrement adaptée pour caractériser le sous-sol avec précision. Cependant, pour être efficace, elle requiert une connaissance fine de la source

sismique. Ainsi, caractériser cette dernière est une problématique essentielle en soi pour atteindre une imagerie haute résolution. L'ignorer reviendrait à introduire des erreurs de modèle, compromettant l'estimation quantitative des paramètres physiques d'intérêt (Fang et al. (2018)). Des approches spécifiques pour estimer le terme source sont développées dans différents domaines, on peut citer en imagerie acoustique la technique de retournement temporel qui permet de refocaliser l'onde émise à travers un milieu diffusant, restituant ainsi la signature temporelle du transducteur piézoélectrique (Fink et al. (2001)). En sismologie globale où la source est souvent un séisme, la méthode de l'adjoint est employée pour estimer le tenseur des moments au niveau de l'hypocentre (Tromp et al. (2005)). Cette question est particulièrement importante en sismique active de proche surface, car le diagramme de rayonnement de la source d'excitation recouvre fortement le domaine d'investigation qui correspond à la zone non saturée. Cette dernière d'une profondeur d'environ une dizaine de mètres, est caractérisée par une forte hétérogénéité et une nappe phréatique variable dans l'espace et le temps. Pour la sonder efficacement par des approches FWI appliquées sur des données géophysiques terrain, il est donc nécessaire d'estimer précisément l'empreinte de cette source. Ainsi, dans ce travail, nous abordons la caractérisation d'une source sismique de type coup de marteau, résultant de l'impact vertical d'une massette sur une plaque en téflon. Le champ des vitesses de déplacements verticaux est enregistré au moyen de géophones disposés sur un cercle entourant la zone d'impact. La section 2 détaille cette configuration expérimentale, le modèle direct exploité, ainsi que l'approche de caractérisation basée sur la réciprocité que nous avons développée. La section 3 présente les résultats expérimentaux que nous discuterons.

2 Configuration d'étude et Méthodologie de caractérisation de la source

2.1 Configuration d'étude

La figure 1 illustre la configuration de mesure, qui consiste en une disposition circulaire de 8 géophones verticaux de fréquence de coupure basse de 14 Hz, avec un rayon de 1.5 m. Au centre de celle-ci, une plaque en téflon de forme carrée, de dimensions 5 cm × 5 cm × 1 cm, est placée au contact du sol et frappée manuellement avec une massette de 0.5 kg. Ces mesures ont été réalisées sur la parcelle agricole dite "Lysimètre" du site Saint-Paul INRAE-Avignon. Celle-ci sert de site de référence pour éprouver de nouvelles méthodes de traitement des données géophysiques. En effet, elle a bénéficié ces dernières années d'études géotechniques approfondies et est équipée de piézomètres permettant le suivi du niveau de la nappe phréatique. Nous y avons également mené des campagnes de mesures sismiques, ERT et GPR. Située à proximité de la rivière Durance, son sol est principalement argilo-sableux sur les premiers mètres, avant d'atteindre une interface marneuse qui joue le rôle de mur de la nappe.

2.2 Méthodologie de caractérisation de la source

Nous avons fixé le rayon du cercle de mesure à 1.5 m, car cette distance est à la fois suffisamment grande pour éviter la saturation des géophones et suffisamment petite pour isoler le trajet direct des ondes. De plus, cette distance, combinée à notre méthodologie de caractérisation qui moyenne les données des différents géophones, rend valide l'hypothèse d'un milieu homogène, défini par ses deux vitesses et sa densité. La vitesse des ondes de compression a été estimée à 400 m.s^{-1} en pointant les premiers temps d'arrivée, tandis que

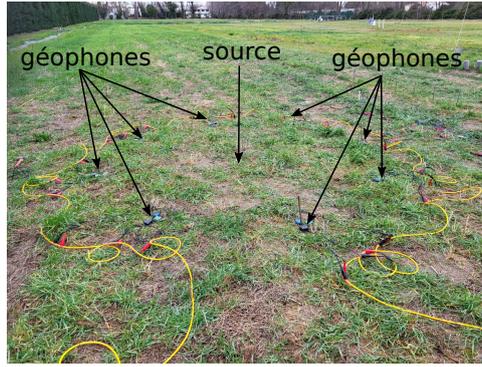


FIGURE 1 – Configuration expérimentale

celle des ondes de cisaillement a été évaluée à 200 m.s^{-1} par traitement d'ondes de surface. Enfin, nous avons estimé une masse volumique de 1500 kg.m^{-3} à partir des précédentes études géotechniques. L'équation de propagation du champ des déplacements \mathbf{u}_r à résoudre dans ce contexte est la suivante :

$$\rho\omega^2\mathbf{u}_r + \mu\Delta\mathbf{u}_r + (\lambda + 2\mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u}_r = \boldsymbol{\sigma}_s \delta_s \quad (1)$$

avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation, ρ la masse volumique, λ et μ les deux paramètres de Lamé définis par $v_p^2 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho}$ et $v_s^2 = \frac{\mu}{\rho}$, et $\boldsymbol{\sigma}_s \delta_s$ la densité volumique de force, à laquelle nous attribuons une géométrie plane au moyen de la distribution surfacique de Dirac δ_s . Nous avons choisi de résoudre cette équation par la méthode des éléments finis *via* l'utilisation du logiciel de modélisation COMSOL Multiphysics[®]. Notre méthodologie de caractérisation de la source a pour objectif de déterminer, pour chaque pulsation ω , l'amplitude $\boldsymbol{\sigma}_s(\omega)$, en connaissant les paramètres de Lamé obtenus à partir des valeurs des vitesses et de la masse volumique, et en introduisant les informations connues sur la position et les dimensions de la plaque en téflon à travers le terme δ_s . Pour ce faire, nous commençons par introduire le principe de réciprocité :

$$\mathbf{u}_r(\mathbf{r}_v) \cdot \boldsymbol{\sigma}_v = \int_S \mathbf{u}_v(\mathbf{r}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_s d\mathbf{r} \quad (2)$$

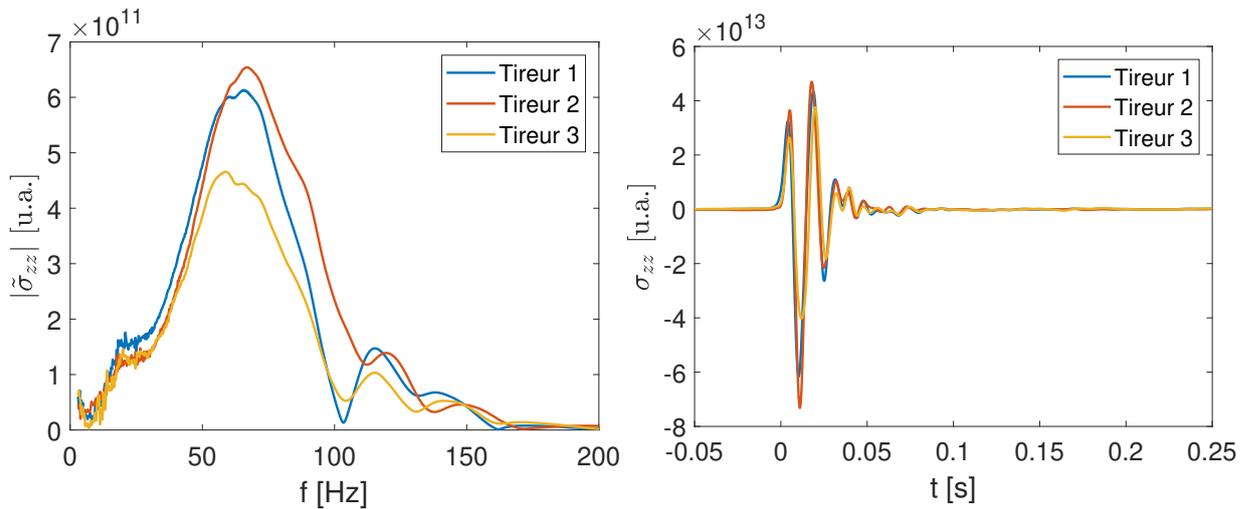
entre le champ réel mesuré sur les géophones solution de l'équation 1, et un champ fictif \mathbf{u}_v d'une configuration virtuelle, solution d'une équation similaire mais de terme source $\boldsymbol{\sigma}_v \delta_{\mathbf{r}_v}$. La distribution de Dirac ponctuelle $\delta_{\mathbf{r}_v}$ positionne ce dernier au niveau du géophone v . Nous choisissons de considérer $\boldsymbol{\sigma}_v = \mathbf{e}_z$ et de supposer $\boldsymbol{\sigma}_s = \tilde{\sigma}_{zz}(\omega)\mathbf{e}_z$ avec \mathbf{e}_z le vecteur unitaire ascendant. L'équation 2 moyennée sur les 8 géophones permet d'extraire :

$$\tilde{\sigma}_{zz}(\omega) = \frac{1}{8} \sum_{v=1}^8 \frac{\mathbf{u}_r(\mathbf{r}_v) \cdot \mathbf{e}_z}{\int_S \mathbf{u}_v(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}_z d\mathbf{r}} \quad (3)$$

qui représente l'amplitude complexe du terme source de contrainte verticale évaluée dans l'espace de Fourier.

3 Résultats expérimentaux

En parcourant toutes les fréquences dans le domaine de Fourier [3; 200] Hz, qui correspond à la fonction de transfert des géophones exploités, nous parvenons à reconstituer l'ensemble du spectre de la source d'excitation ainsi que sa signature temporelle.



Ici les valeurs importantes de la contrainte verticale $\tilde{\sigma}_{zz}$ et σ_{zz} sont dues au fait que les mesures exploitées sont proportionnelles aux véritables vitesses de déplacements. Comme nous pouvons le voir, l'impact de la massette est proche d'un Ricker centré autour de 65 Hz. Nous retrouvons également l'apparition d'un bruit entre 3 et 20 Hz dû à la fréquence de résonance de 14 Hz des géophones. Un second pic centré autour de 125 Hz est parfois observé, bien que sa présence dépende de l'opérateur réalisant l'impact et correspond à la non maîtrise du coup. Enfin, ces résultats ont été comparés à la méthode classique d'extraction de l'ondelette source avec un très bon accord entre les deux. Par ailleurs, la masse de la source n'a que peu d'impact sur la forme temporelle et spectrale de la source hormis l'amplitude maximale, les variabilités proviennent majoritairement du type de frappe ou de source.

4 Conclusion et perspectives

A travers une configuration de mesure facile à mettre en œuvre, notre méthodologie basée sur le principe de réciprocité, permet de remonter au signal temporel de la source d'excitation. Nous envisageons d'élargir notre approche pour remonter à l'ensemble des termes du tenseur des contraintes en surface.

Références

- Dangeard, M., Rivière, A., Bodet et *al.*, 2021 - River corridor model constrained by time-lapse seismic acquisition. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028911, doi : <https://doi.org/10.1029/2020WR028911>.
- Fang, Z., Wang, R., Hermann, F.J., 2018 - Source estimation for wavefield-reconstruction inversion. *Geophysics*, 83(4), 345–359, doi : <https://doi.org/10.1190/geo2017-0700.1>.
- Fink, M., Prada, C., 2001 - Acoustic time-reversal mirrors. *inverse Problems*, 17(1), R1. IOP Publishing.
- Tromp, J., Tape, C., Liu, Q., 2005 - Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels. *Geophysical Journal International*, 160(1), 195–216, doi : [10.1111/j.1365-246X.2004.02453.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02453.x).

IMAGERIE DE PROCHE SURFACE D'UNE FAILLE ACTIVE – EXEMPLE D'INVERSION STOCHASTIQUE CONJOINTE DE DONNÉES ÉLECTRIQUES, SISMQUES, GRAVIMÉTRIQUES ET TOPOGRAPHIQUES

GAUTIER M.¹, GAUTIER S.², CATTIN R.²

¹ Département de Géosciences, Mines Paris - PSL, PSL Université, Paris, France

² Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, UMR 5243, Montpellier, France

maxime.gautier@minesparis.psl.eu, stephanie.gautier-raux@umontpellier.fr, rodolphe.cattin@umontpellier.fr

RESUMÉ

Les méthodes électriques, sismiques et gravimétriques sont couramment employées pour imager les structures de proche surface. Séparément elles fournissent des images dont l'interprétation reste souvent délicate. Des inversion jointes peuvent alors être proposées pour tirer le meilleur parti de leur complémentarité en termes de sensibilité et de profondeur d'investigation. Cette étude présente une inversion stochastique jointe de données géophysiques (électrique, sismique, gravimétrique) et géomorphologiques (topographie) pour l'imagerie de proche surface d'une faille active au sud du Bhoutan.

Mots clés : Inversion conjointe, ERT, Sismique, Gravimétrie, Géomorphologie, Imagerie proche surface

ABSTRACT

Electrical, seismic, and gravimetric methods are commonly used to image near-surface structures. Applied separately, these methods can produce images that are difficult to interpret. In contrast, joint inversions leverage the complementary strengths of these methods in terms of sensitivity and depth of investigation, resulting in a more robust image. This study presents an example of stochastic joint inversion that combines geophysical data (electrical, seismic, and gravimetric) with geomorphological data (topography) for near-surface imaging of an active fault in southern Bhutan.

Keywords: Joint inversion, ERT, Seismic, Gravimetry, Geomorphology, Near-surface imagery

INTRODUCTION

Les terrasses alluviales sont d'une importance capitale pour l'étude et l'évaluation de l'aléa sismique. En effet, en se déformant lors des séismes, ces objets géomorphologiques permettent une estimation du taux de glissement le long des failles actives. Cette estimation nécessite cependant une connaissance de l'âge de la terrasse, du déplacement vertical cumulé et de la géométrie de la faille étudiée. De nombreuses études se basent sur des mesures de pendage faites en surface en considérant une géométrie plane en profondeur. Cette approximation forte peut parfois conduire à une évaluation erronée de l'aléa sismique (Drukpa et al., 2018). Il est donc nécessaire de caractériser la géométrie des failles en profondeur et d'identifier de possibles variations de pendage afin de discuter au mieux de l'accommodation de la déformation par ces structures. Pour cela des méthodes géophysiques sont couramment employées. Parmi elles, se trouvent des méthodes particulièrement adaptées à la proche surface (< 300 m) telles que la tomographie de résistivité électrique (ERT) et de sismique réfraction (SRT), ainsi que la microgravimétrie. Ces approches donnent accès aux distributions des propriétés physiques (résistivité électrique, vitesse des ondes sismiques, densité) dans le sous-sol dont l'interprétation des valeurs et des contrastes permet d'en caractériser la structure.

La région de Sarpang au sud du Bhoutan, à l'est de l'Himalaya (Fig. 1) est affectée par le chevauchement topographique frontal (TFT) qui au cours des derniers siècles a généré des séismes majeurs (Le Roux-Mallouf et al., 2016). Durant la dernière décennie, cette zone a fait l'objet de plusieurs campagnes de terrain incluant des observations géomorphologiques et structurales, de l'échantillonnage pour des datations et l'acquisition de données géophysiques de proche surface (ERT, SRT, microgravimétrie). Le TFT à l'affleurement présente un pendage de 25°N. Différentes générations de terrasses, déformées par l'activité de cette faille sont également présentes. Le traitement des données géophysiques montre clairement deux compartiments aux propriétés physiques contrastées dont l'interface est interprétée comme la trace de la faille en profondeur. Par ailleurs, de nouvelles données topographiques haute résolution montrent des variations de déplacements verticaux qui peuvent être associées à des variations géométriques du TFT en profondeur. L'objectif de cette étude est de proposer une approche préliminaire

basée sur une inversion conjointe de toutes ces données afin de mieux caractériser la géométrie de la faille de la surface jusqu'à 350 m de profondeur.

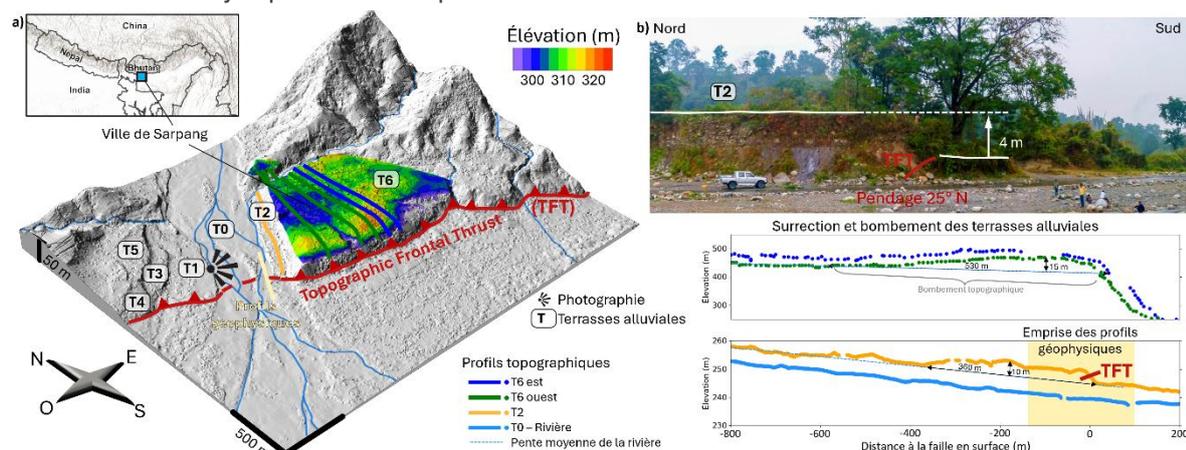


Figure 1 a) Sarvang et ses terrasses alluviales recoupées par la faille. b) Vue sur la terrasse T2 et profils topographiques (T2, T6, rivière), la couleur correspond aux tracés sur le modèle numérique de terrain de droite.

DONNÉES DISPONIBLES

Données de géophysique de proche surface

Sur le site de Sarvang, des données géophysiques de trois types ont été acquises le long de profils perpendiculaires à la trace de la faille en surface (Drukpa et al., 2018) (Fig. 1). Six profils ERT (Wenner et dipôle-dipôle) composés de 48 électrodes espacées de 1, 2, 5 et 5 m constituent un jeu de 4 419 mesures de résistivité apparentes le long d'un même profil. Un profil de sismique réfraction de cinq lignes de 24 géophones espacés de 1 m avec un recouvrement de 4 géophones a permis de récolter 4 954 mesures de temps d'arrivée des ondes P le long d'un profil de 147 m de long. Enfin, un profil de 139 mesures gravimétriques a été réalisé. Ces mesures ont ensuite été converties en anomalie de Bouguer complète reflétant les contrastes de densité dans le sous-sol.

Données géomorphologiques sur les terrasses alluviales

Un modèle numérique de terrain haute résolution obtenu par tri-stéréo-photogrammétrie à partir d'images satellitaires Pléiades panchromatiques à 50 cm de résolution permet d'obtenir des profils topographiques le long des profils géophysiques au niveau actuel de la rivière, sur les terrasses T2 et T6 (Fig. 1). Les terrasses alluviales T2 et T6 sont respectivement datées à $1\,550 \pm 70$ ans et $6\,400 \pm 1\,300$ ans (Berthet et al., 2014 ; Le Roux-Mallouf et al., 2016). En plus de leurs pentes moyennes elles présentent un bombement topographique de 530 m de large et de 15 m d'amplitude pour T6 et de 360 m de large et de 10 m d'amplitude pour T2. Ce bombement topographique peut s'expliquer par la géométrie variable du plan de faille en profondeur (Gautier et al., 2024).

MÉTHODE

Les données géophysiques ERT et SRT sont classiquement inversées par des méthodes itératives sur un maillage (Günther et al., 2006). Ces méthodes impliquent une régularisation via un lissage qui a pour conséquence de rendre imprécise la position d'un contraste de résistivité ou de vitesse sur une image et donc la localisation des contours des structures du sous-sol. À cause de ce lissage, ces méthodes d'inversions sont peu adaptées aux données gravimétriques qui sont sensibles à la localisation des contrastes de densité. Enfin, les données topographiques peuvent être interprétées à l'aide de modèles de dislocation élastique (Nikkhoo et Walter, 2015) qui se caractérisent par une forte réponse non-linéaire à la géométrie des failles. Associer l'ensemble de ces multiples méthodes dans une même inversion est donc un défi méthodologique important, qu'une approche stochastique peut permettre de relever.

Inversion conjointe par approche stochastique

La méthode d'inversion stochastique développée consiste à tester plusieurs géométries de failles (Gautier et al., 2024) et paramètres physiques (résistivité, vitesse, densité) afin d'expliquer conjointement les données ERT, SRT, gravimétriques et topographiques (Fig. 2a). Elle repose sur la modélisation directe pour obtenir des données synthétiques qui sont ensuite comparées aux données de terrain. L'évaluation de chaque modèle pour un type de données se fait par le calcul de la vraisemblance normalisée L_N . L'approche proposée ici comporte donc quatre vraisemblances L_N^{ERT} , $L_N^{Sism.}$, $L_N^{Grav.}$ et $L_N^{Topo.}$ et leur produit conduit à une vraisemblance totale $L_N^{tot.}$ permettant de classer les modèles selon leur capacité à expliquer les observations en prenant en compte de façon équivalente chaque jeu de données. Cette approche ne nécessite pas de lissage et n'introduit pas d'a priori entre les paramètres géophysiques (loi d'Archie, de Wyllie ou de Gardner par exemple). Enfin cette approche permet, d'éviter les minimums locaux si suffisamment de jeux de paramètres sont testés.

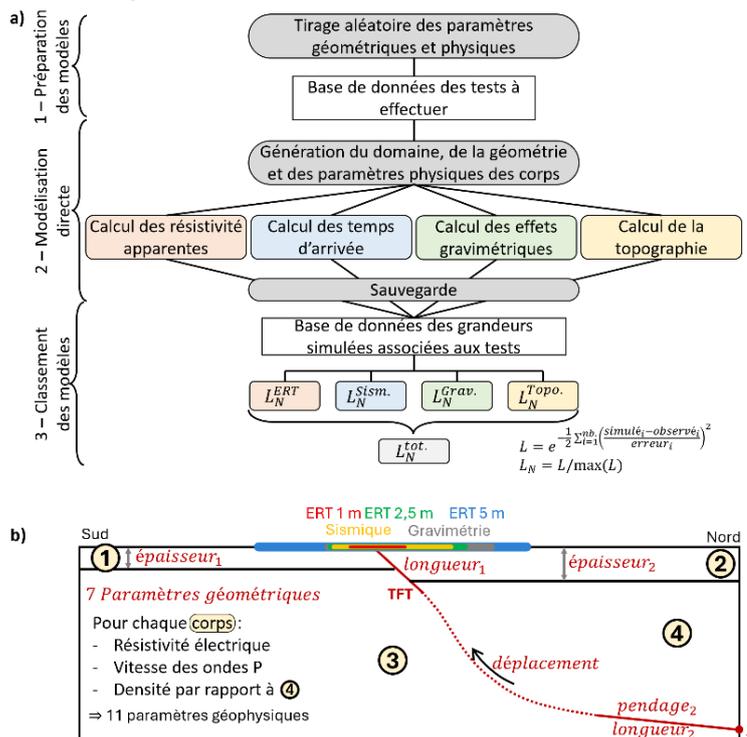


Figure 2 a) Workflow de l'inversion stochastique conjointe. b) Paramétrisation du modèle en termes de géométrie et de paramètres géophysiques.

Paramétrisation

La géométrie a priori et les bornes d'exploration des paramètres du modèle sont basées sur les études déjà existantes qui distinguent 4 corps séparés par une faille (Drukpa et al., 2018 ; Le Roux-Mallouf et al., 2020 ; Gautier et al., 2024) (Fig. 2b). L'ensemble du modèle présente 18 paramètres qui sont tirés selon une loi uniforme. Un million de modèles sont testés, puis évalués.

RÉSULTATS

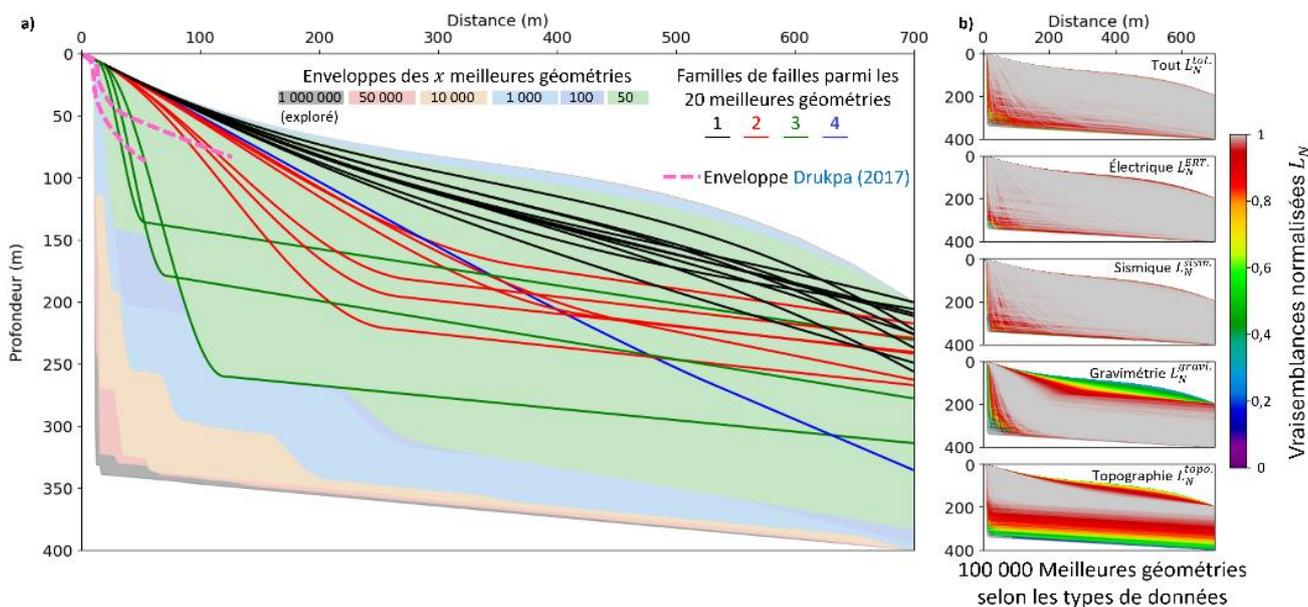


Figure 3 : a) Enveloppes et familles des meilleures géométries. b) Vraisemblances normalisées totale et par type de données. Les meilleurs modèles ont une vraisemblance qui tend vers 1.

Cette première inversion conjointe de données géophysiques et topographiques permet d'obtenir une image plus profonde (350 m) que les données de géophysique de proche surface seules (< 50 m). L'adjonction de données topographiques permet l'ajout d'information contraignant les segments de faille profonds et à plus grande échelle. Le classement des modèles selon $L_N^{tot.}$ permet de tracer les enveloppes des meilleures géométries de failles (Fig. 3a). Malgré la diversité des méthodes utilisées, la géométrie de la faille reste globalement mal contrainte. Cependant, quatre familles de géométrie se distinguent parmi les 20 meilleurs : (1) failles relativement superficielles avec pendage faible et constant ; (2) failles à pendage moyen puis sub-horizontaux à partir de 150-200 m de profondeur ; (3) failles à pendage sub-verticaux puis sub-horizontaux et (4) faille à pendage moyen et constant sur tout le domaine d'étude. Les géométries (2) et (3) (Fig. 3a), montrent de fortes variations de pendage. Elles sont cohérentes avec les travaux de Drukpa et al. (2018) et de Gautier et al. (2024) et sont les plus probables. Les modèles peuvent également être classés par méthode (Fig. 3b). L'ERT et SRT caractérisent la très proche surface (< 50 m) et ne permettent pas de contraindre les profondeurs plus importantes contrairement aux données gravimétriques et topographiques. Enfin, on peut noter que dans cette étude ce sont les profils topographiques les plus proches des profils géophysiques qui ont été utilisés, ils correspondent à ceux de la terrasse la plus récente (T2). Le rapport signal sur bruit de ces profils topographiques est moins bon que celui des profils de la terrasse la plus ancienne (T6) qui expriment mieux le bombement topographique lié à la géométrie de la faille.

CONCLUSION

Ces travaux ont conduit à un premier développement d'une inversion conjointe permettant de combiner des données de natures très différentes : électriques, sismiques, gravimétriques et topographiques, afin de tenter de contraindre la géométrie du Topographic Frontal Thrust à Sarpang au Bhoutan. L'approche stochastique développée, très générale, permet de tenir compte de toutes ces données, n'introduit ni lois pétrophysiques *a priori* ni lissage dans l'inversion. Cette approche est facilement réutilisable et adaptable. Il conviendrait cependant de l'améliorer afin de la rendre plus robuste en comblant le saut d'échelle entre les informations apportées par les méthodes de proche surface et les informations apportées par les données topographiques.

Ces travaux confirment les contrastes entre les paramètres physiques estimés par Drukpa et al. (2018), cependant la géométrie précise du TFT reste mal contrainte. La géométrie en plat-rampe-plat est pertinente (Gautier et al., 2024), mais des géométries alternatives sont également envisageables. Des variations de pendage sont établies : 25°N de 0 à 5 m de profondeur puis une forte verticalisation jusqu'à 50 m. Le tracé s'horizontalise ensuite mais la position de cette dernière variation de pendage reste imprécise. Des études géophysiques, ou des forages complémentaires permettraient de trancher entre les diverses possibilités du tracé de la faille en profondeur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTHET T., RITZ J.-F., FERRY M., PELGAY P., CATTIN R., DRUKPA D., BRAUCHER R., HETÉNYI G., 2014 – Active tectonics in eastern Himalaya: new constraints from the first morphotectonic study in southern Bhutan. *Geology*, (42), 427-430.
- DRUKPA D., GAUTIER-RAUX S., CATTIN R., NAMGAY K., Le MOIGNE N., 2018 – Impact of near surface fault geometry on secular slip rate assessment derived from uplifted terraces: implication for convergence accommodation across the frontal thrust in southern central Bhutan. *Geophysical Journal International* (212), 1315-1330.
- GAUTIER M., FERRY M., GAUTIER-RAUX S., Le ROUX-MALLOUF R., DRUKPA D., CATTIN R., 2024 – Deformed alluvial terraces record an excess of slip over the last few centuries on the Himalayan Topographic Frontal Thrust of central Bhutan. *Communications Earth & Environment* (5), 590.
- GÜNTHER T., RÜCKER C., SPITZER K., 2006 – Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. *Geophysical Journal International* (166), 506-517.
- LE ROUX-MALLOUF R., FERRY M., RITZ J.-F., BERTHET T., CATTIN R., DRUKPA D. 2016 – First paleoseismic evidence for great surface-rupturing earthquakes in the Bhutan Himalayas. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, (121).
- LE ROUX-MALLOUF R., FERRY M., CATTIN R., RITZ J.-F., DRUKPA D., PELGAY P., 2020 – A 2600-year-long paleoseismic record for the Himalayan Main Frontal Thrust (western Bhutan). *Solid Earth* (11), 2359-2375.
- NIKKHOO M., WALTER T., 2015 – Triangular dislocation: an analytical, artefact-free solution. *Geophysical Journal International* (201), 1119-1141.

CHEMINS D'ÉCOULEMENT D'EAUX SOUTERRAINES A L'AIDE DE SIGNAUX COMBINÉS DE POTENTIEL SPONTANÉ, DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET DE POLARISATION PROVOQUÉE

GHORBANI A.¹, REVIL A.², ZHAO X.³, MOUYEAUX A.⁴, BARRERE L.⁵, RICHARD J.^{1,2}, PEYRAS L.⁴, VAUDELET P.¹

¹ Naga Geophysics, Chambéry, France

² EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, Le Bourget-du-Lac, France.

³ College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

⁴ INRAE, UMR RECOVER, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence, France

⁵ Voies Navigables de France, Béthune, France

RESUME

Dans cette étude, trois méthodes géoélectriques-le potentiel spontané, la polarisation provoquée et la résistivité électrique-ont été utilisées avec succès pour imager l'écoulement des eaux souterraines près d'un barrage. Un modèle préliminaire d'écoulement a été développé à partir des données de polarisation provoquée sur la perméabilité et la teneur en eau. Ce modèle a ensuite été mis à jour avec les données de potentiel spontané et la conductivité électrique issue de la tomographie de résistivité. Une anomalie positive du potentiel spontané a été observée, liée à la remontée des eaux.

Mots clés : Polarisation provoquée, potentiel spontané, tomographie électrique, hydrogéophysique.

GROUNDWATER FLOW PATHS USING COMBINED SELF-POTENTIAL, ELECTRICAL RESISTIVITY, AND INDUCED POLARIZATION SIGNALS

ABSTRACT

In this study, three geoelectrical methods (self-potential, induced polarization, and electrical resistivity) were successfully combined to image groundwater flow near a dam. Initially, a preliminary groundwater flow model was developed using permeability distribution and water content from induced polarization data. This model was then updated using self-potential data, including electrical conductivity from resistivity tomography. A positive anomaly in the self-potential was observed and associated with upwelling groundwater in saturated areas.

Key words: Induced polarization, self-potential, electrical resistivity tomography, hydrogeophysics.

INTRODUCTION

Les méthodes géoélectriques, telles que la méthode du potentiel spontané (PS), la méthode de résistivité électrique (ERT) et la méthode de polarisation provoquée (PP), ont chacune contribué de manière indépendante à l'identification des fuites et à la caractérisation des schémas d'écoulement dans les barrages et les digues. Les anomalies de PS peuvent être interprétées à l'aide de techniques d'inversion géophysique, lesquelles ont été développées dans le cadre des méthodes de champ potentiel en hydrogéophysique. Récemment, les anomalies de PP, interprétées à travers des modèles pétrophysiques, ont été utilisées pour générer des images du contenu en eau, de la capacité d'échange cationique (CEC), de la surface spécifique des matériaux poreux et de la perméabilité du sous-sol (Revil et al., 2020). Étant donné que la polarisation provoquée est sensible à la perméabilité et que le PS répond à la vitesse de Darcy, la combinaison de ces deux méthodes permet d'obtenir une compréhension plus approfondie de l'écoulement des eaux souterraines. Cette étude présente une méthodologie pour l'intégration de ces approches, avec un accent particulier sur la détection et la quantification de l'écoulement des eaux souterraines en aval d'un barrage situé sur un substratum granitique.

SITE D'ÉTUDES

Le barrage de Lampy est situé dans le sud de la France, entre les villes de Toulouse et Carcassonne (Figure 1a). Il fait partie du système de développement hydraulique des Montagnes Noires destiné à alimenter le Canal du Midi en eau tout au long de l'année. Le barrage de Lampy est un barrage gravitaire (en maçonnerie). Il est composé de pierres de granite, liées avec du mortier de chaux. Le barrage mesure environ 18 mètres de hauteur au-dessus de sa fondation. Sa longueur est d'environ 140 m et sa largeur est de 5,5 m au sommet. La fondation est constituée de granite sain sur les rives, mais le granite est beaucoup plus altéré au fond de la vallée, avec la présence de sables granitiques, résultant de la désagrégation du substratum granitique. Une petite source (potentiellement une fuite) est apparue au niveau du contre-fort n°8 en 2022.

L'étude géophysique a consisté en 7 profils ERT/PP avec 48 électrodes espacées de 2 m. De plus, une étude de potentiel spontané a été réalisée dans la même zone, comprenant 336 points de mesures (Figure 1b).

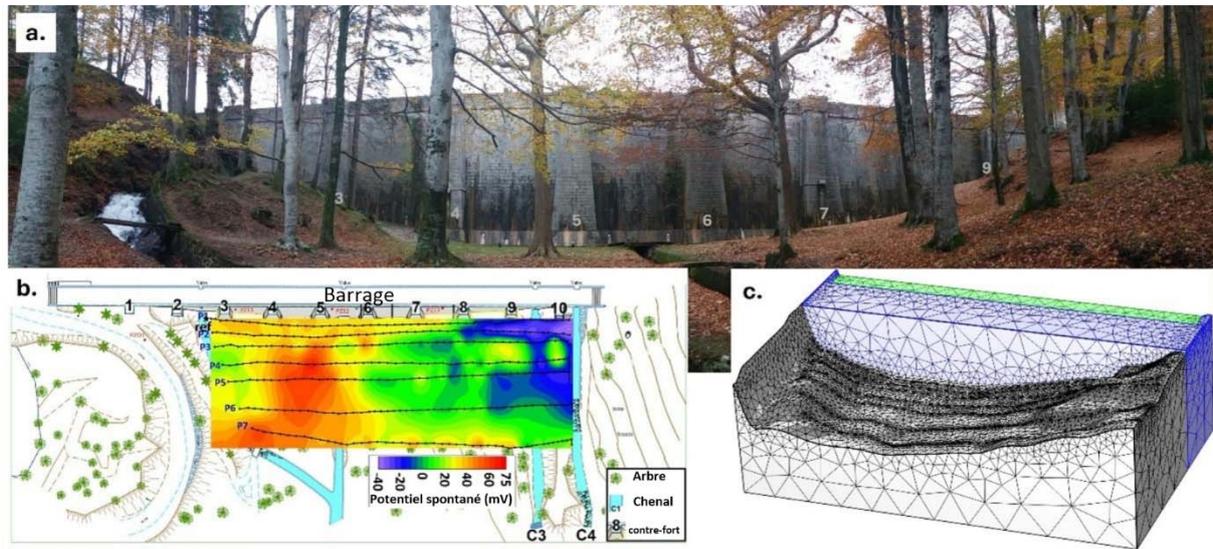


Fig. 1 – a. Le barrage de Lampy. L'image montre quelques-uns des dix contre-forts. b. La carte du potentiel spontané comprend les points de mesure du potentiel spontané et les profils ERT/PP. c. Géométrie 3D et maillage d'éléments finis utilisés pour les modélisations électriques et de Darcy.

MÉTHODES

Les tomogrammes de la teneur en eau et de la capacité d'échange cationique (CEC) peuvent être obtenus à partir des données inversées de résistivité électrique et de polarisation provoquée (par exemple, Revil 2013), ainsi que le tomogramme de la perméabilité du sous-sol (Soueid Ahmed et al., 2020).

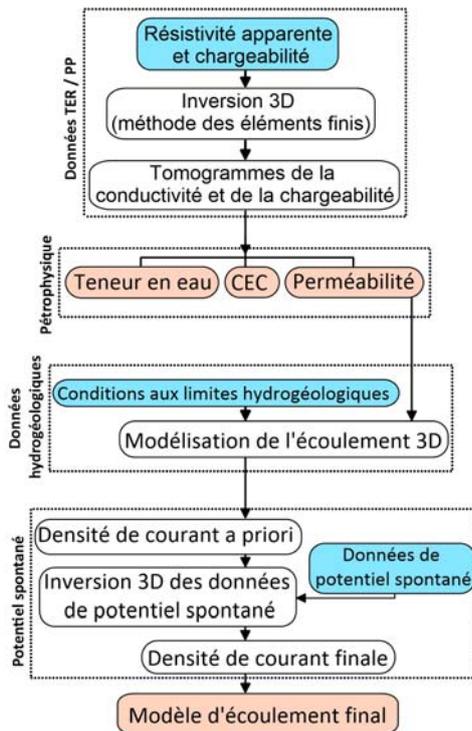


Fig. 2 – Organigramme utilisé pour déterminer l'écoulement en utilisant une combinaison de méthodes électriques.

Dans un premier temps, un modèle 3D simplifié de la zone du barrage est construit pour résoudre le modèle direct des données de résistivité et de polarisation provoquée (Figure 1c). Ensuite, ces données sont inversées avec le code d'inversion ECT-3D (Soueid Ahmed et al., 2020). Dans une troisième étape, les tomogrammes de la teneur en eau, de la CEC et de la perméabilité sont calculés. Le modèle 3D est ensuite utilisé pour résoudre l'équation de Darcy, où la perméabilité et la teneur en eau sont appliquées conjointement avec les conditions aux limites hydrauliques afin d'obtenir la distribution de la vitesse de Darcy.

L'idée principale de cette approche est qu'un modèle initial de la vitesse de Darcy (et de la densité de courant) peut être déduit de la distribution de perméabilité obtenue à partir des données de polarisation provoquée. Ce modèle d'écoulement initial puis converti en une distribution de densité de courant source a priori. Cette densité de courant initiale est mise à jour à l'aide des données de potentiel spontané, produisant ainsi une distribution de densité de courant source a posteriori, qui est ensuite utilisée pour mettre à jour le modèle d'écoulement des eaux souterraines. L'inversion des données de potentiel spontané suit la méthode de Gauss-Newton, comme suggéré par Jardani et al. (2008).

Le diagramme de flux présenté dans cet article intègre la conductivité électrique, la chargeabilité normalisée, le potentiel spontané et les conditions aux limites pour modéliser l'écoulement des eaux souterraines.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

En appliquant le modèle pétrophysique, les tomogrammes de conductivité électrique et de chargeabilité normalisée sont interprétés en termes de tomogrammes de contenu en eau, CEC et de perméabilité (Figures 3a, 3c). L'altération du granite a produit de la kaolinite et la CEC de la kaolinite se situe généralement dans la plage de 3 à 15 meq/100 g, ce qui est cohérent avec la limite supérieure trouvée dans le tomogramme de Figure 3b. Les valeurs de perméabilité varient entre 10^{-8} m² pour le conduit à haute perméabilité et 10^{-18} m² pour ce qui doit être appelé un aquitarde. La zone caractérisée par des valeurs de perméabilité élevées et des contenus en eau élevés sous forme de conduit est cohérente avec une zone où le sol est caractérisé par un degré élevé d'humidité (Zone A dans la Figure 3e). La zone juste au-dessus de la structure horizontale à faible perméabilité est connue pour canaliser l'écoulement de l'eau souterraine superficielle dans un aquifère perché vers la source. Il est important de noter que les conditions aux limites incluent une condition de pression à la limite inférieure, une condition atmosphérique à la surface du sol, et une absence d'écoulement sur les côtés. L'objectif n'étant pas de modéliser les fuites ni l'écoulement dans l'aquifère non confiné situé au-dessus de l'aquitarde. La zone de remontée de l'eau souterraine est en accord avec la zone de sol humide sur la carte de potentiel spontané.

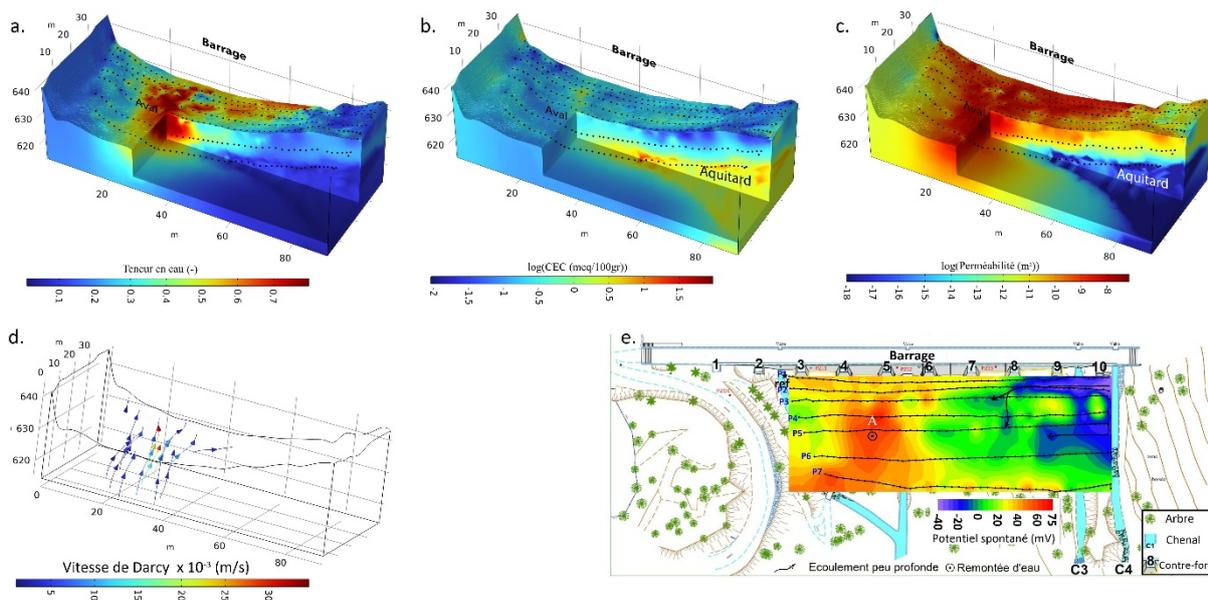


Fig. 3 – a., b. et c. Tomogrammes de la teneur en eau, de la CEC et de la perméabilité obtenus en combinant les tomogrammes de conductivité électrique et de chargeabilité normalisée. d. Directions d'écoulement. e. Carte de potentiel spontané reconstruite à partir du modèle mis à jour de l'écoulement.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail combinant les données géoélectriques de polarisation provoquée et de potentiel spontané établit un lien plus clair entre les données géophysiques et hydrogéologiques afin d'obtenir une image 3D de l'écoulement des eaux souterraines. Les recherches futures se concentreront sur l'intégration des données hydrogéologiques pour une meilleure évaluation des limites de cette méthode, une analyse approfondie des incertitudes et l'extension de cette approche. L'ensemble de cette étude est publié dans le Revil et al., 2024.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce aux résultats du projet ALCOTRA RITA financé par la Union Européenne. Nous remercions VNF pour l'accès au site.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

JARDANI A., REVIL A., BOLÈVE A., DUPONT J.P., 2008 – Three-dimensional inversion of self-potential data used to constrain the pattern of groundwater flow in geothermal fields, *Journal of Geophysical Research*, 113, B09204.

REVIL A., GHORBANI A., ZHAO X., MOUYEAUX A., BARRÈRE L., RICHARD J., PEYRAS L., VAUDELET P., 2024 – Groundwater flow paths using combined self-potential, electrical resistivity, and induced polarization signals, *Geophysical Journal International*, 239(2), 798–820.

REVIL A., SOUEID A., COPEREY A., RAVANEL L., SHARMA R., PANWAR N., 2020 – Induced polarization as a tool to characterize shallow landslides, *Journal of Hydrology*, 589, 125369.

REVIL A., 2013 – On charge accumulation in heterogeneous porous rocks under the influence of an external electric field, *Geophysics*, 78, D271–291.

SOUEID AHMED A., REVIL A., ABDULSAMAD F., STECK B., VERGNIAULT C., GUIHARD V., 2020 – Induced polarization as a tool to non-intrusively characterize embankment hydraulic properties, *Eng. Geol.*, 271, 105604.

CARTOGRAPHIE DU PERMAFROST VIA LE CLUSTERING DES DONNEES DE POLARISATION PROVOQUEE

CADET H.¹, FABRE L.¹, BISIAUX T.¹, CARRIER A.²

¹ SAGE ingénierie, Grenoble, France, h.cadet@sage-ingenierie.com

² EDF, Aix-en-Provence, France

RESUME

L'apport des prospections géophysiques, ici la polarisation provoquée, dans le cadre de la caractérisation d'un milieu potentiellement englacé dans une zone de permafrost nous a permis de catégoriser, en 3 dimensions, différentes zones du site d'étude. Les approches en intelligence artificielle, notamment la classification non-supervisée de type clustering, sont des outils prometteurs pour l'aide à la décision. Cet article présente les résultats obtenus par différentes méthodes de classification non-supervisée et notamment leurs avantages et inconvénients.

Mots clés : Permafrost, polarisation provoquée, IA, clustering

ABSTRACT

The contribution of geophysical surveys, specifically induced polarization, to characterizing a potentially ice-rich environment in a permafrost zone has allowed us to categorize different areas of the site-test in three dimensions. Artificial intelligence approaches, particularly unsupervised clustering classification, are promising decision-support tools. This article presents various clustering methods and their impact on conclusions relevant to engineering.

Key words: Permafrost, induced polarization, AI, clustering

INTRODUCTION

Dans les milieux alpins, la connaissance de la répartition du permafrost est essentielle pour le devenir des infrastructures existantes. Cet article propose une approche de prospection géophysique basée sur des mesures de polarisation provoquée et des analyses en apprentissage non-supervisé, dites de clustering. A des altitudes comprises entre 2600 et 2840 m, sur un site d'étude anonymisé, 5 profils de mesure en polarisation provoquée ont été réalisés pour mettre en valeur les zones potentiellement englacées.

DESCRIPTION

Le site d'étude

Au-dessus de 2600m, sur un versant nord-ouest, le site d'étude est principalement dans un milieu de grés et schistes avec une présence très probable de charbon. Ce site présente une géomorphologie typique de site en mouvement (fissure, bourrelet), potentiellement liée à la présence de glacier rocheux. Cependant les formes de lobes et bourrelets ont été fortement impactés par les interventions anthropiques (pistes, remblais, déblais), il est donc difficile de délimiter clairement les zones englacées. De plus, il reste délicat d'estimer la quantité de glace présente avec des observations de surface. Pour mettre en valeur la présence possible de glace en profondeur, nous avons réalisé une prospection géophysique en tomographie électrique (résistivité et polarisation provoquée).

La prospection géophysique

La tomographie de résistivité électrique (ERT) mesure la résistance du sous-sol en injectant un courant à travers des électrodes et en mesurant la tension résultante. En plus de la conduction électrolytique (i.e., classiquement observée dans l'ERT), les matériaux peuvent stocker des charges électriques. La méthode observant ce phénomène s'appelle polarisation provoquée (PP) et le

phénomène s'appelle la polarisation. Il se traduit par une variable qui est la chargeabilité (i.e. capacité d'un matériau à stocker des charges électriques de manière réversible). Cet effet génère un champ électrique secondaire, observable par la décroissance de la tension lorsqu'on coupe le courant. Les caractéristiques de la courbe de décroissance sont fondamentales pour définir l'effet de polarisation provoquée, en termes d'amplitude et aussi en termes de temps de relaxation (Gazoty et al. 2012; Martin et al. 2021). Pour nos études, la méthodologie est la même que celle décrite dans Carrier et al. 2023 : une séquence d'impulsions de courant constant et de signes opposés, est injectée dans le sol. Les chargeabilités apparentes partielles, en mV/V, sont définies en intégrant la mesure du potentiel secondaire divisée par le potentiel mesuré entre les électrodes de potentiel juste avant que le courant ne soit coupé, entre deux pas de temps.

A des altitudes comprises entre 2600 et 2840 m, sur notre site d'étude, 5 profils de mesure en tomographie électrique et polarisation provoquée ont été réalisés en automne. Cette prospection nous permet d'avoir différentes variables de mesure au niveau des profils : la résistivité, la chargeabilité et le temps de relaxation. Elles sont toutes les trois sensibles au milieu et il est délicat de les interpréter directement pour les associer à des lithologies dans le sol. L'interprétation de ces données peut être subjective, car elle varie selon l'opérateur, en particulier lorsqu'il faut mettre une limite de valeurs et estimer une variation significative. C'est pourquoi nous proposons une analyse en intelligence artificielle via l'apprentissage non-supervisé.

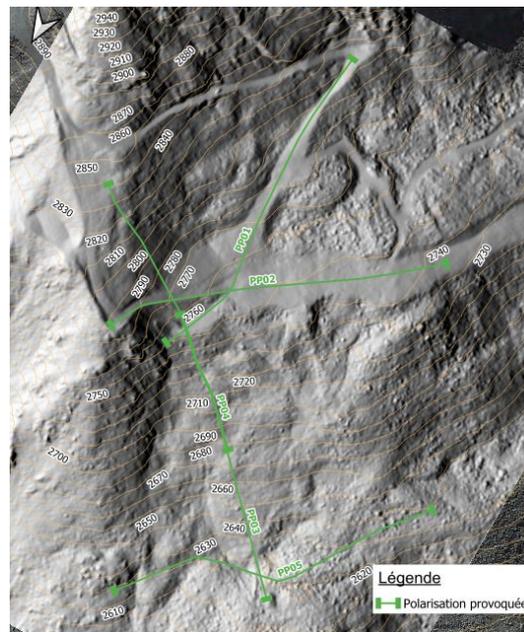


Fig. 1 – Implantation des profils PP sur le site d'étude en zone de permafrost.

ANALYSE EN IA

Comparaison du mode de clustering

L'analyse de type clustering (apprentissage non supervisé) nous permet de grouper des points de mesures selon les valeurs des variables associées (résistivité, chargeabilité, temps de relaxation). Le clustering permet de définir des groupes de caractéristiques géophysiques similaires. On choisit de fixer le nombre de cluster à 3 et d'utiliser l'approche Gaussian Mixture. On fait ensuite varier les variables utilisées et le type de normalisation (d'autres paramétrisations ont été testées mais non présentées par soucis de simplification pour cet article court). Cinq clustering sont représentés sur la figure 3 avec différents paramétrages.

L'observation de ces groupes dans l'espace (dans la figure 3, sur le profil PP05) nous permet de les associer à des lithologies potentielles. Les statistiques de chaque groupe sont aussi analysées via une représentation en boîte à moustache.

Effet du choix des clustering

Comme le montre la figure 3, le choix des variables entrant dans le clustering et le choix du type de normalisation des données influent fortement sur la répartition des groupes dans l'espace et sur leurs valeurs statistiques en terme de résistivité, chargeabilité et temps de relaxation.

- Le clustering n°1 n'est influencé que par la résistivité et n'intègre donc pas les autres variables explicatives. Il fait l'erreur de ne pas normaliser les variables d'entrée.
- Le clustering n°2 garde une forte influence de la résistivité mais montre aussi un impact de la chargeabilité.
- Le clustering n°3 et le clustering n°4 prennent clairement en compte l'influence des deux variables en gardant la résistivité au premier ordre. C'est ce qui nous paraît le plus pertinent.
- Le clustering n°5 ne propose pas de tri franc selon la résistivité, il est donc difficile d'identifier clairement la glace.

Les cas des clusterings n°3 et n°4 sont ceux qui proposent une répartition des groupes en cohérence à la fois avec les observations de surface sur le terrain et l'analyse géomorphologique et aussi avec les caractéristiques géophysiques attendues de ces milieux. La répartition du permafrost en surface est représentée par les points violets sur la figure ci-dessous et sont accord avec nos observations. Il n'y a cependant pas de forages disponibles pour valider la répartition en profondeur ce qui rend nos choix discutables. La réalisation de sondages permettrait de lever les doutes.

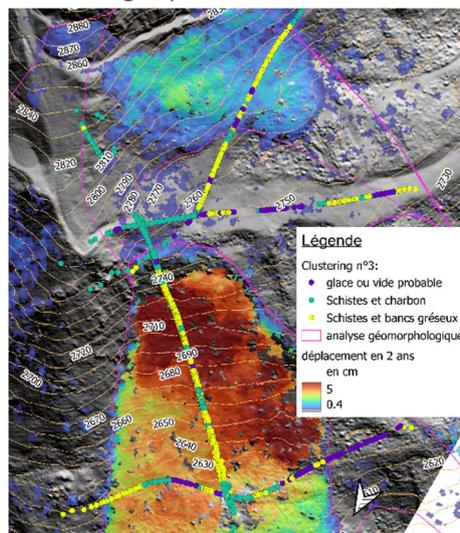


Fig. 2 – Résultats en surface du clustering n°3, analyse géomorphologique et déplacements de surface

CONCLUSIONS

Les outils de clustering sont très pertinents pour permettre de classifier des secteurs lors d'une étude de site en permafrost. Cependant, une analyse attentive de cette classification non-supervisée reste essentielle pour fournir des conclusions en adéquation avec le terrain. L'importance de considérer la résistivité comme une variable de 1^{er} ordre est ici mise en valeur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CARRIER, A., MERIC, O., BOTTELIN, P., 2023. – Characterizing landslide dynamics from time-lapse time domain induced polarization and ground-based imaging: a case study of the Montgombert landslide (French Alps). *Landslides*, 21(2), 353–369.

GAZOTY, A., FIANDACA, G., PEDERSEN J. ET AL., 2012. - Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 575–586

MARTIN, T., TITOV, K., TARASOV, A., ET AL., 2021. - Spectral induced polarization: frequency domain versus time domain laboratory data. *Geophys J Int*, 225(3), 1982–2000

Clustering	1	2	3	4	5
Variables d'entrée	Résistivité et chargeabilité	Logarithme de résistivité et chargeabilité	Résistivité et chargeabilité normalisées	Résistivité et temps de relaxation normalisés	Résistivité, chargeabilité et temps de relaxation normalisés
Représentation résistivité versus deuxième paramètre					
Profil P05 et clusters					
Boxplot					
Avantages et inconvénients	<p>⊖ Seule la valeur de la résistivité influe sur les limites entre clusters</p> <p>⊕ Glace probable en vert</p>	<p>⊖ la valeur de la résistivité influe principalement sur les limites entre clusters</p> <p>⊕ Glace probable en jaune</p>	<p>⊕ les groupes sont triés selon la résistivité en premier ordre, puis la chargeabilité en second ordre</p> <p>Glace probable en violet</p>	<p>⊕ les groupes sont triés selon la résistivité en premier ordre, puis la chargeabilité en second ordre</p> <p>Glace probable en jaune</p>	<p>⊖ Pas de tri selon la résistivité très net, difficile d'identifier la glace</p>

Fig. 3 – Comparaison de l'effet de la paramétrisation du clustering sur la répartition des groupes et leurs statistiques via des boîtes à moustache

ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DU BULBE HYDRIQUE PAR SUIVI DE LA TENEUR EN EAU DU SOL ET TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

GARCIA DE CEZAR Martina¹, GUÉRIN R.², TOMAS S.¹, LIRON F.¹, APRIN L.³, CHEVIRON B.¹

¹ G-EAU, Univ Montpellier: AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France, martina.garcia-de-cezar@inrae.fr

² Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, Paris, F-75005, France

³ Laboratory for the Science of Risks (LSR), IMT Mines Ales, 30100 Ales, France

RESUME

Une installation expérimentale a été mise en place à Montpellier, simulant un canyon urbain étroit avec des arbustes *Abelia grandiflora*. Les jardinières ont été équipées de capteurs pour analyser les effets de l'irrigation sur l'humidité du sol et l'évapotranspiration. L'étude a utilisé des capteurs d'humidité du sol et la tomographie de résistivité électrique pour évaluer la dynamique de l'eau dans les jardinières. Les premiers résultats montrent l'efficacité de la tomographie de résistivité électrique pour suivre l'infiltration d'eau, mais aussi quelques incertitudes sur l'origine des anomalies.

Mots clés : irrigation, tomographie de résistivité électrique, flux d'eau, évapotranspiration

ABSTRACT

An experimental setup was established in Montpellier, simulating a narrow street canyon with *Abelia grandiflora* shrubs. The planters were equipped with sensors to analyze the effects of irrigation on soil moisture and evapotranspiration. The study used two distinct methods to evaluate water dynamics in the planters, including soil moisture sensors and electrical resistivity tomography. Initial results show the effectiveness of electrical resistivity tomography in tracking water infiltration, but also some uncertainties about the origin of anomalies

Key words: irrigation, electrical resistivity tomography, water flow, evapotranspiration

INTRODUCTION

L'irrigation pour renforcer l'effet rafraîchissant des espaces verts en milieu urbain constitue un sujet de recherche clé (Livesley *et al.*, 2021). Cheung *et al.* (2022) ont détaillé les mécanismes physiques et énergétiques sous-jacents à cet effet de refroidissement et proposé un cadre d'aide à la décision en trois étapes : (i) évaluer l'adéquation climatique, en mettant l'accent sur les villes connaissant des saisons chaudes et sèches, où l'irrigation des espaces verts urbains est la plus bénéfique ; (ii) évaluer la disponibilité en eau d'irrigation, les villes disposant d'une ressource abondante pouvant adopter un régime basé sur le contrôle de l'humidité du sol, tandis que celles aux ressources limitées peuvent privilégier une approche axée sur la régulation de la température ; et (iii) prendre en compte les facteurs de gestion tels que les propriétés du sol, les conditions météorologiques, les types de plantes, le calendrier d'irrigation et la quantité d'eau appliquée (Coultts *et al.*, 2013).

La présente étude se concentre sur l'irrigation goutte-à-goutte de jardinières contenant des arbustes, dans une installation expérimentale reproduisant une rue. Garcia de Cezar *et al.* (2025) ont mis en évidence les limites des hypothèses classiques sur la dynamique sol-plante et proposé d'optimiser les stratégies d'irrigation en ciblant des facteurs critiques - humidité initiale du sol, durée d'irrigation, position des capteurs - selon les objectifs poursuivis (ex. : survie végétale ou accroissement de l'évapotranspiration pour rafraîchir l'environnement). Toutefois, des incertitudes subsistent quant à la position exacte des capteurs par rapport au centre du bulbe d'irrigation. Des mesures par tomographie de résistivité électrique peuvent pallier à ces incertitudes et ainsi affiner ces recommandations.

MATERIEL ET METHODES

Description du site

Afin d'évaluer l'impact de la végétalisation urbaine par l'utilisation de jardinières soumises à différents régimes d'irrigation, ainsi que leur influence sur l'évapotranspiration et le microclimat environnant, une installation expérimentale a été mise en place à Montpellier sous un climat méditerranéen. Ce dispositif reproduit un canyon urbain orienté est-ouest, aux dimensions d'une rue piétonne étroite, où

des jardinières accueillent des arbustes de l'espèce *Abelia grandiflora*, soumis à différents régimes d'irrigation. Cette espèce a été choisie pour son potentiel ornemental et sa résilience face à des conditions d'irrigation variée (limitante ou intense) (Costello et Jones, 2014 ; Reid et Oki, 2016).

Les jardinières sont instrumentées afin d'analyser les effets directs de l'irrigation sur la dynamique de la teneur en eau du sol et sur l'évapotranspiration, processus clé régulant les effets observables sur le microclimat urbain. Chaque jardinière a une largeur de 1.1 m, une longueur de 2.3 m et une hauteur de 0.9 m, assurant ainsi un volume de substrat suffisant pour optimiser la gestion de l'irrigation et observer les interactions entre substrat, plante et environnement.

La Fig. 1 illustre la répartition spatiale des capteurs installés dans les jardinières F et D. Les mesures ont été réalisées dans deux jardinières distinctes afin d'éviter toute interférence entre les méthodes de mesure utilisées. La disposition des capteurs varie selon les jardinières, notamment en raison des distances spécifiques entre les goutteurs et les sondes de teneur en eau, les tensiomètres et les thermocouples. Cette variabilité délibérée dans le positionnement des capteurs génère une diversité de cas et souligne la nécessité de procédures d'analyse et de traitement des données adaptées à chaque configuration, notamment par tomographie de résistivité électrique.

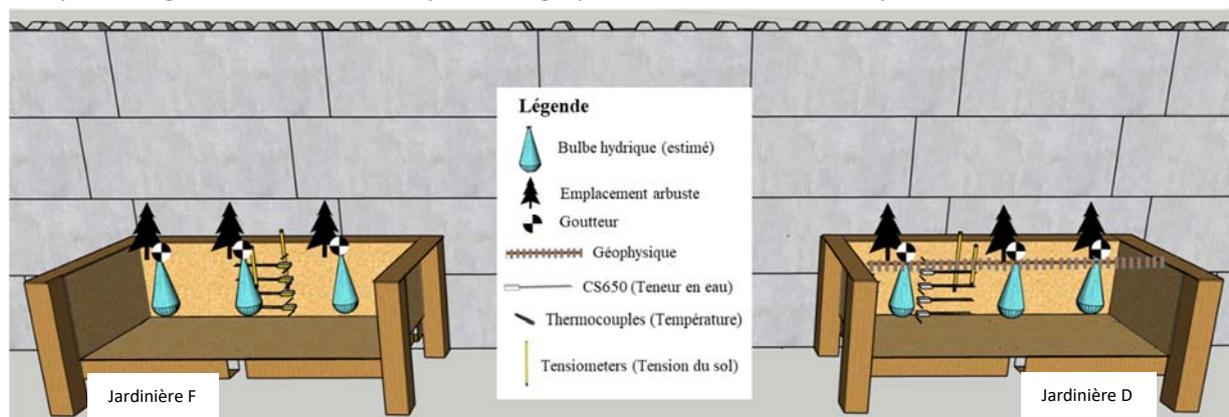


Fig. 1 - Schéma détaillé de l'intérieur des jardinières F et D, montrant la disposition des capteurs installés : capteurs de teneur en eau du sol de type CS650, thermocouples, tensiomètres et dispositif multi-électrode pour la géophysique. L'estimation de l'extension du bulbe hydrique est également indiquée. Le positionnement de chaque arbuste ainsi que des goutteurs est également indiqué dans la figure.

Campagne expérimentale et méthodologie d'analyse

L'analyse repose sur les données d'une campagne expérimentale effectuée le 11 juin 2024. Une irrigation de 30 minutes a été réalisée avec un débit de 1.9 L.h^{-1} par goutteur et par arbuste, activée de 15h à 15h30. L'objectif de cette campagne est de comprendre la dynamique de l'eau et le développement du bulbe hydrique dans les jardinières afin d'optimiser l'irrigation et d'estimer l'évapotranspiration du système.

En supposant que la dynamique du flux d'eau dans les jardinières F et D soit similaire, représentant le même phénomène (hypothèse définie dans Garcia de Cezar *et al.*, 2025), ces deux jardinières ont été évaluées à l'aide de deux approches distinctes.

Dans la jardinière F (Fig. 1), quatre capteurs de teneur en eau du sol (CS650) ont été installés horizontalement à différentes profondeurs (0.05, 0.15, 0.25 et 0.35 m) afin d'observer la dynamique spatiale et temporelle de l'humidité du sol. Ces capteurs permettent de mesurer la teneur en eau volumétrique dans une plage de 0 à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ avec une précision de 0.05%.

Dans la jardinière D (Fig. 1), la tomographie de résistivité électrique a été utilisée pour suivre l'infiltration de l'eau dans le substrat. Cette technique est classiquement employée en raison du lien entre la résistivité électrique et la teneur en eau : plus un milieu est humide, plus sa résistivité diminue en raison d'une meilleure conduction électrique du courant (Michot *et al.*, 2003). Une série de 48 mini-électrodes (diamètre 0.002 m) espacées de 0.04 m a été installée pour réaliser plusieurs tomographies avant et après l'irrigation par goutte-à-goutte.

Les mesures ont été réalisées le 11 juin 2024 à 14h26 (avant irrigation), à 15h24 (juste après la fin de l'irrigation) et à 15h54, avec un résistivimètre Syscal (IRIS Instruments). Chaque tomographie comportait 1080 mesures en configuration Wenner-Schlumberger et durait environ 25 minutes. Les tomographies ont ensuite été inversées (séparément et avec la norme L2, en considérant le milieu 2D i.e. avec un biais systématique mais identique) afin de déterminer un modèle de sous-sol cohérent avec les mesures acquises.

RESULTATS

Variation de la teneur en eau du sol

Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol dans la jardinière F sont présentés dans la Fig. 2. Il est à noter que le capteur le plus influencé par le développement du bulbe hydrique est celui situé à 0.25 m de profondeur. Dès le début de l'irrigation à 15h, ce capteur enregistre une augmentation nette de la teneur en eau du sol, atteignant un maximum vers 15h25, avant de diminuer progressivement après l'arrêt de l'irrigation.

Les capteurs situés à des profondeurs plus superficielles (0.05 et 0.15 m) ont montré une variation plus faible de la teneur en eau du sol. Cette variation n'a pas été immédiate, mais elle a été enregistrée au même moment que le pic de teneur en eau observé à 0.25 m, soit à 15h25. En revanche, le capteur installé à 0.35 m de profondeur a détecté une légère augmentation de la teneur en eau uniquement à la fin de l'irrigation, vers 15h30.

Ces résultats suggèrent une dynamique du bulbe hydrique prenant une forme principalement en goutte, avec une faible rétention d'eau dans les couches supérieures du sol et une accumulation plus marquée en profondeur, particulièrement dans la zone analysée par le capteur à 0.25 m. Toutefois, ces observations reposent sur une analyse ponctuelle de la dynamique du sol. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour confirmer ce schéma de distribution de l'eau, ainsi que pour optimiser le positionnement des capteurs, la gestion de l'irrigation et l'estimation de l'évapotranspiration de la jardinière à partir du bilan hydrique du sol.

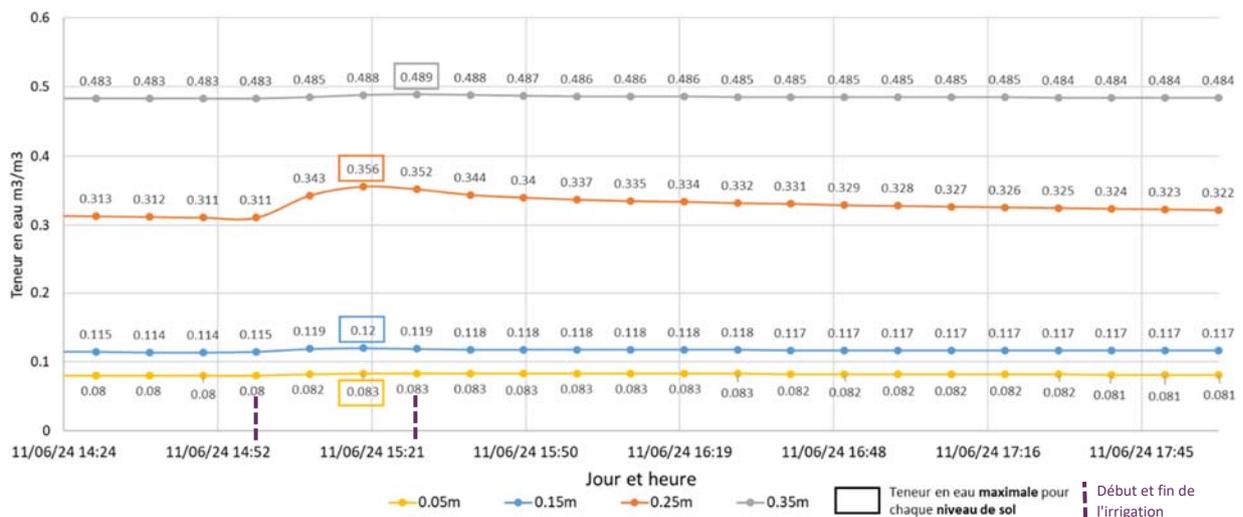


Fig 2 - Variation de la teneur en eau du sol le 11 juin 2024, de 14h24 à 18h dans la Jardinière F. Le schéma illustre les capteurs installés à 0.05 m (jaune), 0.15 m (bleu), 0.25 m (orange) et 0.35 m (gris), ainsi que les teneurs en eau maximales enregistrées et les moments de début et de fin de l'irrigation.

Imagerie géophysique

Les variations relatives de la résistivité électrique entre les inversions effectuées avant et après l'irrigation (Fig. 3) montrent majoritairement que juste après la fin de l'irrigation (Fig. 3a), la résistivité a globalement diminué (avec des valeurs négatives de la différence de résistivité et une coloration en bleu). Quelques anomalies d'augmentation de la différence (valeur positive et coloration en rouge) sont dues probablement à des artefacts numériques de l'inversion. Ensuite en peu de temps (½h), les différences de résistivité (Fig. 3b) sont moins marquées. Les contrastes les plus importants sont cette

fois liés à une augmentation de la différence (valeur positive et coloration en rouge), donc la résistivité a augmenté ce qui peut être dû à un assèchement du milieu (les plantes ayant absorbé l'apport d'eau), ou un écoulement à plus grande profondeur (en fond de jardinière).

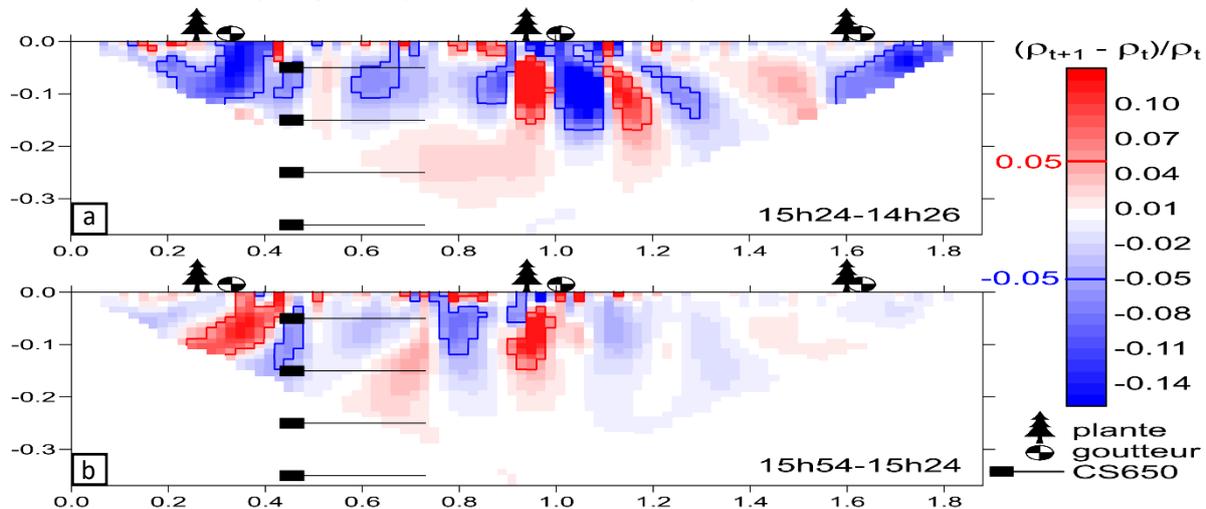


Fig 3. Différence relative de la résistivité électrique entre des tomographies effectuées (a) à 14h26 (avant irrigation), à 15h24 (juste après la fin de l'irrigation) et (b) à 15h54, dans le Jardinière D.

CONCLUSIONS

Ces premiers résultats montrent l'adéquation de la tomographie de résistivité électrique pour imaginer et suivre l'infiltration d'eau dans les jardinières. Toutefois, un affinement du traitement des données est nécessaire, en intégrant la géométrie réelle des jardinières, qui induit des conditions aux limites spécifiques, différentes de celles des mesures classiques sur demi-espace infini. Des analyses temporelles et spatiales plus complètes, combinant différentes méthodes au sein d'une même jardinière, permettront de visualiser en 3D la dynamique du bulbe d'humidité et de mieux comprendre cette zone d'étude. Cela facilitera le développement de modèles d'interprétation du sol pour une quantification plus précise de l'évapotranspiration du système et de son impact sur le microclimat local.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cheung P.K., Nice K.A., Livesley S.J., 2022** - Irrigating urban green space for cooling benefits: The mechanisms and management considerations. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 015001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7c>
- Costello L.R., Jones K.S., 2014** - *WUCOLS IV: Water use classification of landscape species* (<http://ucanr.edu/sites/WUCOLS/>). California Center for Urban Horticulture, University of California, Davis.
- Coutts A.M., Tapper N.J., Beringer J., Loughnan M., Demuzere M., 2013** - Watering our cities: The capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37(1), 2–28. <https://doi.org/10.1177/0309133312461032>
- Garcia De Cezar M., Cheviron B., Liron F., Froment G., Dejean C., Tomas S., Aprin L., 2024** - Ad hoc irrigation piloting for the urban vegetation: How to find the contextually relevant sensors and criteria? *Journal of Environmental Management*, 370, 122712. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122712>
- Livesley S.J., Marchionni V., Cheung P.K., Daly E., Pataki D.E., 2021** - Water smart cities increase irrigation to provide cool refuge in a climate crisis. *Earth's Future*, 9(1), e2020EF001806. <https://doi.org/10.1029/2020EF001806>
- Michot D., Benderitter Y., Dorigny A., Nicoulaud B., King D., Tabbagh A., 2003** - Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39, 1138. <https://doi.org/10.1029/2002WR001581>
- Reid K., Oki L.R., 2016** - Evaluation of ornamental plant performance on four deficit irrigation levels: Working with industry to promote sustainable plant choices for summer-dry regions. *Acta Horticulturae*, 1112, 155–162. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1112.22>

Modélisation d'une onde électromagnétique dans la gamme de fréquence géo-radar à l'interface air-sol

MELKA Joseph, ARHAB Slimane, LEFEUVE-MESGOUEZ Gaëlle,
ABBAS Chahine, MESGOUEZ Arnaud
Avignon Université, INRAE, UMR EMMAH, F-84000 Avignon, France

Résumé

Dans cet article, nous étudions, par une méthode semi-analytique, le comportement d'une onde électromagnétique émise par une antenne placée au dessus d'un sol supposé homogène. Cette approche s'appuie sur le formalisme intégral et introduit la fonction de Green d'un dioptre air-sol. Nous travaillons dans le domaine de Fourier et en deux dimensions spatiales. Nous traitons les deux cas de polarisations fondamentales et confrontons avec succès nos résultats numériques avec ceux produits par une modélisation utilisant la méthode des éléments finis. Ce travail constitue une première étape vers l'élaboration d'un modèle direct plus sophistiqué, capable d'intégrer les caractéristiques d'un géoradar et son interaction avec un sous-sol hétérogène.

Mots clés : Méthode intégrale, Fonctions de Green, Dioptre, Polarisation fondamentales, Ondes électromagnétiques.

Abstract

In this article, we investigate, using a semi-analytical method, the behavior of an electromagnetic wave emitted by an antenna positioned above a homogeneous ground. This approach relies on the integral formalism and introduces the Green's function of a dielectric interface. We worked in the frequency domain and with two spatial dimensions. We consider the two fundamental polarization cases and successfully compare our numerical results with those obtained using a finite element method-based modeling. This work represents a first step toward the development of a more advanced forward model, capable of integrating the characteristics of a ground-penetrating radar and its interaction with a heterogeneous subsurface.

Key words : Integral method, Green's functions, Dielectric interface, Fundamental polarizations, Electromagnetic waves.

1 Introduction

Le géoradar électromagnétique est un appareil qui permet d'imager un sous-sol hétérogène en estimant la distribution spatiale de sa permittivité diélectrique relative et de

sa conductivité électrique. Il est adapté pour sonder la proche surface avec une résolution spatiale élevée et trouve ses applications en archéologie [1], en génie civil [2], ainsi qu'en agrogéophysique. Dans ce dernier cas, il permet notamment d'estimer des grandeurs d'intérêt telles que la saturation en eau ou encore la densité racinaire [3, 4]. Le traitement inverse des données collectées peut se faire par des techniques approchées, lesquelles se basent sur des hypothèses fortes concernant les phénomènes physiques en jeu, telles que la théorie des rayons pour une estimation des paramètres à base de temps de propagation, ou encore en tenant compte du caractère ondulatoire du signal mais en régime de diffusion simple avec la méthode de la backpropagation [5]. De telles hypothèses simplificatrices engendrent des erreurs de modèles, qui vont être à l'origine d'une perte de résolution spatiale, et l'apparition d'artefacts dans les reconstructions obtenues. Pour aller vers une imagerie quantitative et super-résolue, il est nécessaire, dans le traitement inverse des données GPR, de prendre en compte l'ensemble de l'interaction électromagnétique avec le milieu naturel, et notamment les interactions multiples de l'onde avec les différentes hétérogénéités du sous-sol. Pour ce faire, des approches purement numériques sont proposées dans la littérature pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP), les plus répandues étant les différences finies (DF) et les éléments finis (EF) [6]. Elles ont l'avantage de pouvoir traiter une grande variété de géométries et de compositions de milieux naturels, mais l'inconvénient de nécessiter un stockage mémoire et des temps de calcul importants. Une autre approche consiste à transformer l'EDP du problème physique étudié en une équation intégrale strictement équivalente. Cette dernière, lorsqu'elle est résolue numériquement, offre également la possibilité de traiter différents types de milieux hétérogènes. De plus, comparée aux EF et DF, et grâce au concept de fonction de Green qu'elle introduit, l'approche intégrale possède la particularité de pouvoir construire des modèles directs semi-analytiques adaptés à différentes configurations spécifiques. Justement, dans le présent travail, nous proposons un modèle direct semi-analytique de l'interaction d'une antenne, formalisée par un courant dipolaire, avec un sous-sol homogène. Nous traitons les deux cas de polarisations fondamentales et confrontons nos résultats à ceux obtenus avec une modélisation par éléments finis. Après cette introduction, la section 2 est dédiée à la présentation de la configuration d'étude ainsi que du modèle direct. Ensuite vient la section 3, dans laquelle nous illustrons nos résultats numériques et montrons l'intérêt d'une approche semi-analytique en termes de précision et de temps de calcul.

2 Modélisation

Nous considérons un sol homogène au-dessus duquel une onde électromagnétique est émise par une ligne de courant. Nous abordons cette modélisation sous l'hypothèse d'une configuration bidimensionnelle, dans laquelle l'onde se propage dans le plan d'incidence $(O, \hat{e}_x, \hat{e}_z)$, avec l'axe z orienté vers le bas et l'axe y constituant la direction d'invariance. Dans ce plan, le courant source est représenté par un point situé à la position $x = x_s, z = z_s$ avec $z_s < 0$. Il rayonne une onde électromagnétique que nous qualifions d'incidente. Comme nous pouvons le constater sur le schéma de la figure 1, cette dernière donne lieu à une onde réfléchie ainsi qu'à une autre, transmise dans le sol. Deux polarisations fondamentales peuvent être étudiées. La première, que nous appelons mode TE (transverse électrique), a son courant source \mathbf{J} ainsi que son champ électrique \mathbf{E} tous deux orientés selon l'axe d'invariance. La seconde, que nous appelons mode TM (transverse magnétique), a son courant source ainsi que son champ électrique inscrits dans le plan d'incidence, sans être nécessairement colinéaires.

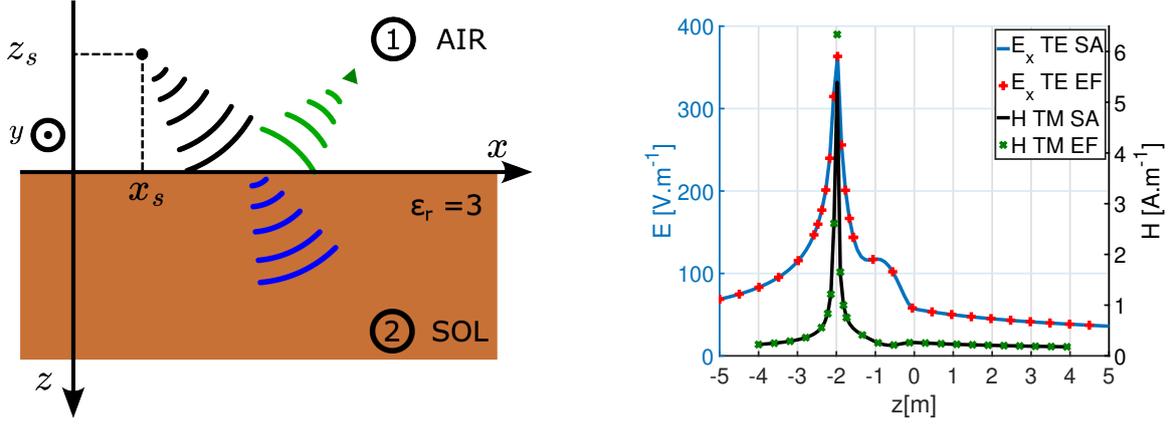


FIGURE 1 – A gauche : schéma illustrant l’interaction d’une ligne de courant avec un sol homogène. A droite : amplitude des champs en mode TE et TM, le long d’une ligne verticale passant par la source, pour une fréquence $f = 100$ MHz et une source d’amplitude unité. (SA : méthode semi-analytique, EF : méthode des éléments finis)

Les applications qui nous intéressent concernent l’agrogéophysique et l’hydrogéophysique, pour lesquelles les sols ont une perméabilité magnétique identique à celle du vide μ_0 . Dans le présent travail, nous considérons le régime harmonique avec une dépendance temporelle de la forme $e^{-i\omega t}$, où i est le nombre imaginaire et ω la pulsation. Dans ce cas, le champ électrique est solution de l’équation de Helmholtz vectorielle suivante :

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \mathbf{J} \quad (1)$$

où ε_r désigne la permittivité diélectrique relative complexe, qui vaut $\varepsilon_r = 1$ dans l’air et $\varepsilon_r = \varepsilon'_r + i\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}$ dans le sol, avec ε_0 la permittivité diélectrique du vide, et (ε'_r, σ) , qui sont respectivement la permittivité diélectrique relative réelle et la conductivité électrique du sol. La méthodologie de résolution semi-analytique de l’équation 1 consiste à décomposer le champ incident en une superposition d’ondes planes, puis à appliquer, pour chaque onde plane définie par son vecteur d’onde de composantes $(k_x, k_{1,z})$, un coefficient de réflexion pour obtenir le champ réfléchi et un coefficient de transmission pour obtenir le champ transmis dans le sol [7]. Par exemple, ce dernier s’écrit, pour une excitation en polarisation TE avec $(k_x, k_{2,z})$ comme composantes du vecteur d’onde dans le milieu de transmission, sous la forme :

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}) = -\frac{\omega \mu_0 \|\mathbf{J}\|}{4} \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} dk_x \cos(k_x (x - x_s)) \frac{e^{i k_{1,z} |z_s| + i k_{2,z} |z|}}{k_{1,z} + k_{2,z}} \hat{e}_y \quad (2)$$

3 Résultats numériques

Notre approche semi-analytique nécessite l’évaluation numérique d’intégrales, à l’instar de l’expression 2. Pour ce faire, nous avons exploité une méthode d’intégrale spatiale de Simpson avec 1000 points de discrétisation et avons réduit le domaine d’intégration pour le ramener entre 0 et $5 \times \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ en raison d’une décroissance suffisamment rapide de l’intégrande. Pour valider notre approche, nous avons également simulé le champ électromagnétique avec la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL

Mode TE (EF) $f = 100 \text{ Mhz}$	Mode TE (EF) $f = 50 \text{ Mhz}$	Mode TM (EF) $f = 50, 100 \text{ Mhz}$	(SA) $f = 50, 100 \text{ Mhz}$
1 minute 30	30 secondes	> 5 minutes	< 1 seconde

TABLE 1 – Ordre de grandeur du temps d’exécution. Pour la méthode des éléments finis (EF) le maillage est adapté à la fréquence pour minimiser l’erreur. En semi analytique (SA) une grille 100 par 100 est utilisée

Multiphysics[®]. Le résultat de la figure 1 illustre une excellente concordance entre ces deux approches. Le principal avantage de la méthode semi-analytique réside en un temps de calcul très faible comparé à celui de la méthode des éléments finis, comme illustré dans le tableau 1. Cela est notamment dû au fait que les éléments finis sont très sensibles au maillage spatial avec l’augmentation de la fréquence d’excitation.

4 Conclusion

Nous avons simulé la propagation d’une onde électromagnétique interagissant avec un sol homogène, en considérant les deux polarisations fondamentales. Les résultats numériques attestent de la fiabilité de notre approche par une excellente concordance avec ceux obtenus par la méthode des éléments finis. À l’avenir, nous envisageons d’élargir notre approche aux milieux stratifiés avec d’éventuelles inclusions, avec pour objectif d’accélérer le traitement inverse des données géophysiques acquises sur le terrain. Dans ce cas, nous considérerons la simulation de données réalistes sous formes de radargramme et de sismogramme.

Références

- [1] Conyers L.B. et Leckebusch J. 2010. “Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground-penetrating radar examples”. 17, p. 117-123
- [2] Grandjean G., Gourry J.C. et Bitri A. 2000. “Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site”. 45, p. 141-156
- [3] Grote K. et al. 2010. “Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR groundwave techniques”. 15, p. 93-110
- [4] Aboudourib A., Serhir M. et Lesselier D. 2020. “A processing framework for tree-root reconstruction using ground-penetrating radar under heterogeneous soil conditions”. 59, p. 208-219
- [5] Özdemir C. et al. 2014. “A review on migration methods in B-scan ground penetrating radar imaging”. 2014, p. 280738
- [6] Kahnert F. M. 2003. “Numerical methods in electromagnetic scattering theory”. 79, p. 775-824
- [7] Micolau J. 2001. “Étude théorique et numérique de la méthode de la Décomposition de l’Opérateur de Retournement Temporel (D.O.R.T.) en diffraction électromagnétique”. Thèse de doct.

MODELISATION DE L'INFLUENCE DE LA ZONE VADOSE DANS L'ETUDE DE MESURES HYDROGÉOPHYSIQUES

RADIC Nicolas^{1,2}, RIVIERE Agnès^{1,2}, GRESRET Alexandrine¹, BODET Ludovic², PASQUET Sylvain², GAUTIER Maxime^{1,2}

¹ MinesParis PSL, Centre Géosciences, Fontainebleau, France, nicolas.radic@minesparis.psl.eu,

² Sorbonne Université, UMR-METIS Paris, France,

RESUME

La quantification de la recharge des eaux souterraines est cruciale en hydrogéologie particulièrement dans le contexte des changements climatiques et de l'utilisation des terres. Les mesures sur le terrain sont complexes en lien avec les conditions aux limites inconnues et des hydrofaciès variés. Une approche multi-méthodes est proposée pour calibrer la simulation numérique et les paramètres hydrodynamiques et thermiques en utilisant des données hydrologiques, sismiques, électriques (ERT) et des outils de modélisation. À l'aide de cas synthétiques, nous présentons la première phase de l'étude sur la sensibilité des paramètres de la zone vadose aux données hydrogéophysiques.

Mots clés : Hydrogéophysique, Zone critique, Zone vadose, Modèle numérique, Sismique, Ert.

ABSTRACT

Quantifying groundwater recharge and discharge is crucial in hydrogeology due to climate and land use changes. Field measurements are challenging due to unknown boundary conditions and hydrofacies. A multi-method approach is proposed to build constraints on numerical simulation and hydrodynamic and thermal parameters calibration, using long-term hydrological data, time-lapse seismic data, and modeling tools. Using synthetic cases, we present the first phase of the study on the vadose zone parameter's sensitivity to geophysical data.

Key words: Hydrogeophysic, Critical zone, Vadoze zone, Numerical model, Seismic, Ert.

INTRODUCTION

La zone critique (ZC) s'étend de l'atmosphère à la base des aquifères (Richter et al., 2024). La ZC est une partie du système terrestre de plus en plus étudiée, où les scientifiques examinent les interactions entre l'eau, l'air, la roche, le sol et la vie. Les eaux souterraines constituent à la fois une frontière et un réservoir essentiel dans ce système intégré. Cependant, elles sont souvent négligées en raison de leur accès difficile et de la lenteur de leur déplacement par rapport aux autres composantes du système (Singha et al. 2022). L'importance stratégique des eaux souterraines pour la sécurité en matière d'eau, d'énergie et de nourriture augmente face aux changements environnementaux en cours. Quantifier les circulations d'eau représente un défi dans les interfaces entre surface et le souterrain (zone vadose et interface nappe rivière). Ces interfaces sont composées de différentes unités morpho-sédimentaires de géométries et de lithologies très contrastées. La nature des dépôts est intrinsèquement liée aux processus hydrodynamiques à l'origine de leur formation. Ne possédant pas de mesure directe, la plupart des modélisations des flux d'eau souterraines sont calibrées avec des données conventionnelles comme la charge hydraulique ou le débit fluvial. Il est cependant établi que ces mesures sont insuffisantes dans un cas de sol hétérogène (De Marsily et al. 2005). La résolution des problèmes d'écoulements de l'eau et de transports est entravée par (1) une connaissance limitée de l'hétérogénéité des milieux ; et (2) un accès local et éparse à des mesures directes nécessaires au calibrage des modèles. Pour pallier ce problème De Marsily et al. (2005) et Schilling et al. (2019) recommandent le couplage des observations conventionnelles avec des données hydrogéophysiques. La connaissance des hétérogénéités lithologiques et géométriques définit la zonation et les valeurs des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, porosité et paramètres dérivés). Ces paramètres sont

indispensables à la compréhension et la simulation des processus couplés bio-géochimio-physiques. L'hydrogéophysique est un des outils actuellement développés afin de limiter ces incertitudes et les équifinalités qui affectent la modélisation. Dans cette thèse, des données électriques, sismiques, hydrologiques et de température sont utilisées afin de caractériser les hydro-faciès du site d'étude et de déterminer les flux d'eau et de chaleur en 4D (x, y, z et t). [Dangeard et al. \(2021\)](#) sont parvenus à utiliser cet outil (associant ERT, niveau de piézomètre et sismique) afin de caractériser les faciès du site d'étude et ont démontré, avec un modèle numérique 1D stationnaire, que le rapport entre les ondes de surfaces V_p/V_s permettent de caractériser la forme de la surface piézométrique. Cependant, en pratique, le sous-sol est toujours dans un état transitoire dû aux intempéries, la température non constante et les saisons. Ainsi l'hypothèse de régime permanent n'est pas représentative de la réalité. L'outil numérique Ginette ([Rivière et al. 2014](#)) permet quant à lui de simuler dynamiquement et en 2D la pression d'eau et la température dans un milieu poreux en zone à saturation variable. La première étape de cette étude est de coupler le modèle hydrothermique avec un modèle électrique ([Rücker et al. 2017](#)) et de propagation d'onde ([Martire et al. 2022](#)). Des tests de sensibilité seront réalisés afin de déterminer les paramètres essentiels à la détermination des flux d'eau et de chaleur au sein de ses interfaces. Il sera ainsi possible de quantifier l'évolution spatio-temporelle des flux d'eau et de chaleur sur l'observatoire de la ZC de l'Orgeval. Nous allons tout d'abord présenter le site ainsi que les différentes études réalisées dessus puis présenter la modélisation du site et des réponses géophysiques.

PRESENTATION DU SITE

Le site d'étude est situé sur l'observatoire de la zone critique de l'Orgeval ([Loumagne et Tallec, 2013](#)) sur le bassin-versant du même nom, qui s'étend sur 104 km², à 70 km à l'est de Paris en Seine-et-Marne (France). Le ru des Avenelles y draine un sous-bassin versant de 46 km². Ce dernier est un observatoire expérimental instrumenté depuis les années 60, notamment pour des études sur le drainage et les épisodes de crues par IRSTEA¹. Les variables hydrologiques y sont suivies depuis 1962 et disponibles sur la BDOH² ([Loumagne et Tallec, 2013](#)). Le bassin-versant de l'Orgeval est représentatif des têtes de bassins de l'hydrosystème Seine, caractérisé par une couverture agricole importante. L'hydrogéologie est influencée par un système aquifère multi-couches composé de 2 principales formations géologiques, datant de l'Oligocène (nappe du calcaire de Brie) et de l'Éocène (nappe du calcaire du Champigny), séparées par un aquitard argileux (argiles vertes et marnes supragypseuses) ([Mouhri et al., 2013](#)). La surface du bassin est recouverte de dépôts éoliens quaternaires (sables et limons peu perméables) sur une épaisseur pouvant atteindre 5 m localement. Sa géométrie a été identifiée à large échelle par [Mouhri et al. \(2013\)](#) grâce à plusieurs études géologiques et géophysiques ainsi que 39 carottages. À partir de ces résultats, des zones d'intérêts particuliers ont été mises en évidence le long du cours d'eau. Elles font l'objet d'un suivi hydrogéologique haute fréquence (température, charges hydrauliques) via des stations LOMOS [Mouhri et al. \(2013\)](#). La station ciblée par cette étude est nommée « AvAv » (pour AVal AVenelles) et se situe au niveau d'un cours d'eau qui semble être en contact direct avec le calcaire du Champigny.

Etude hydrogéophysique du site

Comme présenté sur la figure 1 et dans [Dangeard et al. \(2021\)](#) plusieurs méthodes hydrogéophysiques sont appliquées sur le site afin de modéliser de manière réaliste les hydrofaciès ainsi que les conditions initiales (et conditions aux limites) des simulations. Des profils ERT et sismiques sont réalisés à plusieurs périodes le long des berges de la rivière pour permettre de suivre la réponse du sol en fonction du temps. Des sondes piézométriques mesurant la pression et la température à une profondeur donnée sont disposées en rivière au niveau des berges et dans les aquifères. Tout comme des sondes de températures réparties en plusieurs points prenant des mesures entre 10 cm et 40 cm de profondeur en rivière et sur les berges. Le tout calibré par des stations météorologiques disposées en plusieurs points de l'observatoire.

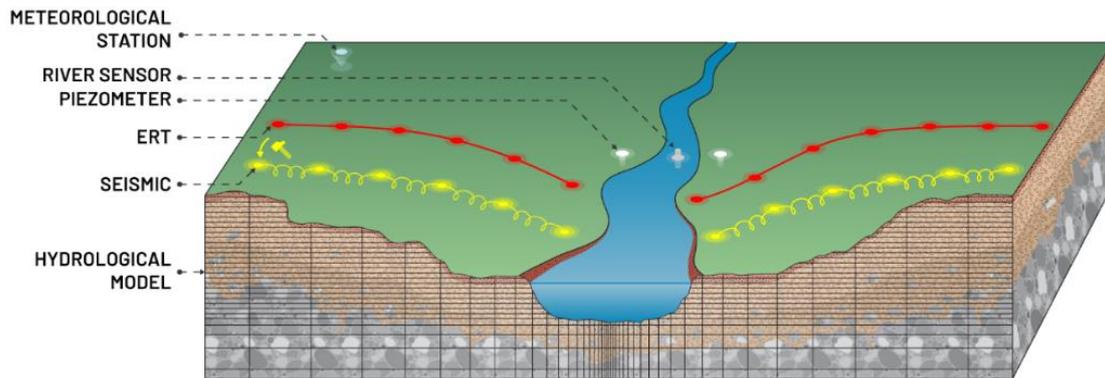


Fig. 1 –Schéma du sol à modéliser avec les différentes méthodes de mesure hydrogéophysique permettant de définir les lithofacies et les conditions initiales.

MODÉLISATION DU SITE ET SES REPONSES GEOPHYSIQUES

Modélisation du site à l'aide de l'outil Ginette

L'utilisation du modèle numérique Ginette, développé par [Rivière et al. \(2014\)](#), est proposé. Il permet de décrire le transport de flux d'eau et de chaleur grâce à la méthode des volumes finis sur un maillage rectangulaire de 2 936 mailles. Pour cela, les échanges entre la rivière et l'aquifère sont régis par la loi de Darcy et l'équation de Richards estime les flux en zone non-saturée. De manière générale, le domaine du modèle est limité par la disponibilité des conditions aux limites (spatiales et temporelle). En pratique, il est défini par la position des piézomètres correspondants aux bords du domaine. Ici, les méthodes sismiques permettent d'extrapoler les charges hydrauliques observées. La longueur des profils sismiques limite donc un nouveau domaine de modélisation.

Le site AvAv est représenté par un réseau de mailles rectangulaires dont la taille dépend de leurs positions au sein du système. En surface et proche de la rivière les mailles sont plus petites ce qui offre une meilleure résolution. Proche de la rivière, elles sont espacées de 3 cm à 25 cm (résolution de la sismique) horizontalement et de 3 cm verticalement. Leur taille augmente ensuite avec la profondeur suivant la résolution des méthodes sismiques. À 78 m de profondeur, on suppose que la zone est toujours saturée. Il est possible de diminuer la résolution afin de faciliter le calcul.

Les conditions aux limites sont déterminées à l'aide de l'étude sismique du milieu ([Dangeard et al. 2021](#)). Concernant les conditions aux bords du modèle, la zone saturée varie à chaque pas de temps et sera interpolée linéairement avec un pas de temps journalier. Tandis qu'aux limites la forme de la nappe varie à chaque pas de temps. Pour renforcer son étude, l'outil Ginette permet de déterminer la propagation de température dans les différentes zones. Ce qui va jouer le rôle de traceur pour les écoulements démontré par [Constantz \(2008\)](#). Les conditions aux limites de la température dépendront des capteurs de température situés proche surface. Tandis qu'en profondeur on pourra considérer cette température comme constante égale aux températures des aquifères.

Etude des paramètres de la zone vadose en modélisant la réponse du milieu

Maintenant que le site est modélisé il est possible d'étudier la sensibilité des paramètres de la zone vadose qui permettront de quantifier les flux d'eau et de chaleurs au sein de ses interfaces. Il est possible d'effectuer soit une recherche systématique ou bien une méthode MCMC en reprenant les données hydrogéophysiques obtenues sur le terrain. Pour modéliser la réponse sismique, V_p et V_s en fonction de Z peuvent être déterminées à l'aide de la saturation en eau grâce la méthode de [Solazzi et al. \(2021\)](#). V_p et V_s dépendent également de la perméabilité K du milieu. À l'aide de l'équation de Richard il est possible de déterminer K qui dépend de la saturation S_w . Enfin les paramètres de [Van Genuchten \(1980\)](#) permettent de déterminer la valeur de la saturation en fonction de Z et de la hauteur de la surface piézométrique, comme présenté dans l'éq.16 de [Solazzi et al. \(2021\)](#). Concernant les données ERT, la loi d'[Archie \(1942\)](#) pourrait permettre d'exprimer la résistivité du milieu et sa

saturation. La difficulté réside ici dans la paramétrisation de cette loi et de son domaine d'application dans un milieu souvent hétérogène. Maintenant qu'il existe un lien entre la pression et la réponse sismique et ERT du milieu, il est possible d'étudier le couplage hydrogéophysique que cela pourrait apporter à l'aide d'outil tel que SpecFEM (Martire et al. 2022) pour la propagation d'onde et pyGIMLi (Rücker et al. 2017) pour le modèle électrique. Ces paramètres seront étudiés au cours du temps à l'aide de Time Laps pour connaître leurs évolutions.

PERSPECTIVES

Une fois que l'ensemble des simulations sont terminées, il sera possible de déterminer la sensibilité des paramètres de la zone vadose en utilisant une approche bayésienne. Cette méthodologie va être réalisée dans les conditions de l'étude de Dangeard et al. (2021) avec le maintien des forçages. Ceci permettra de déterminer les paramètres essentiels à la détermination de flux d'eau et de chaleur dans les interfaces nappe rivière et dans la zone vadose. Notre but sera donc dans un premier temps, de comparer les simulations en régime transitoire et permanent. On espère ainsi que le régime transitoire, plus représentatif de la réalité, apportera une meilleure précision dans la caractérisation paramètres hydrogéophysiques. Ce qui, ajouté aux mesures géophysique, permettra de mieux quantifier les flux d'eau souterrains comme le recommande De Marsily et al. (2005) et Schilling et al. (2019). Les prochaines étapes consisteront aussi ajouter une dimension d'espace à l'Outil en Ginette afin de caractériser ses différents flux en 4D (x, y, z et t).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARCHIE, G. E. 1942 - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62.
- CONSTANTZ, J. 2008 - Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. *Water Resources Research*, 44(4).
- DANGEARD M., RIVIERE A., BODET L., SCHNEIDER S., GUERIN R., JOUGNOT D., & MAINEULT A., 2021 - River corridor model constrained by time-lapse seismic acquisition. *Water Resources Research*, 57(10), e2020WR028911.
- DE MARSILY G., DELAY F., GONÇALVÈS J., RENARD P., TELES V., & VIOLETTE S., 2005 - Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal*, 13, 161-183.
- LOUMAGNE C., & TALLEC G., 2013 - L'observation long terme en environnement : Exemple du bassin versant de l'Orgeval. Editions Quae.
- MARTIRE L., MARTIN R., BRISSAUD Q., & GARCIA R. F. 2022 SPECFEM2D-DG, an open-source software modelling mechanical waves in coupled solid–fluid systems: the linearized Navier–Stokes approach. *Geophysical Journal International*, 228(1), 664-697.
- MOUHRI A., FLIPO N., REJIBA F., et al., 2013 - Designing a multi-scale sampling system of stream–aquifer interfaces in a sedimentary basin. *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 504, p. 194-206.
- RICHTER D., BILLINGS S., BRANTLEY S., et al., 2024 - Earth sciences are the model sciences of the Anthropocene. *Perspectives of Earth and Space Scientists*, vol. 5, no 1, p. e2024CN000237.
- RIVIÈRE A., GONÇALVÈS J., JOST A., & FONT M., 2014 - Experimental and numerical assessment of transient stream–aquifer exchange during disconnection. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 517, p. 574-583.
- RÜCKER C., GÜNTHER T., & WAGNER F. M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106-123.
- SCHILLING, Oliver S., COOK, Peter G., & BRUNNER, Philip. 2019 - Beyond classical observations in hydrogeology: The advantages of including exchange flux, temperature, tracer concentration, residence time, and soil moisture observations in groundwater model calibration. *Reviews of Geophysics*, vol. 57, no 1, p. 146-182.
- SINGHA K, & NAVARRE-SITCHLER 2022-The importance of groundwater in critical zone science. *Groundwater*, 60(1), 27-34.
- 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*, vol. 44, no 5, p. 892-898.

¹ Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture [<http://www.irstea.fr/accueil>]

² Base de Données des Observatoires en Hydrologie [<https://bdoh.irstea.fr/ORACLE>]

PYMAGRA – TRAITEMENT ET INVERSION DE DONNEES MAGNETIQUES ET GRAVIMETRIQUES

ZEYEN Hermann¹

¹ Laboratoire GEOPS, Université Paris-Saclay, CNRS, Bât. 504, 91405 Orsay cedex, France

RESUME

Un nouveau logiciel open-source multi-plateformes en langage Python est présenté pour l’affichage, le traitement et l’inversion de données magnétiques et gravimétriques. Le logiciel est principalement conçu pour des données de proche surface comme en archéologie, mais peut être utilisé aussi pour des données à l’échelle régionale (p.ex. aéromagnétiques). Le logiciel permet de joindre des données mesurées en différents blocs, même avec des zones internes sans mesures comme c’est souvent le cas lors de campagnes de mesures sur le terrain. Des traitements incluent la correction d’effets de direction des mesures et la réduction au pôle en magnétisme, la prolongation verticale du champs, le calcul de « tilt angles », de signaux analytiques et leur modélisation semi-automatique ainsi que la modélisation des profondeurs de sources par analyse spectrale. L’inversion des données est faite avec un algorithme auto-adaptatif en 2.5 et 3 dimensions. L’utilisation en enseignement a montré que le logiciel est simple à prendre en main, aussi par des étudiants.

Mots clés : géomagnétisme, gravimétrie, traitement de données, inversion, proche-surface, Python

ABSTRACT

A new open-source multiplatform computer program written in Python for display, treatment and inversion of magnetic and gravity data is presented. The program has mainly been developed for near-surface magnetic data (e.g. archaeology), but may also be used for regional (aero)magnetic and gravity data. It allows to join data measured in different blocks even with internal holes, such as often encountered in data from field campaigns. Data treatment includes reduction of directional effects and pole reduction for magnetic data, vertical field prolongation, tilt angle calculation, analytic signal with semi-automatic modelling and determination of source depths by spectral analysis. Data inversion is based on a self-adaptive refinement algorithm in 2.5 and 3 dimensions. Tests in teaching showed that the program is intuitive and user-friendly also for students.

Key words: geomagnetics, gravity, data treatment, inversion, near-surface, Python

INTRODUCTION

Un nouveau logiciel open-source et multi-plateforme a été développé, destiné aux spécialistes comme aux non spécialistes, ainsi qu’aux étudiants, permettant de s’appropriier des données magnétiques et gravimétriques acquises sur le terrain et d’en obtenir rapidement un modèle du sous-sol. Le besoin initial de ce logiciel consistait en un traitement de données magnétiques acquises lors de stages de terrain et en archéologie avec des problèmes pouvant consister en forts effets de direction des mesures magnétiques, le besoin de produire une carte commune à partir de données acquises à différents moments dans des blocs seulement partiellement connectés et parfois sans mesures des variations diurnes par une station de base. En plus, l’interprétation des données par différents types de transformations et d’inversions numériques ont été intégrés pour permettre une estimation rapide de la distribution aussi bien de la susceptibilité magnétique que de la densité comme sources d’anomalies magnétiques et gravimétriques.

Structure du logiciel

La GUI (Graphical User Interface) de Pymagra 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 (Fig. 1). Pymagra a été écrit en Python 3.10, mais vu que peu de bibliothèques spécialisées ont été utilisées, il fonctionne aussi avec des versions plus anciennes de Python. 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 d'un ou plusieurs fichiers en différents formats, incluant Geometrics « stn », GXF ou d'autres formats plus spécialisés comme les données aéromagnétiques du BRGM ; (ii) affichage des données de chaque fichier de manière séparés ou conjointement sur une carte avec la possibilité de superposer des points (p.ex. villes) ou linéaments (p.ex. limites géologiques) digitalisés ; (iii) application de différents traitements ; (iv) inversion et affichage des résultats.

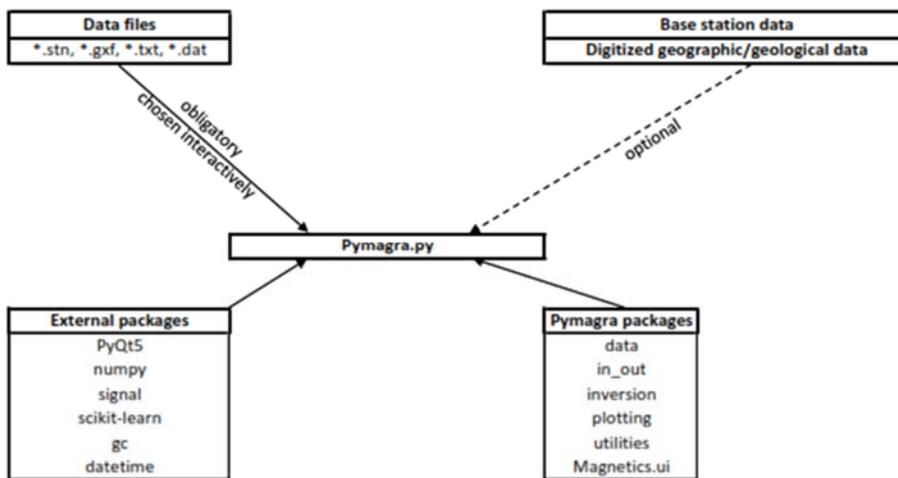


Fig. 1 : Structure de Pymagra, fichiers et bibliothèques nécessaires.

Étapes d'installation du logiciel

Pymagra peut être téléchargé depuis github à l'adresse <https://github.com/HZeyen/pymagra> et démarré en lançant le script `pymagra_start.py`. Il peut aussi être installé par la commande « `pip install pymagra` » et lancé dans une fenêtre de commande python avec « `pymagra` ».

Traitement des données

Au lancement, l'utilisateur doit choisir un ou plusieurs fichiers de données qui peuvent être traités séparément, ou ensemble après avoir été joints. En général, les données magnétiques présentent des effets plus ou moins importants liés à la direction des mesures (p.ex. instrument au N ou au S des capteurs). Deux méthodes de réduction de cet effet existent : par équilibrage des médianes des lignes ou par équilibrage gaussienne (Masoudi et al., 2023) (Fig. 2). La réduction des variations diurnes peut se faire soit en utilisant des données d'une station de base, soit, si ce type de données n'existe pas, en ajustant une courbe de tendance polynomiale aux données en fonction du temps. Il est ensuite possible d'interpoler les données sur une grille régulière et de dessiner chaque ligne dans une fenêtre spécifique où on peut manuellement effacer des données erronées.

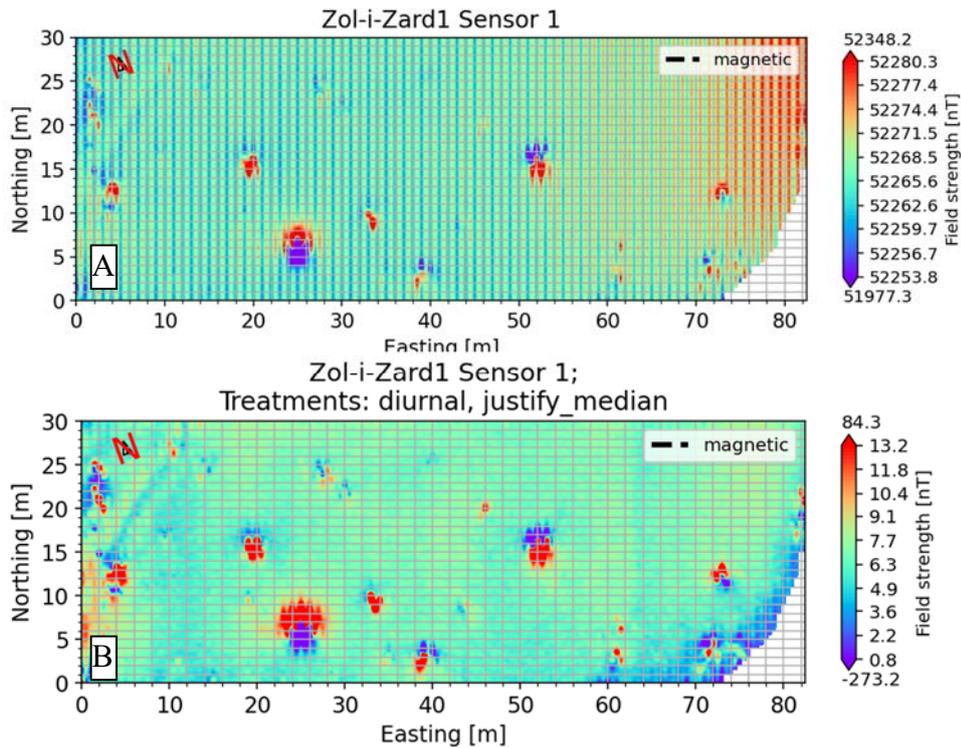


Fig. 2 –Exemple de traitement des données. A : données mesurées. B : données après réduction de l'effet de direction et réduction des variations diurnes par réduction des variations temporelles des données par une courbe de tendance d'ordre 5.

Transformation des données

Une fois les données interpolées sur une grille régulière, le logiciel permet de les projeter au pôle pour des données magnétiques et de les prolonger à une autre altitude de mesure pour les données magnétiques ou gravimétriques. Pour l'interprétation des corps à la source des anomalies, on peut calculer les angles d'inclinaison (« tilt angles ») du champ (Fig. 3) et tracer manuellement des linéaments sur la carte correspondante qui peuvent se superposer à la carte des données. Il est aussi possible de calculer le signal analytique calculé en 2D soit en direction X, soit en direction Y. Les anomalies correspondantes peuvent ensuite être modélisées semi-automatiquement en termes de profondeur de la source par ajustement de gaussiennes. Il est aussi possible de modéliser automatiquement les spectres de puissance par fenêtre glissante en termes de profondeur moyenne des sources (Spector & Grant, 1970).

Inversion des données

Pour l'inversion des données, l'utilisateur définit d'abord la zone à interpréter qui est subdivisée en prismes rectangulaires pour lesquels l'effet est calculé en utilisant la formule de Plouff (1975) ou Okabe (1979) pour les prismes limités en haut par la topographie. La susceptibilité ou la densité optimale est calculée par inversion d'une matrice de Fréchet, en utilisant optionnellement des matrices de régularisation et de lissage. Initialement, on utilise des prismes relativement larges qui sont partagés dans les zones où les résidus principaux se trouvent, de façon que le raffinement des corps reste limité aux zones d'intérêt principales (Fig. 4).

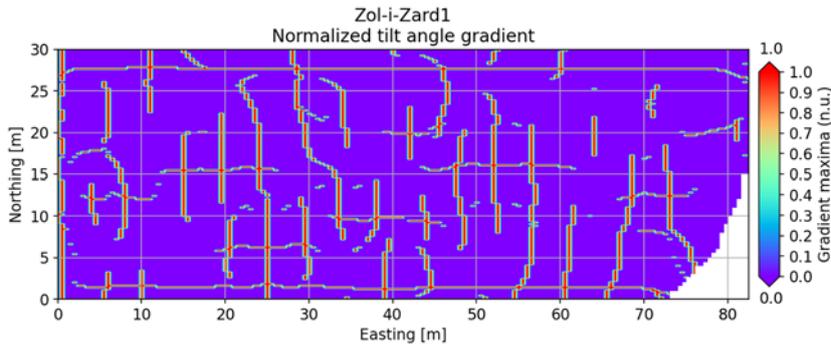


Fig. 3 –Exemple d'une carte d'angle d'inclinaison

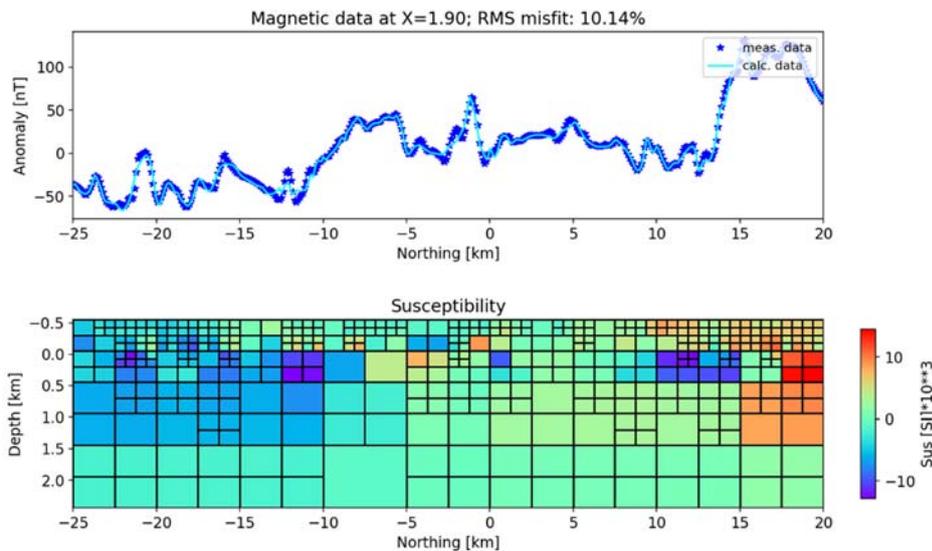


Fig. 4 –Exemple d'un résultat d'inversion en 2.5D

CONCLUSIONS

Le logiciel Pymagra permet d'effectuer toute la procédure de traitement de données magnétiques et gravimétriques depuis la correction d'erreurs de mesure ou d'effets naturels jusqu'au calcul de transformations comme la prolongation du champ vers le haut, le calcul des signaux analytiques ou de l'angle d'inclinaison. En plus, différents moyens de modélisation des sources d'anomalies sont offerts comme l'interprétation des signaux analytiques, des spectres ou l'inversion des données en 2.5 et 3D. 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

- MASOUDI P., PETRONILLE M., BINET H., ETAIX G., 2023 – Spatial statistical analysis and geostatistical mapping of offshore magnetometric acquisition data. *EAGE Near Surface Geoscience Conference & Exhibition, Edinburgh, 1-5.*
- OKABE, M., 1979 – Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies. *Geophysics* 44 (4): 730-41, doi: 10.1190/1.1440973.
- PLOUFF, D., 1975 – Derivation of formulas and FORTRAN programs to compute magnetic anomalies of prisms. *Open file report. U.S.G.S., 122pp.*
- SPECTOR, A. ET F. S. GRANT, F.S., 1970 – Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics. Geophysics, 35 (2), 293-302, doi : 10.1190/1.1440092.*

PRÉCURSEURS SISMIQUES À DES RUPTURES DU GLISSEMENT D'HARMALIÈRE, ISÈRE

BIÈVRE G.¹, FOLLEAU S.², HELMSTETTER A.¹ CONDOM T.³

¹ Institut des Sciences de la Terre, Grenoble, France

² Norges Geologiske Undersøkelse, Trondheim, Norge

³ Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble, France

RESUME

Ce travail présente deux nouvelles observations de chute de la vitesse sismique quelques jours avant des ruptures du glissement de terrain argileux d'Harmalière (Isère, France) entre 2017 et 2021. Elles confirment des travaux antérieurs de même que l'application potentielle de cette méthode pour détecter des réactivations catastrophiques. En complément, les 2 événements se sont déroulés durant des épisodes météorologiques particuliers, avec une augmentation importante de la température, parfois accompagnée de pluies, qui a permis une fonte très rapide du manteau neigeux et une importante infiltration d'eau.

Mots clés : bruit de fond sismique, glissement argileux, rupture, précurseur

ABSTRACT

This work presents two new observations of seismic velocity drop a few days before the rupture of the Harmalière clayey landslide (Isère, France). They confirm previous works and the potential application of this method to detect catastrophic reactivation events. In addition, the 2 events presented took place during specific meteorological episodes (foehn episodes), with a significant rise in temperature and sometimes concurrent rainfall, that allowed the snowpack to melt very quickly and infiltrate into the ground.

Key words: seismic ambient noise, clayey landslide, rupture, precursory

INTRODUCTION

Depuis les travaux de Mainsant *et al.* (2012) qui avaient détecté des chutes de vitesse des ondes de surface par inter-corrélation de bruit de fond sismique plusieurs jours avant la réactivation et la rupture du glissement de Pont-Bourquin (Suisse), peu d'études ont reporté des observations similaires. Il y a quelques années, Fiolleau *et al.* (2020) ont confirmé la possibilité de détecter des signaux sismiques précurseurs à la chute d'une petite écaille argileuse au sein du glissement d'Harmalière (Isère, Fig. 1). Les vitesses sismiques mesurées (ondes de surface) sont principalement contrôlées par celle des ondes de cisaillement, elles-mêmes dépendantes de la rigidité du matériau. Ainsi, reconstruire les séries temporelles de ces vitesses à partir du bruit de fond ambiant permet un suivi relativement direct de la rigidité d'un massif instable.

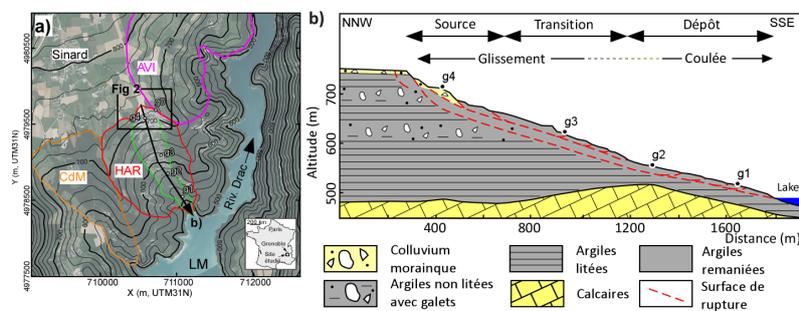


Fig. 1 – Présentation du site d'étude. a) Localisation. AVI : glissement d'Avignonet ; HAR : glissement d'Harmalière ; CdM : glissement du Champ du mouton. LM : Lac de Monteynard. g0-g4 : stations GNSS. b) Coupe géologique synthétique au centre du glissement (localisation sur la Figure 1a) et mécanismes de déformation associés.

L'objectif de ce travail est de présenter la même approche sur le glissement argileux d'Harmalière. Ce site a connu une réactivation majeure en juin 2016 (environ $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ de matériaux argileux mobilisés ; Fiolleau *et al.* 2021, Lacroix *et al.* 2018) et deux réactivations importantes (environ $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3$) fin janvier 2017 et début février 2021. L'escarpement principal a régressé d'une quarantaine de mètres entre juin 2016 et octobre 2024. Suite à la réactivation de juin 2016, une instrumentation sismologique a été mise en place à l'arrière de l'escarpement. Elle permet de compléter celle mise en place depuis 2006 sur le glissement d'Avignonet, moins actif qu'Harmalière, dans le cadre de l'Observatoire Multidisciplinaire sur les Instabilités de Versant (OMIV). L'instrumentation sismologique durant ces deux dernières réactivations a permis de déterminer des séries temporelles continues d'activité sismique endogène liée au glissement (les *landquakes*), de même que la variation de la vitesse des ondes de surface. Par la suite, ces séries temporelles sont présentées et interprétées conjointement avec les chroniques hydrométéorologiques.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'ensemble des données utilisées dans ce travail proviennent de l'Observatoire Multidisciplinaire sur les Instabilités de Versant (OMIV, 2006). L'implantation des stations est présentée sur le Figure 2a. Les 4 stations sismologiques permanentes sont des vélocimètres 3 composantes et large bande, avec une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz sur ce site. Les stations HAR1.01, HAR2 et HAR3 ont été installées à l'arrière de l'escarpement principal en juillet 2016, à la suite de la réactivation du 27 juin 2016. La station HAR1.01 a chuté le 29 janvier 2017, suite à une réactivation du glissement. La station HAR1.02 a été installée début février 2017. L'implantation des stations sismologiques HAR1.01 et HAR1.02 en fonction de la position de l'escarpement principal est présentée sur la Figure 2b. Les séries temporelles sismologiques ont été traitées afin d'obtenir 1) la variation relative de la vitesse des ondes de surface (dv/v) et le coefficient de corrélation (cc) associé selon les techniques d'intercorrélation sismique et de *stretching*, 2) et également l'activité sismique endogène à l'aide d'une technique de *template matching*, qui permet d'identifier automatiquement des signaux sur la base de leur ressemblance avec des clusters dont la typologie (amplitude, fréquence, durée, etc.) a été déterminée à partir d'événements connus. Ces méthodologies sont décrites dans Fiolleau *et al.* (2020,2021). Par la suite, les résultats de dv/v seront présentés dans une bande de fréquence comprise entre 8 et 10 Hz, ce qui correspond à une profondeur d'investigation maximale de l'ordre d'une quinzaine de mètres, concordante avec les profondeurs de rupture de l'escarpement principal (Fig. 2b).

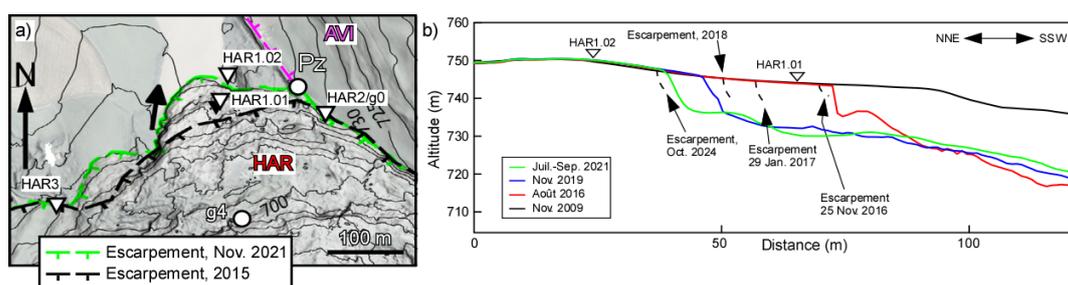


Fig. 2 – Implantation des stations. a) Vue en plan des stations. HAR1 à HAR3 : vélocimètres. g0-g4 : stations GNSS. Pz : piézomètre ouvert. HAR : glissement d'Harmalière ; AVI : glissement d'Avignonet. b) Position des stations HAR1 en fonction de la régression de l'escarpement principal. Les profils topographiques à différentes périodes sont issus de modèles numériques de terrain LiDAR.

Les données météorologiques proviennent d'une station OMIV implantée environ 300 m au nord-est du site d'étude. Finalement, un capteur de pression interstitielle a été installé dans un piézomètre ouvert fin novembre 2017 à l'arrière de l'escarpement principal (Pz sur la Figure 2).

RÉSULTATS & DISCUSSION

L'ensemble des séries temporelles environnementales et sismologiques sont présentées dans la Figure 4. Elles ne seront pas décrites intégralement pour des raisons de place. L'activité sismique endogène (Fig. 4c) présente 3 pics principaux qui coïncident avec 3 réactivations majeures les 27 juin 2016 (Lacroix et al. 2018), 29 janvier 2017 et 3 février 2021. Les séries temporelles de variation de la vitesse des ondes de surface (dv/v) commencent en juillet 2016, suite à l'installation des stations consécutive à la réactivation de juin 2016. La première observation sur les courbes de dv/v est que les chutes les plus prononcées, significativement en dehors de l'intervalle de confiance à 95 %, se produisent uniquement durant des réactivations (Figs. 4d à 4g), et sont associées à des chutes marquées des coefficients de corrélation (cc). Les baisses les plus marquées sont de l'ordre de 4 à 10 %, c'est-à-dire le même ordre de grandeur qu'à Pont-Bourquin (Mainsant *et al.* 2012) et Harmalière en novembre 2016 (Fiolleau *et al.* 2020). Finalement, les résultats montrent que l'ensemble des séries temporelles de dv/v ne présentent pas des chutes de comparables. En effet, les chutes de dv/v et de cc les plus marquées le sont pour des ruptures situées à proximité des stations sismologiques.

Ces deux réactivations particulières se sont produites en hiver et à l'occasion de phénomènes météorologiques particuliers. Bien que ce soit difficilement visible sur la Figure 3, chacun de ces épisodes s'est produit suite à une augmentation brutale de température de plus de 10°C dans les deux cas en 2 à 3 jours, passant de températures négatives à positives. En parallèle, l'humidité de l'air a parfois également chuté (d'environ 85 à moins de 50%) dans le même temps, et des pluies se sont également parfois produites. Ceci a induit la fonte totale du manteau neigeux (quelques cm à quelques dm) dont une partie s'est infiltrée dans le sous-sol. Ces conditions ont favorisé la diminution des caractéristiques mécaniques le long des surfaces de rupture en développement, et le déclenchement de ruptures dans des conditions de stabilité sous l'équilibre limite.

CONCLUSIONS

Ce travail reporte deux nouvelles observations de chute significative de la vitesse des ondes de surface jusqu'à quelques jours avant des ruptures du glissement argileux d'Harmalière. Ils confirment deux observations précédentes et soulignent le potentiel de ces méthodes pour le suivi des versants instables. En complément, les ruptures étudiées ici se sont produites durant des événements météorologiques particuliers, où une augmentation rapide de température en hiver, parfois associée à des pluies, a permis de faire fondre le manteau neigeux et d'infiltrer rapidement de l'eau dans le sous-sol. Cette infiltration a permis de diminuer significativement la rigidité du matériau le long de surfaces de rupture en développement, jusqu'à passer sous le seuil d'équilibre limite et d'ainsi pouvoir déclencher la rupture du versant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FRENCH LANDSLIDE OBSERVATORY – SEISMOLOGICAL DATACENTER / RESIF, 2006 – Observatoire Multidisciplinaires des Instabilités de Versants (OMIV). RESIF : Réseau Sismologique et Géodésique Français. doi:10.15778/RESIF.MT

FIOLLEAU S., JONGMANS D., BIÈVRE G., CHAMBON G., BAILLET L., VIAL B., 2020 – Seismic characterization of a clay-block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps. *Geophysical Journal International*, 221, 1777-1788.

FIOLLEAU S., JONGMANS D., BIÈVRE G., CHAMBON G., LACROIX P., HELMSTETTER A., WATHELET M., DEMIERRE M., 2021 – Multi-method investigation of mass transfer mechanisms in a retrogressive clayey landslide (Harmalière, French Alps). *Landslides*, 18, 1981-2000.

LACROIX P., BIÈVRE G., PATHIER E., KNEIB U., JONGMANS D., 2018 – Use of Sentinel-2 images for the detection of precursory motions before landslide ruptures. *Remote Sensing of Environment*, 215, 507-516.

MAINSANT G., LAROSE E., BRÖNNIMANN C., JONGMANS D., MICHOU D., JABOYEDOFF M., 2012 – Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide : toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research*, 117, F01030.

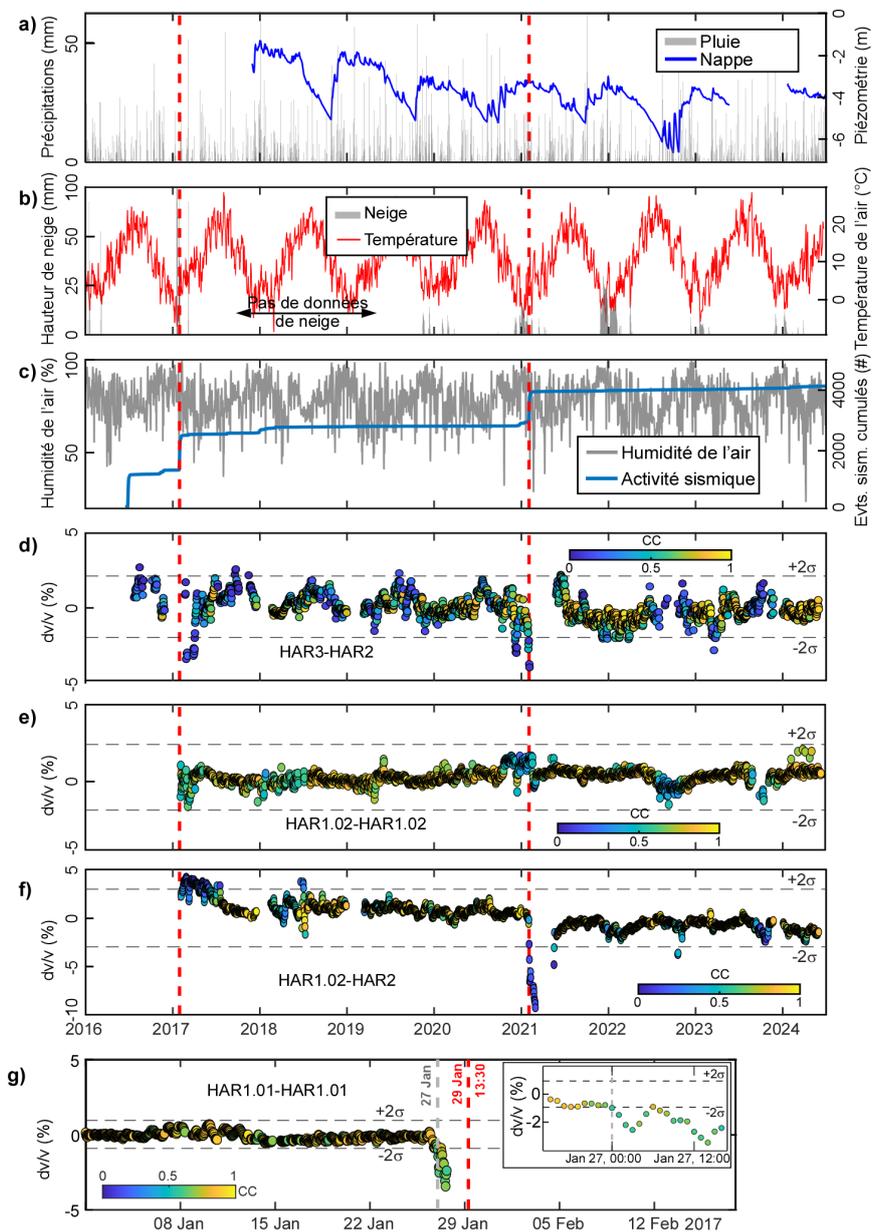


Fig. 3 – Séries temporelles. a) Pluviométrie et piézométrie. b) Hauteur de neige et température de l'air. c) Humidité de l'air et activité sismique endogène. Variations quotidiennes relatives de la vitesse des ondes de surface (dv/v) entre 8 et 10 Hz et coefficients de corrélation (cc) associés pour les stations d) HAR3-HAR2, e) HAR1.02, et f) HAR1.02-HAR2. g) dv/v horaire de la station HAR1.01 pour le mois de janvier 2017. Les barres verticales pointillées rouges représentent les deux ruptures étudiées (29 janvier 2017 et 3 février 2021). Les lignes pointillées horizontales à -2σ et $+2\sigma$ correspondent à l'intervalle de confiance à 95 %. L'implantation des stations de mesure est présentée dans la Figure 2a.

AUSCULTATION AU RADAR GEOLOGIQUE D'UNE GALERIE D'AMENE D'EAU

ESPAREL Aline¹, SEIVE Benjamin²

¹ Géolithe, Crolles, France, aline.esparel@geolithe.com

² Géolithe, Crolles, France, benjamin.seive@geolithe.com

RESUME

Une galerie d'amenée d'eau a été auscultée à l'aide d'une antenne radar à fréquence centrale duale (200-600 MHz), sur des profils longitudinaux en piédroits, en voûte et en radier, et des profils transversaux en voûte. L'interface béton-roche, la stratigraphie, les fractures et failles, les cintres, les zones hétérogènes, les décollements et cavités ont été imagés sur 4 m en arrière des parois. Ces interprétations ont été projetées et intégrées dans un modèle 3D de la galerie.

Mots clés : radar géologique, galerie souterraine, auscultation, modèle 3D

ABSTRACT

An intake gallery was inspected using a dual center frequency GPR antenna (200-600 MHz), along longitudinal profiles on the sidewalls, the vault and on the floor, and transversal profiles on the vault. The concrete-rock interface, stratigraphy, fractures and faults, ribs, heterogeneous zones, delamination and cavities were imaged up to 4m behind the walls. These interpretation were projected and integrated into a 3D model of the gallery.

Key words: GPR, underground gallery, auscultation, 3D model

INTRODUCTION

Le radar géologique est fréquemment utilisé dans l'ingénierie civile et permet entre autres de donner des détails sur la structure, l'épaisseur de couches et la localisation de désordres (XIENG et al., 2013). Cette technique portable à haut rendement donne des données denses et précises, avec une bien meilleure résolution que d'autres méthodes géophysiques, mais nécessite une expertise pour en effectuer leur traitement et interprétation (SOLLA et al., 2021).

Une portion de galerie d'amenée d'eau pour un barrage a été identifiée à enjeux par son gestionnaire à cause de la présence de gypse et d'anhydrite. Pour fiabiliser le modèle géologique et réaliser un état des lieux de certains tronçons, une équipe de Géolithe a réalisé un diagnostic multidisciplinaire : imagerie des parois au radar géologique, sondages carottés, relevé de désordre, relevé photogrammétrique. Les interprétations radar ont été projetées sur une reconstitution numérique de la galerie en trois dimensions.

METHODOLOGIE

Acquisition et traitement des profils radar

Trois zones représentant un linéaire de 520m ont été investiguées. La prospection a consisté en cinq passages longitudinaux avec une antenne radar plaquée contre les parois de la galerie (**Fig. 1**) : profils en voûte (11h et 13h), en piédroits rive gauche (8h) et rive droite (4h), en radier (6h). Vingt profils transversaux ont également été réalisés, tous les 20m en moyenne. Le matériel utilisé comprenait une antenne radar avec deux fréquences centrales (200-600 MHz) de marque IDS munie d'une roue codeuse, une centrale d'acquisition RIS HI-MOD, un ordinateur de terrain et une perche spécialement conçue pour plaquer l'antenne contre la paroi de la galerie (**Fig. 1**). Cette antenne, de dimension l=38cm x L=43cm était suffisamment compacte pour un bon couplage sur les parois de la galerie, dont la largeur intérieure est de 3m et sa hauteur de 2.7m. Pour les profils en radier, partiellement inondé, un chariot avec caisson étanche et roue codeuse intégrée a été utilisé.

Chaque radargramme a été traité avec le logiciel REFLEXW selon une chaîne de traitement comprenant correction du temps zéro (temps zéro moyenné pour chaque radargramme, trouvé automatiquement par le premier pic d'amplitude positive), DC shift (fenêtre égale au temps d'écoute),

filtres fréquentiels (fréquences de coupure/de plateau pour l'antenne 600 MHz : 200/300 et 1300/1500 MHz, et pour l'antenne 200 MHz : 30/70 et 300/400 MHz) , suppression des bandes horizontales (fenêtre glissante de 200 traces, soit 6m). Les deux jeux de données de l'antenne bi-fréquence ont ensuite été fusionnés de sorte à garder les hautes fréquences en proche surface et les basses fréquences en profondeur, pour obtenir un unique radargramme pour chaque passage radar, alliant résolution et profondeur d'investigation optimales. Ce traitement ne peut être appliqué qu'avec des antennes radar duales : les données doivent avoir été acquises en même temps, avec le même incrément inter-scans et la même distance (SANDMEIER, 2020). Un gain de type « Energy decay » a ensuite été appliqué : il s'agit de diviser chaque trace par la courbe de décroissance moyenne des amplitudes du radargramme.

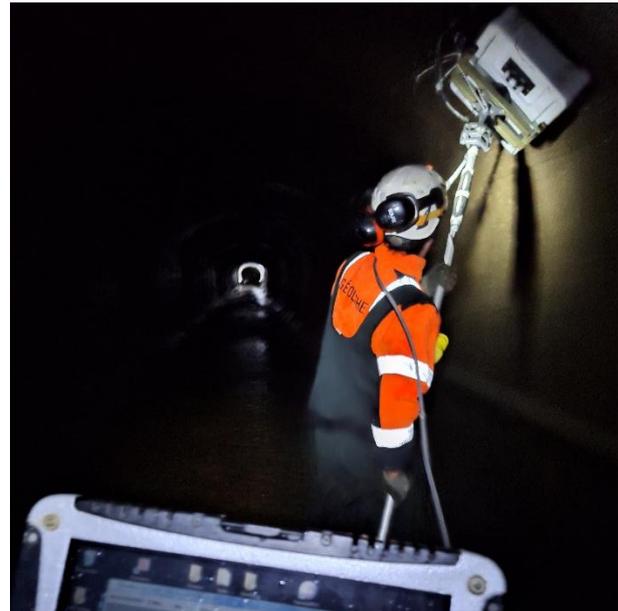
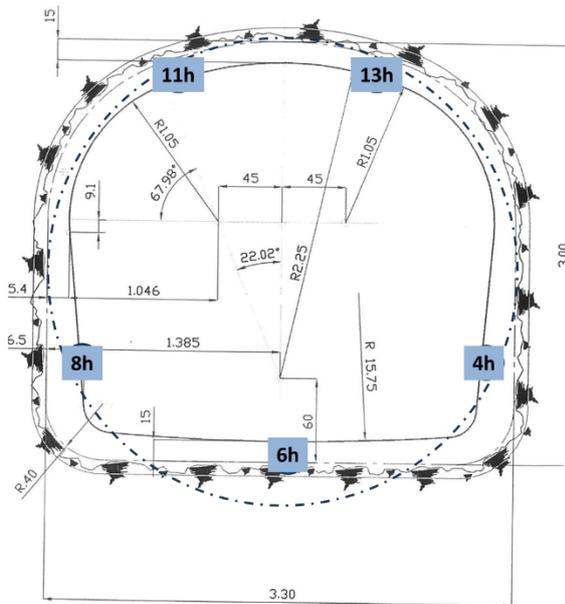


Fig. 1- Coupe type de la galerie avec positionnement des profils radars longitudinaux (à gauche) et photographie du matériel radar en cours d'acquisition (à droite)

La **Fig. 2** présente l'intérêt du traitement de fusion des données provenant d'antenne radar avec deux fréquences centrales. Lors du processus de fusion, les données de la partie « 200MHz » sont fortement atténuées jusqu'à 55 ns (environ 2m) puis prépondérants afin d'accroître la profondeur d'investigation à 4m. Au vu du signal radar encore fort et peu bruité à cette profondeur, il est probable que la profondeur d'investigation aurait pu être plus importante pour les deux jeux de données avec un temps d'écoute plus long (respectivement 80 ns et 120 ns pour les fréquences centrales 600 MHz et 200 MHz).

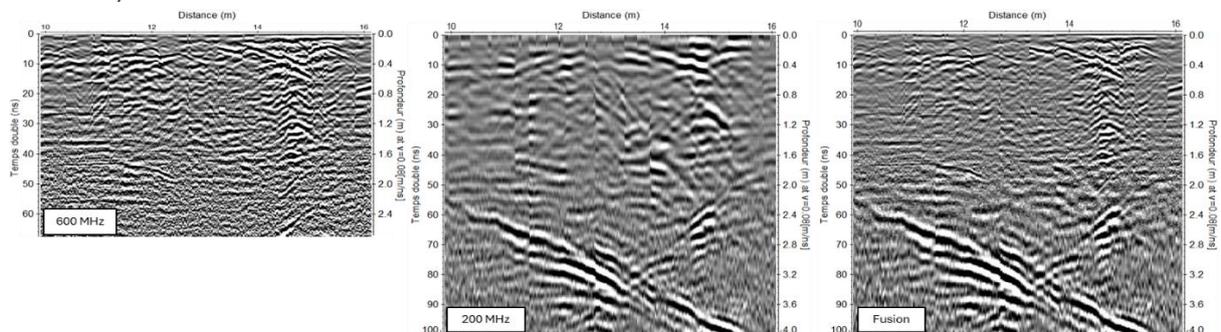


Fig. 2 - Extrait de radargrammes en piédroit-voûte (1h), traités avec la partie de l'antenne de fréquence centrale 600 MHz (à gauche), et de 200 MHz (au centre) puis après fusion de ces deux types de données (à droite).
Chaque radargramme est présenté avec un gain de type « energy decay »

Interprétation des données radar

Cinq catégories d'objets sont distinguées sur les radargrammes :

1. Réflecteurs subhorizontaux, de forte intensité, plus ou moins réguliers et marqués : ils correspondent à l'interface béton / substratum. Son identification est confirmée par une parfaite corrélation entre les radargrammes et les sondages carottés.
 2. Réflecteurs courts, d'intensité moyenne, généralement inclinés : il s'agit de discontinuités géologiques, type fracture/faulle ou stratigraphie (selon l'inclinaison et la régularité). Elles constituent de potentielles zones de circulation d'eau.
 3. Hyperboles de forte intensité, de polarité inverse, correspondant à éléments métalliques : ferrailage, cintres, boulons.
 4. Hyperboles ou réflecteurs isolés de forte intensité dont l'origine est inconnue : ils constituent ce que l'on appellera des anomalies. Il peut notamment s'agir de zones décomprimées et/ou déstructurées dans le terrain naturel, présentant un risque de cavité et de circulation d'eau.
 5. Zones comportant une multitude d'hyperboles chaotiques, par opposition à d'autres zones plus nombreuses, où le signal est atténué. Les zones avec les hyperboles peuvent correspondre à des déstructurations de la roche et du béton, ainsi qu'à des zones moins argileuses et/ou humides.
- Ces catégories seront illustrées dans les sections suivantes.

Projection des interprétations radar sur un modèle 3D

Chaque radargramme est référencé avec ses points métriques (PM) de début et de fin, puis annoté avec un code différent pour chaque catégorie d'objet interprété. Le PM, la profondeur, la catégorie d'objet et le type de profil radar sont extraits pour chaque point d'annotation. Du modèle 3D de la galerie, réalisé à partir d'un relevé photogrammétrique géoréférencé, sont extraites les coordonnées géographiques des passages radar, associées à un PM. Grâce à l'ensemble de ces données, les points d'annotation sont ensuite projetés à l'aide de formules trigonométriques adaptées à l'orientation de la galerie et à l'orientation du profil radar (8h, 4h, 11h ou 1h). Il en résulte un fichier texte avec les coordonnées géographiques et la catégorie d'objet de chaque élément annoté sur les radargrammes. Ces données sont ensuite insérées dans le modèle 3D de la galerie.

RESULTATS

Radargrammes interprétés

Deux radargrammes annotés sont présentés en **Fig. 3** à titre d'exemple. Le premier montre un grand nombre d'interfaces obliques globalement parallèles, interprétées comme la stratigraphie du massif rocheux, ainsi que des zones hétérogènes interprétées comme des zones moins argileuses/humides. Le deuxième radargramme montre la corrélation entre les sondages carottés et les interprétations radar de l'interface béton-roche ainsi que de deux décollements localisés. La couche de graviers compacts identifiée sur le sondage SC686 est interprétée comme un défaut ou une dégradation locale du béton : l'interface-béton roche passe donc en dessous de cette couche.

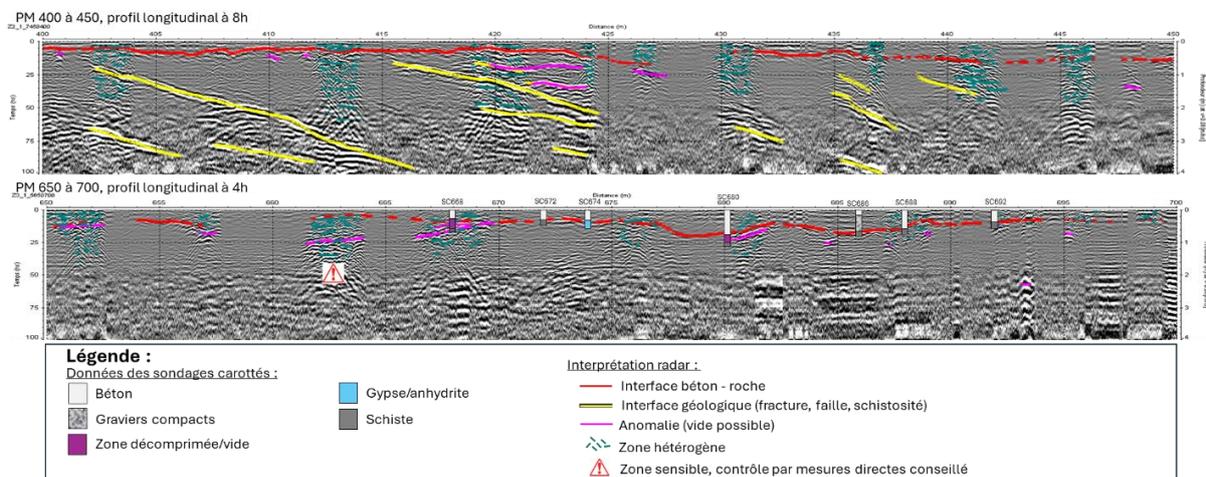


Fig. 3 – radargrammes longitudinaux interprétés, à 8h et 4h

Modèle 3D

Les interprétations radars projetées sont intégrées dans le modèle 3D sur la plateforme Rim-NAT[®] (Fig. 4), permettant la corrélation entre les différents profils radars et les autres investigations réalisées (photogrammétrie, sondage, relevé de désordre). Ce modèle offre ainsi une synthèse des résultats des investigations, et permet un travail collaboratif de prise de mesure, d'annotation et de documentation depuis un simple navigateur web. Cela en fait un outil décisionnel pour la réfection future de la galerie et les investigations complémentaires.

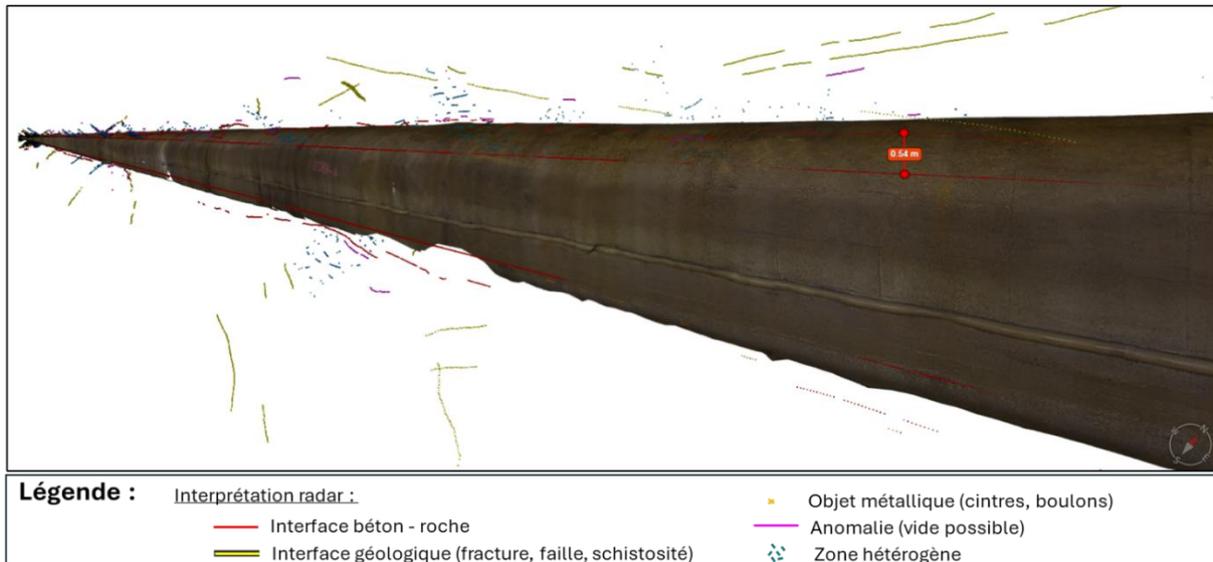


Fig. 4 – Vue 3D de la reconstitution numérique de la galerie par photogrammétrie, avec superposition des interprétations projetées des radargrammes

CONCLUSION

Le radar géologique a prouvé tout son intérêt pour l'auscultation de galeries souterraines : mesures continues et non destructives le long d'un linéaire, rapidité des mesures sur site, profondeur d'investigation de plusieurs mètres en arrière des parois, résolution suffisante pour détecter des petits éléments de type cintres ou ferrailage (selon la fréquence centrale du matériel utilisé). Des artefacts liés à la forme de la voûte sont remarqués sur les radargrammes transversaux mais peuvent être corrigés par l'application d'une migration topographique (SANDMEIER, 2020). Les radargrammes longitudinaux ne montrent eux pas d'artefacts lié à l'effet de la galerie. La présence d'une lame d'eau en radier a cependant altéré la qualité de certaines données, et l'ergonomie du matériel est à améliorer pour faciliter l'acquisition de données radar en piédroit et voûte sur de longs linéaires. Le temps consacré à l'interprétation et à l'annotation de radargrammes pourrait être considérablement réduit par l'utilisation d'une intelligence artificielle régénérative.

Sur cette étude, six zones présentent des désordres importants de type fracture, cavité et décollement en arrière de la voûte et des piédroits. Des sondages complémentaires sont recommandés pour infirmer ou confirmer ces désordres. Des cintres qui ne figuraient pas sur les plans du gestionnaire ont également été révélés, et la profondeur de l'interface béton-roche a été déterminée sur une majorité du linéaire. L'ensemble des résultats est synthétisé dans un synoptique développé de la galerie, ainsi que dans un modèle 3D de la galerie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SANDMEIER, K.J. , 2020 – Reflexw manual, version 9.5, 2020

SOLLA, M., PEREZ-GRACIA, V., FONTUL, S., 2021 - A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices. *Remote Sens.* 2021, 13, 672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>

XIENG, L., ZHU, H-L., SHRU, Z., TAN, S-H., LIANG, G-Q., ZHU, J., 2013 – GPR evaluation of the Damaoshan highway tunel : A case study. *NDT & E International*, vol 59, octobre 2013, Pages 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.05.004>

IMAGERIE DE LA STRUCTURE INTERNE DES VOLCANS DE BOUE. EXEMPLE DU VOLCAN DE BOUE SARIBOGHA, AZERBAÏDJAN.

JODRY C.^{1,2}, CAMERLYNCK C.³, SEOANE L.⁴, GABALDA G.⁴, BANO M.¹

¹ Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg/EOST/ENGES, CNRS UMR 7063, Strasbourg, France, cjodry@unistra.fr – maksim.bano@unistra.fr

² Université de Strasbourg, Azerbaijan State Oil and Industry University, French Azerbaijani University, Baku, Azerbaijan

³ METIS, Sorbonne Université, CNRS UMR 7619, Paris, France, christian.camerlynck@sorbonne-universite.fr

⁴ OMP-GET, Université Toulouse III, CNRS UMR 5563, Toulouse, France, luca.seoane@get.omp.eu – germinal.gabalda@ird.fr

RESUME

Les volcans de boue présentent des risques géologiques et environnementaux. Nous présentons une étude multi-géophysique combinant gravimétrie, TDEM et TRE pour affiner les modèles existants de la dynamique interne de ces milieux. Une première analyse montre peu de contrastes, mais des données cohérentes avec les structures effusives en place et les précédentes études menées sur d'autres sites. Un examen approfondi de l'ensemble des données devrait fournir plus d'informations.

Mots clés : Volcans de boue ; Gravimétrie ; TDEM ; TRE ; Écoulement de fluides

ABSTRACT

Mud volcanoes pose geological and environmental risks. We present a multi-geophysical study combining gravimetry, TDEM, and ERT to refine existing models of the internal dynamics of these environments. A preliminary analysis shows few contrasts, but the data are consistent with the effusive structures in place and previous studies conducted at other sites. A more detailed investigation of the entire dataset should provide further information.

Key words: Mud volcanoes; Gravimetry; TDEM; ERT; Fluid Flow

INTRODUCTION

Les volcans de boue se forment dans des bassins sédimentaires riches en hydrocarbures, ayant connu une forte sédimentation et subsidence passées (Mazzini et Etiope, 2017). Sous l'effet de la compression tectonique et de la surpression des fluides diagenétiques, un mélange d'eau, de boue argileuse et de gaz remonte par des fractures et font éruption en surface, de manière explosive ou effusive (e.g., Blouin et al., 2020). Cette dynamique induit des déformations de surface, des émanations de gaz et des éruptions soudaines, générant des risques environnementaux et géologiques (e.g., Kopf et al., 2010 ; Bonini et al., 2016 ; Mazzini et al., 2021).

L'imagerie géophysique, utilisée de manière individuelle ou multiméthode, s'est révélée efficace pour caractériser les structures internes et les chemins d'écoulement, et ainsi mieux comprendre leur influence sur la dynamique des volcans de boue (e.g., Istadi et al., 2009 ; Haroon et al., 2015 ; Odonne et al., 2020; Grassi et al., 2022). Pourtant, les processus d'activations associés restent mal compris, les modèles des structures peu profondes restent incertains, et aucun modèle global n'existe (e.g., Odonne et al., 2020, 2021). Nous proposons d'avancer dans ce domaine en explorant un nouveau site d'étude, à travers une campagne géophysique multiméthodes menée sur le volcan de boue Saribogha, situé en Azerbaïdjan.

CONTEXTE

Site d'étude

La partie Est de l'Azerbaïdjan abrite le plus grand nombre de volcans de boue au monde, tant terrestres que marins, en raison d'un contexte géologique favorable (Aliyev et al., 2015). On y trouve les plus

grands volcans de boue, à la morphologie variée et à l'activité intense (Mazzini et Etiope, 2017). Notre site se situe sur le volcan de boue Saribogha, situé sur une faille normale de l'anticlinal Alat, dans la région de Shamakhi-Gobustan (Aliyev et al., 2015). Il prendrait sa source à plus de 6 km de profondeur, traversant des sédiments argileux avec des intercalations de sables et grès. Le volcan lui-même est constitué d'une boue argileuse, provenant du broyage de ces sédiments, contenant des clastes centimétriques et plus ou moins fluide selon la teneur en eau et en gaz. Ce site est remarquable par son absence de cratère, présentant un dôme aplati et de nombreuses structures effusives, telles que des bassins, des lacs (pools et salsa lakes) et des gryphons (Fig. 1a, b), en fonction de l'apport gaz/fluide/boue (Mazzini et Etiope, 2017).

Acquisitions géophysiques

Trois types de mesures géophysiques ont été réalisées pour définir la structure interne et imager les zones de circulation de fluides sur Saribogha (Fig. 1c). Vingt sondages électromagnétiques dans le domaine temporel (TDEM) ont été effectués avec un WalkTEM ©ABEM, utilisant une boucle émettrice de 40 m x 40m et une bobine réceptrice en position centrale. Ces données 1D sont complétées par quatre lignes de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE), incluant deux lignes de 96 électrodes avec un espacement inter-électrodes de 2 m, l'une avec roll-along, et deux lignes de 48 électrodes avec un espacement inter-électrodes de 3 m, traversant des zones effusives. Les mesures ont été acquises avec un SyscalPro ©IRIS-Instrument et une configuration Wenner-Schlumberger. Enfin, une cartographie gravimétrique a été effectuée sur la partie Est du volcan de boue et sur une zone plus ancienne de flux de boues, sans structure effusive visible, à l'aide d'un CG6 ©Scintrex. Le positionnement des mesures a été réalisé avec un système GNSS RTK (cinématique en temps réel, de précision centimétrique) intégrant une base fixe et un récepteur mobile. Ce positionnement a été complété par un levé topographique de l'ensemble de la zone pour obtenir un modèle numérique de terrain qui servira pour les corrections gravimétriques.

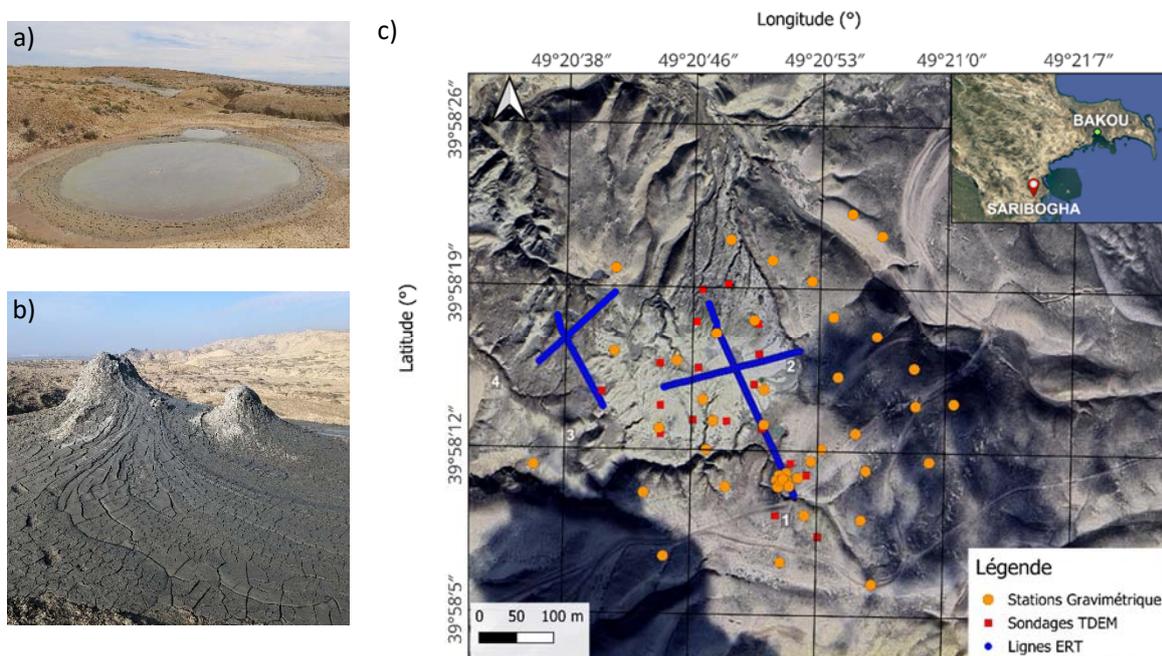


Fig. 1 – a) 1 pool combinée un 1 salsa lake, b) Gryphons, c) Carte Géoréférencée (Google ©2015, Airbus) avec la localisation des mesures géophysiques.

RESULTATS

Les données gravimétriques ont été traitées avec le logiciel open source CG6tool (Gabalda et Bonvalot, 2022). Après une correction de dérive, faible sur chaque jour, une correction à l'air libre et correction de plateau, l'anomalie de Bouguer simple a été obtenue (Fig. 2a). La densité utilisée pour la correction

de plateau est la densité moyenne de la croûte (2.7 g/cm^3). Une anomalie régionale domine, avec une variation d'environ $+2 \text{ mgal}$ du sud au nord de la zone investiguée. La prochaine étape consistera à appliquer une correction de terrain combinant un MNT régional pour les anomalies lointaines et un MNT local issu des relevés GNSS (Fig. 2b), espérant ainsi obtenir une résolution suffisante. Une correction de plateau plus précise pourra être obtenue en utilisant la méthode de Parasnis afin d'estimer linéairement la densité à partir du gradient régional, avec une valeur initiale de 2.18 g/cm^3 .

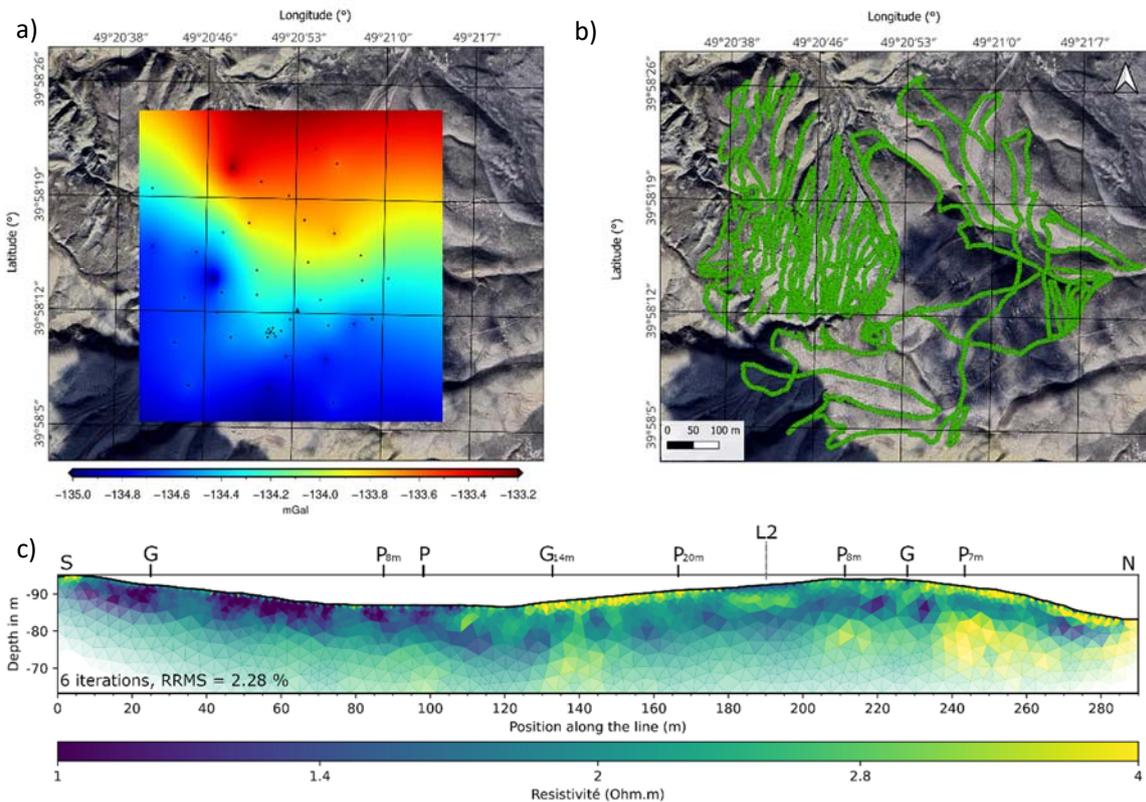


Fig. 2 – a) Carte d'anomalie de Bouguer simple avec localisation de la base (triangle) et des stations gravimétrique (mGal), b) Carte des points GNSS relevés (points vert) en mode cinématique, c) Inversion robuste du profil électrique ERT 1 avec les symboles G – Gryphon et P – Pool (avec la mention de distance à la ligne) et L2 marque le croisement avec le profil ERT 2.

Les données électriques ont été inversées avec la librairie Python pyGIMLi (Rücker et al., 2017). La Fig. 2c montre l'inversion robuste pour la ligne 1, 96 électrodes et 2 m d'espacement inter-électrodes (Fig. 1) avec une erreur moindre carrée relative de 2.28 % (RRMS) après 6 itérations. Le contraste de résistivité est faible (0.5 à $7 \Omega.m$, avec seulement 14% des données supérieures à $3 \Omega.m$) mais l'image permet d'identifier deux zones : une première de 0 m à 110 m, avec un milieu très conducteur de la surface jusqu'en profondeur, recoupe de grandes structures effusives actives (G, P_{8m} et P) ; une deuxième de 110 m à 290 m, où la partie conductrice située sous une couche de surface moins conductrice, est associée à des structures plus petites et lointaines. On interprète les zones de résistivité $< 2 \Omega.m$ comme des zones de circulations de boues fluides, à teneur en eau plus élevée et les zones entre $> 3 \Omega.m$ en surface à de la boue sèche peu consolidée. En profondeur, la zone conductrice semble bordée par un milieu moins conducteur, possiblement de la boue consolidée imperméable.

CONCLUSIONS

Les volcans de boue sont des structures qui apparaissent homogènes de par leur composition géologique. Cependant, la dynamique fluide permet tout de même de visualiser de faibles contrastes. Il reste cependant encore beaucoup de travail de traitement à faire sur les données géophysiques recueillis pour pouvoir être plus affirmatif et proposer un modèle de subsurface local.

Les prochaines étapes seront un retraitement complet des données électrique avec une comparaison entre les lignes. Pour la gravimétrie, il reste à faire la correction de topographie pour faire apparaître les anomalies locales. Enfin, l'ensemble des mesures TDEM devrait fournir une vision des couches profondes, leur profondeur d'investigation en milieu conducteur étant plus grande que celle de l'ERT.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALIYEV A.A., GULIYEV I.S., DADASHOV F.H., RAHMANOV R.R., 2015 – Atlas of the world mud volcanoes. *Nafta-Press, Baku*, 323 pages.

BLOUIN A., SULTAN N., PIERRON A., IMBERT P., CALLOT J.P., 2020 – Evolution Model for the Absheron Mud Volcano: From Stratified Sediments to Fluid Mud Generation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(12), 1–27. <https://doi.org/10.1029/2020JF005623>

BONINI M., RUDOLPH M. L., MANGA M., 2016 – Long- and short-term triggering and modulation of mud volcano eruptions by earthquakes. *Tectonophysics*, 672–673, 190–211. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.037>

GABALDA G., BONVALOT S., 2022 – CG6TOOL: An interactive computer program to process Scintrex CG6 gravity data. *Bureau Gravimétrique International. BGI Software*. <https://doi.org/10.18168/bgi.21>

GRASSI S., DE GUIDI G., PATTI G., BRIGHENTI F., CARNEMOLLA F., IMPOSA S., 2022 – 3D subsoil reconstruction of a mud volcano in central Sicily by means of geophysical surveys. *Acta Geophysica*, 70(3), 1083–1102. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00774-y>

HAROON A., ADRIAN J., BERGERS R., GURK M., TEZKAN B., MAMMADOV A. L., NOVRUZOV A. G., 2015 – Joint inversion of long-offset and central-loop transient Electromagnetic Data: Application to a mud volcano exploration in Perekishkul, Azerbaijan. *Geophysical Prospecting*, 63(2), 478–494. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12157>

ISTADI B.P., PRAMONO G.H., SUMINTADIREJA P., ALAM S., 2009 – Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1724–1739. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.03.006>

KOPF A., DELISLE G., FABER E., PANAHI B., ALIYEV C.S., GULIYEV I., 2010 – Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: A link between seismicity, pore-pressure transients and methane emission. *International Journal of Earth Sciences*, 99(1), 227–240. <https://doi.org/10.1007/s00531-009-0487-4>

MAZZINI A., ETIOPE G., 2017 – Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*, 168, 81–112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001>

MAZZINI A., AKHMANOV G., MANGA M., SCIARRA A., HUSEYNOVA A., HUSEYNOV A., GULIYEV I., 2021 – Explosive mud volcano eruptions and rafting of mud breccia blocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 555, 116699. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116699>

ODONNE F., IMBERT P., DUPUIS M., ALIYEV A. A., ABBASOV O. R., BALOGLANOV E. E., VENDEVILLE B. C., GABALDA G., REMY D., BICHAUD V., JUSTE R., PAIN M., BLOUIN A., DOFAL A., GERTAUDA M., 2020 – Mud volcano growth by radial expansion: Examples from onshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 112, 104051. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104051>

ODONNE F., IMBERT P., REMY D., GABALDA G., ALIYEV A. A., ABBASOV O. R., BALOGLANOV E. E., BICHAUD V., JUSTE R., DUPUIS M., BONVALOT S., 2021 – Surface structure, activity and microgravimetry modeling delineate contrasted mud chamber types below flat and conical mud volcanoes from Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 134(May), 105315. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105315>

PARASNIS D. S., 1986 – *Principles of Applied Geophysics* (4th Ed). Chapman and Hall, 402 p.

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. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011>

IMAGERIE GEOPHYSIQUE DES CIRCULATIONS D'EAU PAR TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE ET POLARISATION PROVOQUEE DANS LE THEATRE ANTIQUE DE MANDEURE (FRANCE)

RICHARD J.^{1,2}, DUVILLARD PA.¹, LENA E.³, GHORBANI A.¹, MOUGIN P.⁴, VAUDELET P.¹, REVIL A.²

¹ NAGA GEOPHYSICIS, 73000 Chambéry, France

² EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, 73370, Le Bourget-du-Lac, France

³ Atelier multiple, 38100 Grenoble, France

⁴ SIVAMM Syndicat Intercommunal à Vocation Archéologique de Mandeuire-Mathay, 25350 Mandeuire, France

RESUME

Les méthodes de mesures de résistivité électrique et de polarisation provoquée sont très utilisées pour comprendre les circulations d'eau. En utilisant des modèles pétrophysiques, les données peuvent ensuite être converties en teneur en eau, ce qui permet d'obtenir une imagerie des circulations d'eau. Cette méthodologie est ici testée sur un théâtre antique gallo-romain afin de répondre à une problématique affectant la stabilité des murs du site et de mieux comprendre la géologie où se situe l'édifice et ceux par une excellente approche non-invasive et applicable à des édifices archéologiques.

Mots clés : Tomographie résistivité électrique ; Polarisation provoquée ; Inversion 3D ; teneur en eau ; Archéologie

GEOPHYSICAL IMAGING OF WATER CIRCULATION USING ELECTRICAL TOMOGRAPHY AND INDUCED POLARIZATION: ANCIENT THEATER OF MANDEURE, FRANCE

ABSTRACT

Electrical resistivity and induced polarisation methods are widely used to understand water circulation. Using petrophysical models, the data can then be converted into water content, providing an overview of water circulation. This methodology is being tested here on an ancient Gallo-Roman theatre to respond to a problem of water circulation affecting the stability of the building's walls and to gain a better understanding of the geology in which the building is located, thus providing an excellent non-invasive approach that can be applied to archaeological structures.

Key words: Electrical resistivity tomography, Induced Polarization, 3D inversion, water content, Archeology.

INTRODUCTION

Les sites archéologiques présentent des enjeux de conservation, parfois affectés par des pathologies liées aux infiltrations d'eau qui altèrent les matériaux ou les ouvrages qui les composent. Les auscultations géophysiques, non invasives par nature, permettent de caractériser ces sites afin d'établir un diagnostic et d'adapter des stratégies correctives.

Pour comprendre les circulations d'eau à l'échelle des murs du théâtre et du versant, des mesures géophysiques par tomographies de résistivité électrique et de polarisation provoquée ont été réalisées sur le théâtre antique durant les périodes hivernale et estivale, afin de caractériser deux fonctionnements hydrogéologiques distincts.

SITE D'ETUDE

Le théâtre gallo-romain de Mandeuire, érigé au premier siècle de notre ère, est situé dans la plaine alluviale du Doubs. Il était le plus grand théâtre de Gaule pouvant accueillir jusqu'à 20 000 spectateurs. Il est situé sur le flanc d'un escarpement rocheux de calcaire, à la base du Rauracien (oxfordien), au-dessus d'une couche marno-calcaire (Barral et al., 2015).

À l'intérieur des galeries du théâtre, plusieurs déformations des maçonneries ont été observées, notamment un gonflement des murs au niveau des caissons nord et sud (Fig. 1). Ces pathologies sont causées par des poussées hydriques, accentuées lors des précipitations, et présentent un risque pour la conservation de l'édifice.

Afin de comprendre les chemins de circulation d'eau affectant ces murs et d'adapter des mesures correctives, ce site a fait l'objet de campagnes de mesures par méthodes géoélectriques en février et en août 2024, à deux périodes hydrique distinct. Des profils à haute résolution ont été réalisés à l'échelle des murs présentant des pathologies, ainsi que des profils plus étendus sur l'ensemble du site pour étudier les circulations d'eau à l'échelle du versant.

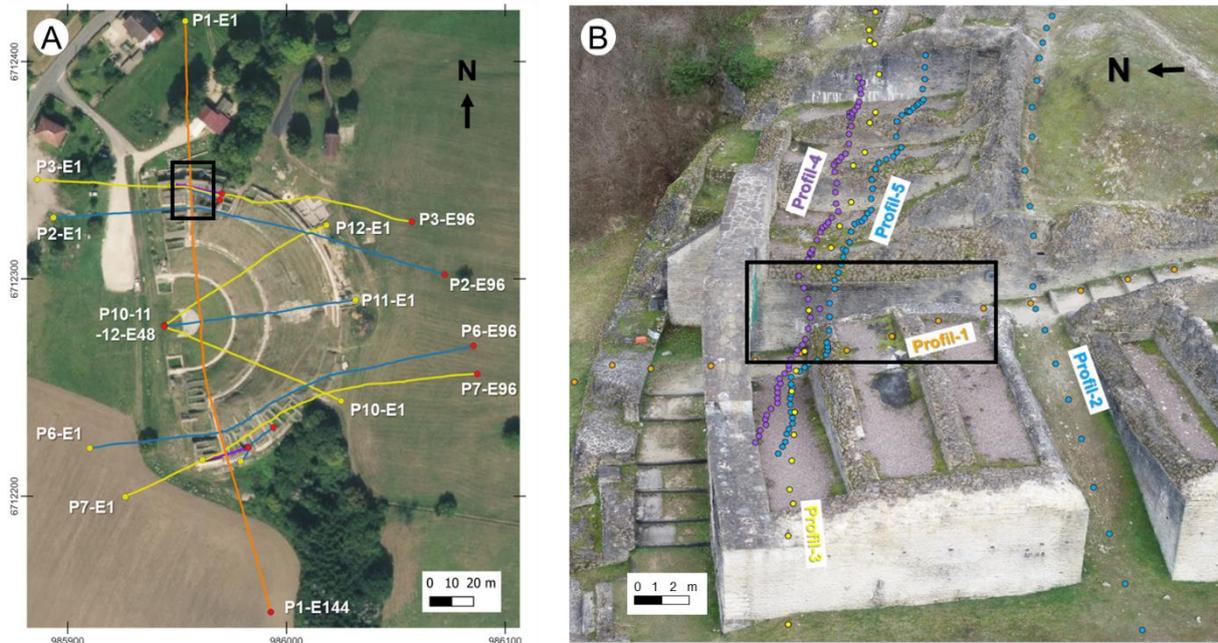


Fig. 1– Localisation des profils géophysiques (A) sur l'ensemble du site (B) et au niveau du caisson nord du théâtre, avec l'implantation des profils géophysiques haute résolution. Le rectangle noir indique le mur M54 présentant un gonflement et des pathologies liées à la circulation d'eau détaillé ci-dessous.

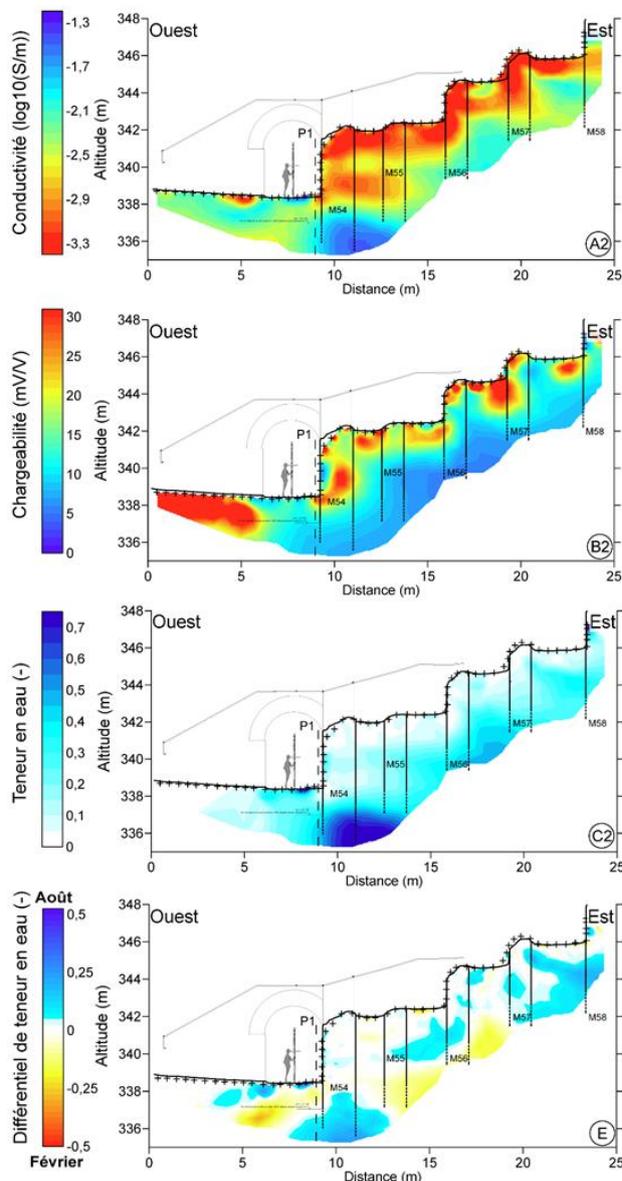
METHODES

Les mesures de terrain en résistivité et chargeabilité électrique ont été réalisées à l'aide d'un résistivimètre Iris Instruments SYSCAL TERRA, en utilisant un protocole Wenner trié pour améliorer la qualité des mesures. Quatre profils haute résolution avec un espacement de 50 cm ont été réalisés, ainsi que huit profils avec un espacement de 2 mètres. La topographie de chaque électrode a été mesurée par GPS centimétrique et extraite d'un modèle 3D photogrammétrique acquis par drone, notamment pour les changements topographiques complexes. Les mesures ont été réalisées à deux reprises, avec la même position des électrodes entre les deux acquisitions, en février et en août 2025.

Les données ont été inversées en 2D avec PyGIMLi (Rücker et al., 2017) et en 3D avec ECT3D (Soueid Ahmed et al., 2018) pour tenir compte de la géométrie complexe des murs et des gradins. Les données de conductivité et de chargeabilité électrique ont ensuite été converties en tomogrammes de teneur en eau à l'aide de modèles pétrophysiques (Revil et al., 2020). L'analyse des résultats de l'inversion 3D a permis de classer les conductivités électriques en trois grandes catégories, guidé à partir de mesures de conductivité complexe réalisées en laboratoire sur des échantillons de roches et sol du théâtre. Ce modèle 3D offre une vue simplifiée des structures principales du théâtre et permet de mieux comprendre l'activité hydrogéologique à l'échelle du site.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tomographie 2D haute résolution à l'échelle des caissons



Les profils en 2D haute résolution permettent de visualiser les zones partiellement saturées et les zones macroporeuses avec des vides, comme dans le cas du caisson nord (Fig. 2).

Les tomogrammes de conductivité révèlent, sur la partie supérieure des murs, une zone peu conductrice ($< 10^{-3}$ S/m) attribuée à la présence de géotextiles en surface, qui favorisent l'assèchement des caissons.

Le remplissage des caissons apparaît hétérogène, avec la présence de quelques vides entre les murs (zones de forte chargeabilité > 25 mV/V). Ces cavités résultent du remplissage hétérogène des caissons soit par des déchets de tailles

Ce remplissage résulte principalement de déchets de pierres appelé « groise » de taille utilisée lors de la construction du théâtre. Ces vides semblent résulter du lessivage des éléments fins contenus dans ces remblais.

Dans le caisson nord, une circulation préférentielle d'eau est visible sur les tomogrammes de conductivité électrique depuis le deuxième caisson, passant à travers les murs M55 et M54, à une altitude d'environ 340 m. La partie basse des murs repose sur du calcaire sain, ce qui correspond également à la profondeur maximale qui semble avoir été atteinte lors des fouilles archéologiques.

Fig. 2 – Tomogrammes 2D localisés sur le mur M54 sur le caisson nord du théâtre en (a) conductivité, (b) chargeabilité et (c) teneur en eau et (d) différentiel de teneur en entre février et août 2025.

Le différentiel des mesures de teneur en eau, issues des périodes hivernale et estivale, permet d'accentuer les contrastes et de visualiser le cheminement de l'eau derrière les murs et à l'échelles du site (activité de la nappe phréatiques).

Tomographie 3D à l'échelle du site

Les profils avec un espacement de 2 m ont été inversés en 3D pour chaque période hydrique de février à août, puis comparés afin d'étudier les potentielles circulations d'eau d'ordre hydrogéologique liées à la géologie et à la disposition du théâtre (Fig. 3).

Les tomogrammes de conductivité permettent d'observer le relief calcaire naturel (faible conductivité) sur lequel repose la structure du théâtre, ainsi que les dépôts alluviaux situés sous les

caissons (forte conductivité). La présence d'une nappe phréatique est également observée très proche de l'orchestra (place centrale du théâtre) qui montre que le caisson sud repose sur un paléoméandre du Doubs.

L'étude révèle une asymétrie hydrologique au sein du théâtre, avec des caissons nord présentant une conductivité plus élevée que ceux du sud. Cette différence s'explique par la géologie du site : les caissons sud, situés sur un paléoméandre, bénéficient d'un meilleur drainage mais aussi d'une circulation d'eau plus importante en raison d'un calcaire plus fracturé. En revanche, les caissons nord reposent sur un sol moins perméable, favorisant les remontées capillaires et les écoulements au sein d'horizon argileux intermédiaire, ce qui engendre des désordres structurels.

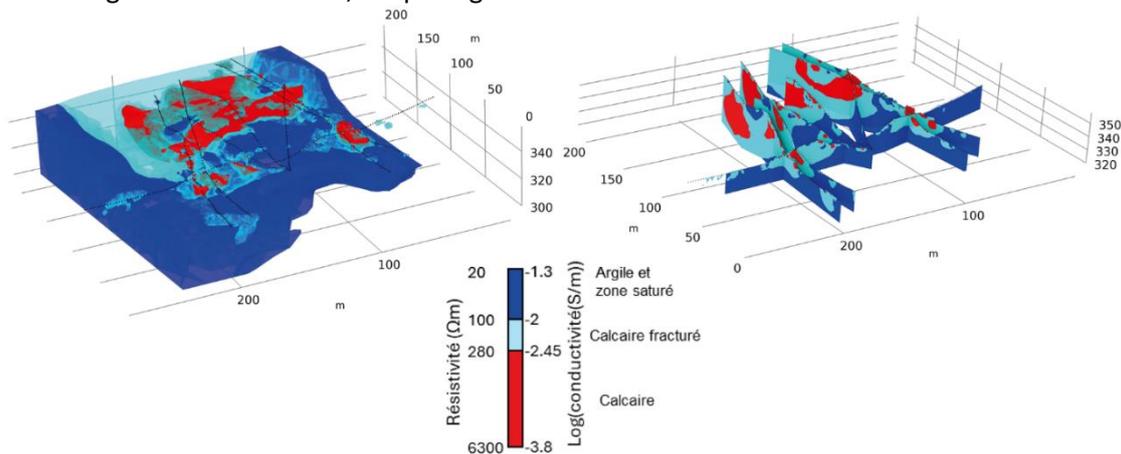


Fig. 3 – Modèle 3D des conductivités électrique par classification.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les méthodes de résistivité électrique et de polarisation provoquée permettent une meilleure compréhension du site et ont révélé plusieurs observations d'ordre hydrogéologique, archéologique et architectural. Le mur intérieur du caisson nord est particulièrement affecté par la circulation d'eau provenant de la partie supérieure du théâtre tandis que le caisson sud est le comportement hydrogéologique. Ces méthodes d'auscultation non invasives des pathologies existantes guideront les opérations de travaux pour la préservation de l'édifice. Pour améliorer ces reconnaissances, les mesures géophysiques électriques pourraient être répétées et complétées par une étude sismique de réfraction. Cette approche conjointe permettrait de mieux suivre l'évolution de la qualité du rocher support du théâtre.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Pays de Montbéliard Agglomération (E. Poletto) pour le financement et le bon déroulement de l'étude. Nous remercions également ERM (Etudes Recherches Matériaux ; H. Verron et B. Merckx) pour les discussions constructives.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRAL P., BILLOIN D., BLIN S., BOSSUET G., CRAMATTE C., FRUCHART C., LAPLAIGE C., MAMIE A., MONNIER J., MOUGIN P., NOUVEL P., PININGRE J-F, THIVET M., 2015** - Nouvelles données sur l'agglomération antique d'Epomanduodurum (Mandeure et Mathay, Doubs). *Gallia Archéologie des Gaules*, 72(2), 11–142.
- REVEL A., SOUEID AHMED A., COPERREY A., RAVANEL 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 FM., 2017** – pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106–123
- SOUEID AHMED A., REVEL A., BYRDINA S., COPERREY A., GAILLER L., GROBBE N., VIVEIROS F., SILVA C., JOUGNOT D., GHORBANI A., HOGG C., KIYAN D., RATH V., HEAP M.J., GRANDIS H., HUMAIDA H., 2018** – 3D electrical conductivity tomography of volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 356, 243-263

PROSPECTION COMBINÉE ELECTROSTATIQUE ET GEORADAR D'UN MONUMENT HISTORIQUE : CATHEDRALE SAINT-PAUL (LIEGE, BELGIQUE)

SCHAMPER C. ¹, DABAS M. ², FLAGEUL S. ¹, BOLLE C. ³, HOFFSUMMER P. ⁴, PIAVAUX M. ⁵, TABBAGH A. ¹

¹ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, Paris, France, cyril.schamper@sorbonne-universite.fr, sebastien.flageul@sorbonne-universite.fr, alain.tabbagh@sorbonne-universite.fr

² AOROC-CNRS-ENS-PSL, Paris France, michel.dabas@ens.psl.eu

³ Agence wallonne du Patrimoine (AWaP), Liège, Belgique, caroline.bolle@awap.be

⁴ Unité de recherche Art, Archéologie et Patrimoine, Université de Liège, Belgique, phoffsummer@uliege.be

⁵ Université de Namur, PaTHs (AcanthuM)/ILEE, Namur, Belgique, mathieu.piavaux@unamur.be

RESUME

La cathédrale Saint-Paul de Liège (Belgique) a fait l'objet d'une première prospection géophysique, combinant les méthodes électrostatique et géoradar. Les développements instrumentaux de ces deux dernières décennies permettent aujourd'hui d'effectuer des mesures à haut rendement assurant un maximum de couverture et d'informations en fonction de la profondeur. Le croisement des résultats des deux méthodes permet de conforter l'interprétation des anomalies observées dont certaines peuvent être reliées aux monuments antérieurs, notamment l'ancienne église romane de Saint-Paul.

Mots clés : archéométrie, géoradar, électrostatique, cathédrale romane.

ABSTRACT

A first geophysical survey was carried out at Saint-Paul cathedral in Liège (Belgium), which combined electrostatic and georadar methods. Instrumental developments over the last two decades now enable high-performance measurements to be carried out, providing maximum coverage and information as a function of depth. Cross-referencing the results of the two methods helps to confirm the interpretation of the anomalies observed, some of which may be linked to earlier monuments, notably the former Romanesque church of Saint-Paul.

Key words: archaeometry, ground-penetrating radar, electrostatic, Romanesque cathedral.

INTRODUCTION

La cathédrale Saint-Paul de Liège est une ancienne collégiale promue en 1802 au rang de cathédrale, suite à la disparition de la cathédrale Saint-Lambert. Fondée peu après 965 par l'évêque Eracle, elle fut achevée et consacrée par son successeur, Notger, en 972. Cette église, progressivement démolie à partir du 13^e siècle pour faire place à l'église gothique, aurait initialement comporté deux chœurs et une crypte située sous le chœur oriental, mais cette information est sujette à caution (Forgeur, 1969, p. 161). L'absence de fouilles d'envergure n'a jamais permis de le vérifier. Néanmoins, une tranchée creusée lors de la pose de canalisations de chauffage, au nord-ouest de l'escalier menant au chœur, a mis au jour des maçonneries qui pourraient appartenir au chœur roman (Gob, 1986). Du cloître primitif, lui aussi reconstruit en plusieurs phases au Bas Moyen-Âge, ne subsisteraient qu'une cave voûtée (au sud-est). Cependant, l'espoir d'en connaître davantage a été nourri par la découverte de maçonneries appartenant aux premières phases d'occupation, mises au jour à faible profondeur au pied de la façade occidentale (Mora-Dieu, 2008).

Outre la recherche des vestiges de l'église et du cloître primitifs, ces prospections visaient à tenter de corréler les découvertes dans le sol avec celles du bâti – notamment des phases de construction, des arrêts de chantier identifiés en élévation et dans les combles (Hoffsummer *et al.*, 2005 ; Bolle, 2016).

MATERIELS ET METHODES

Aucune étude géophysique n'avait été entreprise auparavant dans la cathédrale Saint-Paul. La combinaison des méthodes électrostatique et géoradar dans une cathédrale n'est pas nouvelle (Dabas *et al.*, 2000). Depuis, des développements, principalement en électronique, ont permis l'enregistrement de plusieurs écartements à la fois en électrostatique et un meilleur rapport signal/bruit (Flageul *et al.*, 2013). Les dernières versions de prototype électrostatique (MP3) permettent aujourd'hui de mesurer à la fois la résistivité électrique apparente, mais aussi la permittivité diélectrique (capacité intrinsèque de polarisation du milieu ; Schamper *et al.*, 2021). En géoradar l'électronique a également évolué, permettant un meilleur rapport signal/bruit et des mesures avec plusieurs espacements d'antennes dans un volume réduit en même temps, permettant des levés très productifs. L'utilisation de stations totales robotisées pour le positionnement spatial des mesures géophysiques, en particulier dans des environnements fermés comme les cathédrales, a permis d'augmenter non seulement la vitesse, mais aussi la précision des mesures, et de faciliter l'interprétation.

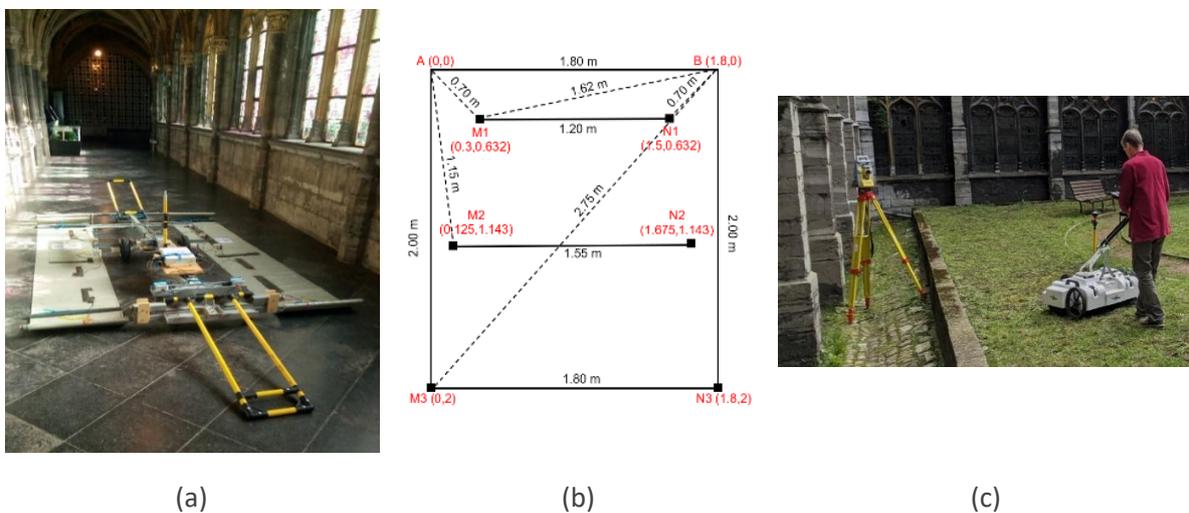


Fig. 1 – (a) Prototype électrostatique MP3 dans le cloître ; (b) schéma avec les positions des pôles d'injection (A et B) et les 3 paires de pôles de mesure (Mx et Nx) ; (c) dispositif GPR Raptor-45 (ImpulseRadar) et station robotisée Geomax en action dans le jardin du cloître

Le prototype électrostatique utilisé pour cette étude est illustré en Figure 1a avec un schéma en Figure 1b. Il est nommé MP3 pour « multi-pôles 3 », car trois paires de pôles de mesure (Mx et Nx) sont utilisées pour mesurer la résistivité électrique apparente et la permittivité diélectrique à une fréquence de 31,25 kHz sur trois volumes différents à partir de la surface. Le prototype MP3 a été utilisé pour la première fois sur la Grand Place de Bruxelles (Blary *et al.*, 2018). Lors de la présente étude, le temps nécessaire à la mise en place (notamment le repositionnement de la station totale) et au déplacement de l'appareil vers les multiples zones disjointes (13 en tout) a été plus long que l'acquisition en tant que telle des profils. Afin de limiter des effets allers et retours (ex. festons) sur les cartes générées, les profils ont tous été acquis dans le même sens, ce qui a très peu augmenté le temps total de prospection. L'échantillonnage le long des lignes d'acquisition a été fixé à 0,1 m, et l'espacement inter-lignes autour de 0,5 m, la position étant transmise par la station totale robotisée (Geomax Zoom95) chaque seconde via Bluetooth. La résistivité électrique apparente et la permittivité diélectrique pour les 3 espacements ont été calculées par modélisation électromagnétique complète afin de prendre en compte les effets d'induction lorsque le sous-sol devient conducteur ($< 50 \Omega\text{m}$).

RESULTATS

Les cartes obtenues en électrostatique (Figure 2) et en géoradar (Figure 3) mettent en évidence un certain nombre d'anomalies liées au type de matériau de remplissage, aux vestiges des bâtiments

anciens, mais aussi au réseau de chauffage. Les matériaux résistant électriquement comme ceux de construction ou les vides correspondent à de faibles valeurs de permittivité (Figure 2b), et à de faibles atténuations du signal (vert clair) en géoradar (Figure 3a). Dans le cas de cette prospection, les valeurs de résistivité -apparente- comprises entre ~ 60 et $150 \Omega\text{m}$ correspondent généralement aux matériaux de construction ou à des remblais. Les valeurs inférieures à $40 \Omega\text{m}$ (correspondantes à des zones sombres de forte atténuation en géoradar) sont susceptibles de correspondre à des matériaux limoneux (limons fluviaux selon les données géologiques et géotechniques), et sont corrélés avec de très fortes valeurs de permittivité proches voire supérieures à $10\,000$. (Figure 2b).

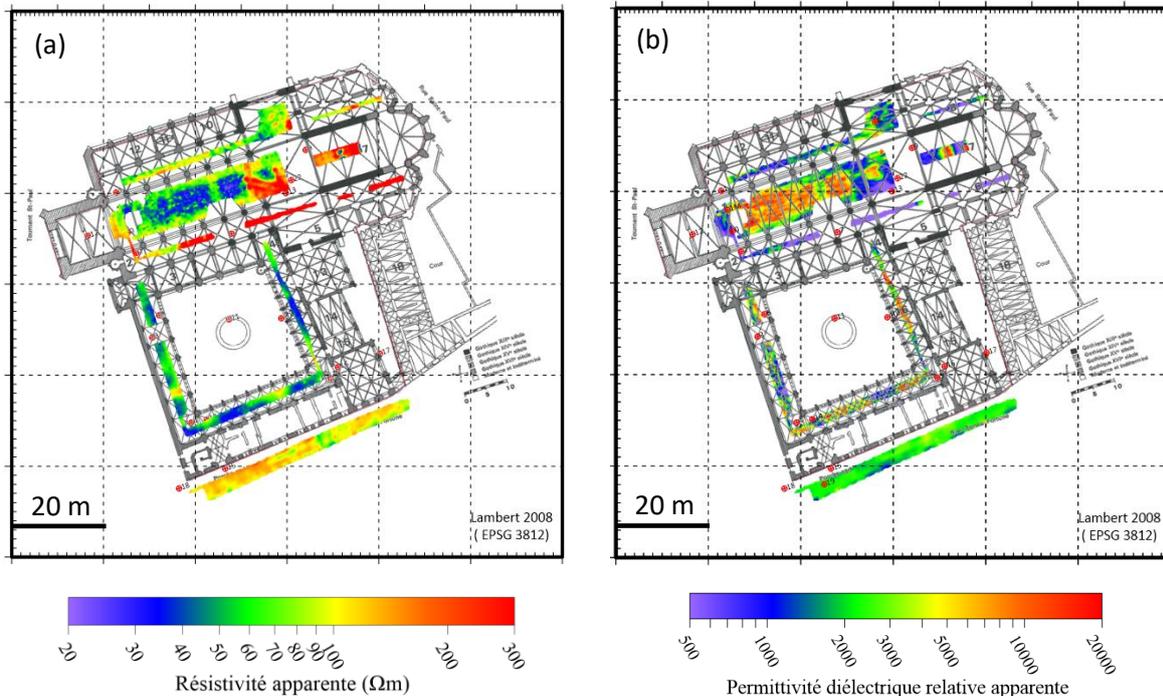


Fig. 2 – Cartographies obtenues avec le dispositif électrostatique pour la voie N°2 intermédiaire (profondeur 0 à 1,2 m) : (a) résistivité électrique apparente ; (b) permittivité diélectrique relative apparente. Les points rouges correspondent aux stations de la station totale robotisée GEOMAX.

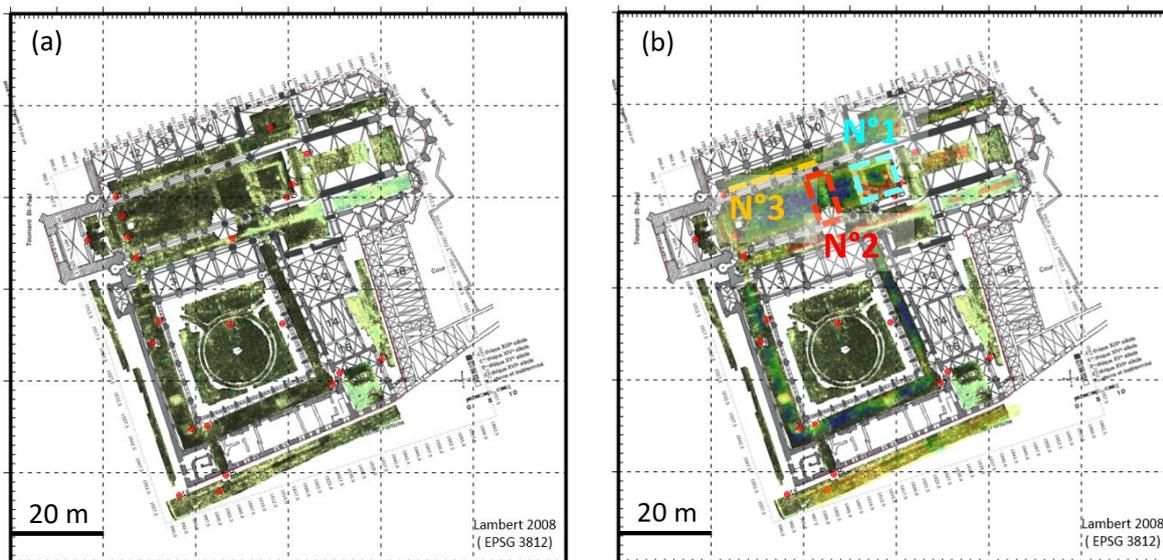


Fig. 3 – Cartographie géoradar en mode « Osprey View » (Condor Software, Impulse Radar, intégration ici entre 52 et 60 cm) : (a) résultat géoradar seul ; (b) superposition des résultats géoradar avec la carte de résistivité apparente obtenue en électrostatique sur la voie 2 (Figure 2a).

Parmi les anomalies majeures repérées on peut remarquer (Figure 3b) :

- Anomalie N°1 : une structure carrée clairement visible en géoradar, beaucoup moins en électrostatique à cause de l'influence du réseau de chauffage avoisinant. L'analyse fine des résultats géoradar indique une épaisseur de mur proche d'1 m, indiquant probablement les fondations d'une structure en hauteur (ex. l'ancien chœur ou une ancienne tour ?)
- Anomalie N°2 : un linéaire d'une épaisseur également au moins métrique et qui correspondrait selon les connaissances historiques du site à un mur d'arrêt de chantier.
- Anomalie N°3 : un linéaire qui n'est pas parfaitement aligné (quelques degrés) avec les piliers de la cathédrale, et pourrait correspondre à un mur de l'ancienne église romane.

CONCLUSIONS

L'évolution de l'électronique, en électrostatique comme en géoradar, permet aujourd'hui d'effectuer des mesures à haut rendement sur des surfaces importantes (multi-antennes en géoradar) tout en intégrant plusieurs profondeurs en un seul passage (multi-offset en électrostatique). En électrostatique, il est possible aujourd'hui d'estimer également la permittivité diélectrique qui donne des renseignements supplémentaires pour identifier les types de matériau. L'évolution technique des mesures de positionnement en temps réel comme les stations totales robotisées, permet une co-localisation rapide des différentes mesures (y compris dans le cas de zones adjacentes mais isolées), et donc un passage plus rapide à l'étape d'interprétation avec les historiens et archéologues. Pour les futures prospections en intérieur, une version plus compacte de l'électrostatique (environ 1m de côté) permettra de couvrir davantage de zones communes avec le géoradar.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide constante de Caroline Bolle et le soutien financier de l'Agence wallonne du Patrimoine (AWaP), Contrat réf. A2.00.03-23-3077.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLARY F., SOSNOWSKA P., CHARRUADAS P., VAN NIEUWENHOVE B., DABAS M., TABBAGH A., FLAGEUL S., 2018** – Prospection de la « Grand Place » de Bruxelles : utilisation de la méthode électrostatique. *11th GEOFCAN conference (Antony, France, 20-21 November)*.
- BOLLE C., 2016** – Liège/Liège : suivi archéologique dans le cloître de la cathédrale Saint-Paul, *Chronique de l'archéologie wallonne, 24, p. 215-218*.
- DABAS M., CAMERLYNCK C., CAMPS P.F., 2000** – Simultaneous use of electrostatic quadrupole and GPR in urban context: investigation of the basement of the Cathedral of Girona (Catalunya, Spain). *Geophysics, 65(2), 526–532*.
- FLAGEUL S., DABAS M., THIESSON J., REJIBA F., TABBAGH A., 2013** – First in situ tests of a new electrostatic resistivity meter. *Near Surface Geophysics, 11(3), 265–274*.
- FORGEUR, R., 1969** – La construction de la collégiale Saint-Paul aux temps romans et gothiques. *Bulletin de la commission royale des Monuments et Sites, 18 : 155-204*.
- HOFFSUMMER P., TOURNEUR FR., DOPERÉ FR., PIAVAUX M., 2005** – Eglises liégeoises en chantier au XIII^e et au XIV^e siècle. In Van den Bossche, B. (Dir.), *La cathédrale gothique Saint-Lambert à Liège : une église et son contexte. Actes du colloque international de l'Université de Liège, 16-18 avril 2002, Liège, ERAUL, 108 : 97-110*.
- GOB A., 1986** – Vestiges de la collégiale Saint-Paul d'époque romane à Liège. *Activités 84 à 85 du SOS fouilles, 4/1986 : 171-173*.
- MORA-DIEU G., 2008** – Liège/Liège : les vestiges du cloître ottonien à la cathédrale Saint-Paul, *Chronique de l'archéologie Wallonne, 15, 136-137*.
- SCHAMPER C., TABBAGH A., FLAGEUL S., BENECH C., VITALE Q., BENJAMIN C., DABAS M., PARFANT C., AND PERRUCHON-MONGE L., 2021** – Electrostatic profiling and mapping of electrical resistivity and dielectric permittivity in an urban context. *Near Surface Annual Meeting (Bordeaux, France, 29 August-2 September)*.

IMPACT DE LA CONDUCTIVITE DU MILIEU SUR LES MESURES ELECTROMAGNETIQUES

TEMPERE Audrey¹, MATHE Vivien¹, LEVEQUE François¹

¹ LIENSS, La Rochelle, France, audrey.temperere@univ-lr.fr

RESUME

Cette étude examine l'impact de la conductivité du milieu sur les mesures effectuées par un conductivimètre lors de la détection d'objets en proche surface. Des essais réalisés en conditions contrôlées sur un bidon de poudre de magnétite montrent une réponse stable, indépendante de la conductivité du sol, tandis que la réponse d'une plaque en aluminium s'amplifie en milieu conducteur. L'impact de la conductivité du milieu sur les mesures dans le premier mètre du sol semble donc limité, confirmant la pertinence des méthodes électromagnétiques en archéologie pour la détection d'objets sur estran.

Mots clés : *Electromagnétisme, Estran, Conductivité, Phase, Milieu salé*

ABSTRACT

This study examines the impact of soil conductivity on electromagnetic prospecting for detecting near-surface objects. Tests conducted under controlled conditions on a magnetite powder plastic bottle show a stable response regardless of soil conductivity, while an aluminum plate exhibits an amplified response in conductive environments. The influence of conductivity within the first meter of soil appears limited, confirming the relevance of electromagnetic methods for object detection on the intertidal zone in an archaeological context.

Key words: *Electromagnetism, Intertidal zone, Conductivity, Phase, Saline environment*

INTRODUCTION

Les estrans sableux, définis comme les zones littorales comprises entre les limites des marées hautes et basses, constituent des milieux particulièrement dynamiques. Sous l'effet du dégraisement provoqué par les mouvements tidaux, de nombreux artefacts et structures archéologiques (telles que des épaves de navires, des vestiges de pêcheries, des installations de briquetage ou encore divers éléments de mobilier antique) peuvent être mis au jour, rendant possible leur identification lors de prospections pédestres. Si la détection de structures enfouies repose traditionnellement sur ces méthodes directes, les techniques géophysiques, et notamment la prospection géomagnétique, offrent une approche complémentaire pour identifier ces vestiges avant leur exhumation par la mer (Weiss et al., 2007; Moffat & Raupp, 2008). L'utilisation de conductivimètres pour la prospection sur estran a déjà été explorée, notamment pour la recherche de zones d'extraction de tourbe (Delefortrie et al., 2014) ou d'épaves en bois (Moffat & Raupp, 2008; Wilken et al., 2022). Cependant, en milieu salé, donc hautement conducteur, les instruments électromagnétiques (EM) voient leur profondeur d'investigation réduite à mesure que la conductivité du sol augmente (Callegary et al., 2007). De plus, cette augmentation de la conductivité entraîne une convergence des signaux en phase et en quadrature, ce qui complique l'interprétation des données. Néanmoins, certaines informations propres au signal en phase peuvent être exploitées (Delefortrie et al., 2014; Deidda et al., 2023). Dans un contexte archéologique où l'objectif est de détecter des objets de petite taille dans le premier mètre de profondeur du sol, une question centrale se pose : le milieu salin atténue-t-il trop le signal, rendant les prospections électromagnétiques inefficaces ?

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Pour répondre à cette problématique, des expériences ont été mises en place avec deux objets aux propriétés physiques très différentes : un bidon de 1 l rempli de poudre de magnétite ($\emptyset 0,102 \times 0,18$ m), caractérisée par une forte susceptibilité magnétique, sans comportement

métallique, par conséquent avec une conductivité électrique négligeable (fig.1 – a), et une plaque en aluminium (0,489 x 0,441 x 0,0004 m), hautement conductrice mais de susceptibilité magnétique très faible (fig.1 – b).

Le premier protocole expérimental consiste à enfouir ces objets à trois profondeurs différentes sur un estran sableux à trois altitudes, du haut vers le bas de plage, présentant une conductivité croissante. Des profils sont acquis en passant au-dessus des objets. Les mesures sont réalisées tous les 0,1 m. Afin d'assurer une bonne reproductibilité des profils, les instruments sont montés sur un chariot maintenant la base de l'instrument de mesure à une distance de 0,29 m par rapport au sol. Un second protocole a été mis en place pour caractériser la réponse des objets dans un milieu résistant : les objets ont été déplacés dans l'air, au-dessus des capteurs, à différentes distances espacées de 0,05 m. L'instrument est positionné sur le sol et retourné (base vers le haut) sur un sol peu épais développé sur un substrat calcaire. Dans les deux cas, les distances objets-capteurs sont prises en fonction des centres des objets. Les essais ont été réalisés avec un EM38-MK2 (Geonics Limited), un dispositif électromagnétique multi-bobines doté d'un écartement inter-bobine de 1 m et d'un autre de 0,5 m, opérant à une fréquence de 14,5 kHz.

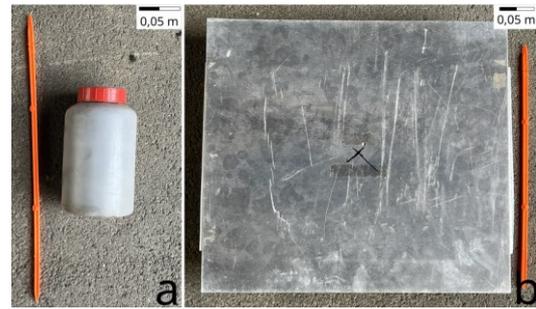


Fig. 1 – Objets utilisés pour l'expérience avec (a) le bidon de 1 l de magnétite en poudre et (b) la plaque en aluminium.

RESULTATS

Réponse du bidon de 1 l de poudre de magnétite sur le paramètre en phase

Les résultats de l'étude de la réponse spatiale du paramètre en phase de l'EM38-MK2, obtenus à partir des expériences menées sur le bidon de 1 l de poudre de magnétite, montrent une bonne répétabilité des mesures (fig. 2). Ils mettent en évidence que la réponse du bidon reste identique, que ce soit dans le milieu le moins conducteur (haut de plage, en bleu) ou dans le milieu le plus conducteur (bas de plage, en rouge). Les mesures effectuées en milieu de plage (en jaune) semblent plus bruitées, probablement en raison des conditions environnementales lors de l'expérimentation.

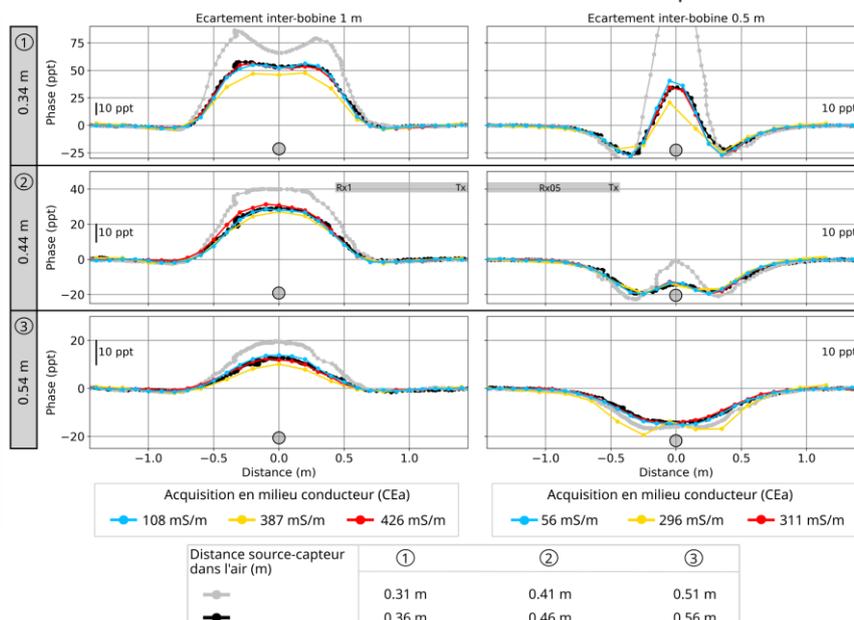


Fig. 2 – Réponse du paramètre en phase de l'EM38-MK2 pour un bidon de 1 l de poudre de magnétite en fonction de la conductivité du milieu. Trois distances source-capteur (0,34 m, 0,44 m et 0,54 m) dans un milieu de conductivité croissante (en bleu, jaune, rouge respectivement haut, milieu et bas de plage), sont mises en regard d'une acquisition réalisée dans l'air. Sur la plage, l'EM38-MK2 est à 0,29 m du sol.

Dans l'air, l'acquisition est effectuée à des distances croissantes, espacées de 0,05 m. Seules les deux courbes acquises dans l'air aux distances avoisinantes sont représentées en gris (la plus basse) et en noir (la plus haute). Le bidon est symbolisé par un cercle gris à 0 m de distance, tandis que l'EM38-MK2 est représenté par un rectangle gris indiquant les positions des bobines : Rx1 (réceptrice 1 m), Rx05 (réceptrice 0,5 m) et Tx (émettrice).

Dans l'ensemble, en tenant compte des marges d'erreur, les courbes se superposent indépendamment de la valeur de la conductivité électrique apparente du milieu et coïncident à la courbe dans l'air à la distance équivalente la plus proche : pour 0,34 m, 0,44 m et 0,54 m de distance entre la source et l'instrument, cela correspond à une distance dans l'air respectivement de 0,36 m, 0,46 m et de 0,56 m. Au regard du protocole de mise en place du bidon, les 0,02 m d'écart ne nous apparaissent pas significatifs. Ces résultats indiquent que, lorsque la conductivité électrique du milieu est inférieure à 450 mS/m, les mesures au-dessus d'un objet magnétique enfoui proche de la surface ne sont pas affectées. La réponse du paramètre en quadrature, non présentée, ne présente pas de signaux significatifs.

Réponse de la plaque d'aluminium sur la conductivité électrique apparente

L'aluminium en plaque constitue un blindage contre les ondes électromagnétiques. Cet effet se traduit par un signal mesuré complexe, rendant son exploitation difficile. Les courants de Foucault induits dans la plaque par le champ magnétique primaire génèrent un champ magnétique secondaire, opposé au champ d'induction. Ce phénomène est la source d'un signal en phase malgré sa faible susceptibilité magnétique.

Focalisons-nous sur la conductivité électrique apparente de la plaque. Cette dernière a été spécifiquement choisie pour sa conductivité élevée (fig. 3).

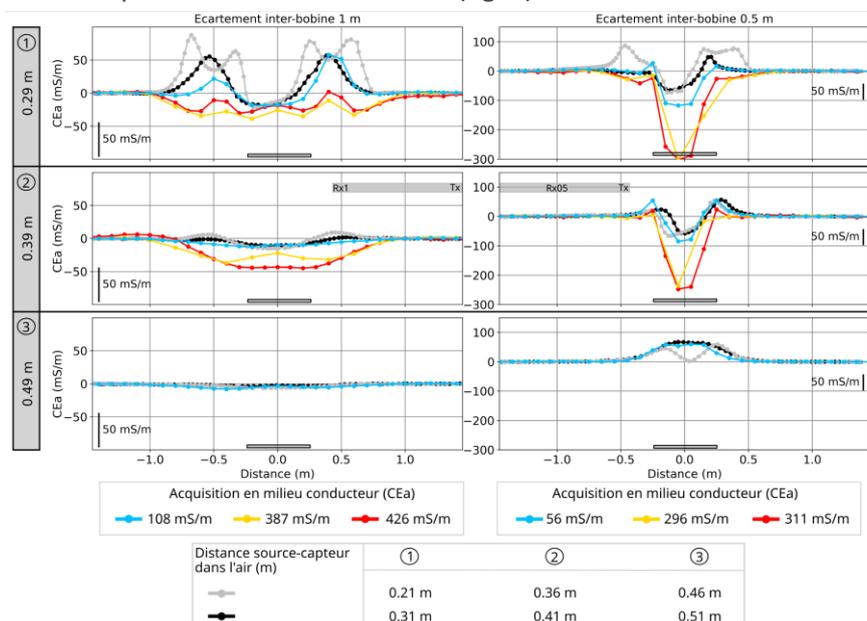


Fig. 3 – Réponse du paramètre en quadrature, exprimé en conductivité électrique apparente (CEa), de l'EM38-MK2 pour une plaque en aluminium en fonction de la conductivité du milieu. Trois distances source-captteur (0,29 m, 0,39 m et 0,49 m) dans un milieu de conductivité croissante (en bleu, jaune, rouge respectivement haut, milieu et bas de plage), sont mises en regard d'une acquisition réalisées dans l'air. Sur la plage, l'EM38-MK2 est à 0,29 m du sol. Dans l'air, l'acquisition est effectuée à des distances croissantes, espacées de 0,05 m. Seules les deux courbes acquises dans l'air aux distances avoisinantes sont représentées en gris (la plus basse) et en noir (la plus haute). La plaque en aluminium est symbolisée par un rectangle gris à 0 m de distance, tandis que l'EM38-MK2 est représenté par un rectangle gris indiquant les positions des bobines : Rx1 (réceptrice 1 m), Rx05 (réceptrice 0,5 m) et Tx (émettrice).

La courbe du milieu le moins conducteur, en bleu, est peu différente de la courbe dans l'air à la distance équivalente la plus proche : pour une distance source-instrument de 0,29 m, 0,39 m et 0,49 m, cela correspond à une distance dans l'air respectivement de 0,31 m, 0,41 m et de 0,51 m. Comme explicité précédemment, les 0,02 m d'écart ne nous apparaissent pas significatif. En revanche, les signaux mesurés dans les deux milieux les plus conducteurs sont presque similaires et montrent une augmentation de l'intensité de la réponse, qui se traduit par un signal négatif marqué, par rapport aux mesures effectuées en milieu plus résistant ou dans l'air. Ces résultats indiquent donc que l'augmentation de la conductivité du milieu amplifie la réponse des objets conducteurs par rapport à celle qu'ils auraient dans un milieu plus résistant.

CONCLUSION

Ces expériences avaient pour objectif d'évaluer l'impact d'un milieu salé sur les capacités de mesure en proche surface de l'EM38-MK2. Les résultats obtenus montrent que, pour le bidon de poudre de magnétite, la réponse en phase reste stable quel que soit le niveau de conductivité du sol. Les courbes obtenues en milieu conducteur se superposent à celles acquises en milieu résistant, suggérant que le signal du bidon de poudre de magnétite n'est pas suffisamment atténué pour que cet effet soit détectable, même en environnement salin. En revanche, pour la plaque en aluminium, la réponse en quadrature (CEa) varie en fonction de la conductivité du milieu. Dans le milieu le moins conducteur, les courbes coïncident avec celles acquises dans l'air, mais une augmentation de l'intensité du signal est observée à mesure que la conductivité augmente. Ce phénomène suggère qu'un objet hautement conducteur pourrait être plus facilement détecté en milieu salin.

Des tests similaires ont également été effectués avec un GEM-2 (Geophex), un instrument multifréquence présentant un écartement inter-bobines de 1,66 m. Cinq fréquences ont été utilisées simultanément. Les résultats obtenus conduisent aux mêmes conclusions que celles établies avec l'EM38-MK2. Il est donc possible de généraliser ces résultats à d'autres conductivimètres utilisant une configuration de bobines en dipôle vertical et caractérisés par un faible écartement inter-bobines.

Ces résultats confirment que les méthodes électromagnétiques sont exploitables pour la prospection archéologique sur estran. Toutefois, les objets expérimentaux présentés ici ont des propriétés physiques très particulières ; il serait donc intéressant d'effectuer les mêmes tests avec de vrais analogues archéologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CALLEGARY, J.B., FERRE, T.P.A., GROOM, R.W., 2007 – Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments. *Vadose Zone Journal*, 6(1), 158-167.

DEIDDA, G.P., DIAZ DE ALBA, P., PES, F., RODRIGUEZ, G., 2023 – Forward Electromagnetic Induction Modelling in a Multilayered Half-Space : An Open-Source Software Tool. *Remote sensing*, 15(7), 1772.

DELEFORTRIE, S., SAEY, T., VAN DE VIJVER, E., DE SMEDT, P., MISSIAEN, T., DEMERRE, I., VAN MEIRVENNE, M., 2014 – Frequency domain electromagnetic induction survey in the intertidal zone : Limitations of low-induction-number and depth of exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 100, 14-22.

MOFFAT, I., RAUPP, J., 2008 – A new approach to investigating shipwreck sites in littoral environments : Multi-technique geophysical investigations of Port Elliot, South Australia. *Technical Briefs in Historical Archaeology*, 1-7.

WEISS, E., GINSBURG, B., COHEN, T., ZAFRIR, H., ALIM, R., SALOMONSKI, N., SHARVIT, J., 2007 – High Resolution Marine Magnetic Survey of Shallow Water Littoral Area. *Sensors*, 7(9), 1697-1712.

WILKEN, D., ZWICK, D., MAJCHCZACK, B.S., BLANKENFELDT, R., ERKUL, E., FISHER, S., BIENEN-SHOLT, D., 2007 – Multi-Coil FD-EMI in Tidal Flat Areas: Prospection and Ground Truthing at a 17th Century Wooden Ship Wreckage. *Remote sensing*, 14, 489.

IMAGERIE RADAR POUR LA CARACTERISATION DE VESTIGES ARCHEOLOGIQUES EN MILIEU URBAIN A CASCO ANTIGUO, PANAMA

THUILLIER S.¹, REJIBA F.¹, FINCO C.², MOJICA A.³, MENDIZABAL T.⁴

¹ UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris, France

² Cerema, ENDSUM, Le Grand-Quevilly, France

³ Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama City, Panama

⁴ Centro de Investigaciones Históricas, Antropológicas y Culturales AIP (CIHAC), Panama City, Panama

RESUME

Les prospections géoradar permettent un compromis idéal en milieu urbain entre profondeur d'investigation, résolution de l'image et praticité. L'objectif était de déployer l'équipement à différentes localisations susceptibles de révéler la présence d'anciens aménagements hydrauliques (puits, citernes) d'époque coloniale au cœur du quartier historique de Panama. Les résultats ont permis de documenter davantage le contexte archéologique de la zone malgré des perturbations du signal liées aux aménagements urbains.

Mots clés : géoradar, milieu urbain, archéologie, système hydraulique

ABSTRACT

In an urban environment, georadar surveys offer an ideal compromise between depth of investigation, image resolution and practicality. The aim was to deploy the equipment in various locations likely to reveal the presence of former hydraulic structures (wells, cisterns) from the colonial era in the heart of Casco Antiguo, Panama's historic district. The results allowed to further document the archaeological context of the area, despite disturbances to the signal due to surrounding urban facilities.

Key words: ground penetrating radar, urban area, archaeology, water supply

INTRODUCTION

En 1673, à la suite d'importants dégâts causés par des pirates, la ville historique de Panama est déplacée à une dizaine de kilomètres au sud. Le nouveau site est choisi pour sa position stratégique à proximité de l'océan et pour son accès privilégié à l'eau douce de la rivière. À l'époque coloniale, l'approvisionnement en eau est un véritable défi en l'absence de service public dédié. Chaque habitant doit creuser son propre puits ou s'appuyer sur les infrastructures des institutions religieuses. L'eau est alors collectée de manière dispersée, à partir des eaux de surface et des sources souterraines issues des ruisseaux (Castillero 2014). Au cours des siècles, de nombreux incendies ont lieu, les bâtiments sont reconvertis pour d'autres usages et leur architecture en est modifiée. Les anciens systèmes d'approvisionnement en eau sont donc oubliés de la mémoire collective, mais il est fort probable qu'ils subsistent encore en sous-sol, dissimulés sous les multiples remodelages architecturaux.

Dans ce cadre, l'objectif de cette étude est donc de prospecter dans les lieux mentionnés dans les archives comme disposants de puits ou de citernes, pour détecter les caractéristiques précises de ces dispositifs et documenter le patrimoine archéologique du secteur.

Le géoradar semble être l'une des méthodes les plus adaptées pour répondre à cette problématique. Cette méthode est largement adoptée par les archéologues pour son efficacité depuis les années 2000, notamment en milieu urbain où la préservation du patrimoine est primordiale (Thiesson et al. 2024). Elle présente l'avantage d'être relativement peu sensible aux perturbations liées aux éléments métalliques proches, en particulier comparée à l'imagerie électromagnétique d'induction (EMI). Sa compacité et portabilité le rendent adapté à des espaces confinés, tandis que sa résolution précise permet

de localiser des vestiges à différentes profondeurs. Toutefois, au Panama, le géoradar a été peu utilisé dans les sites urbains. Des résultats concluants ont cependant été obtenus dans d'autres zones historiques moins contraintes par des facteurs urbains (Mojica et al. 2023), ce qui souligne son potentiel pour l'étude du sous-sol de la ville historique.

METHODE

Pour chaque site étudié, une prospection a été réalisée en janvier 2025 avec un radar bistatique MALÅ Easy Locator dont les antennes sont centrées autour de 450 MHz. Le positionnement a été réalisé uniquement à l'aide de décimètres. La distance entre chaque profil était de 25 cm et l'intervalle entre chaque trace le long du profil était de 2,5 cm. Les deux sites présentés ici ont fait l'objet d'une prospection 3D avec des profils espacés de 25 cm en X et en Y. L'ensemble des traitements ont été réalisés avec le logiciel *Geolix* : correction du temps zéro, filtrages, gain, migration, transformée de Hilbert, tranches temporelles. Le background removal en particulier, permet de différencier les interfaces des anomalies plus localisées. Les profondeurs indiquées restent approximatives car elles dépendent de l'estimation de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques à la surface du sol lors de chaque prospection. Les vitesses estimées par l'analyse des hyperboles de diffraction varient entre 7 et 10 cm/ns selon les sites étudiés. De plus, les zones prospectées ont pu être photographiées au sol pour réaliser un modèle photogrammétrique 3D à l'aide du logiciel *Agisoft Metashape*.



Fig. 1 – Géoradar MALÅ dans le palais du gouvernement.

RESULTATS

SITE 1 : Palais du gouvernement

Le Palais du Gouvernement National occupe l'emplacement de l'ancien monastère du couvent de la Conception, appartenant aux religieuses cloîtrées de l'Incarnation, qui fût construit en 1673 lors du transfert de la ville. En 1862, il est reconverti en caserne militaire puis sera abandonné au début du XX^{ème} siècle. La construction du Palais commence en 1906 pour une inauguration deux ans plus tard (Cubero et al. 2020). Des travaux de restauration sont réalisés en 2000 lors desquels un dôme en plastique est ajouté au-dessus de la cour centrale, le lieu de la prospection (Fig. 1).

Sur la zone cartographiée (Fig. 2), en très proche surface (slice 1) sont visibles les joints de carrelage ainsi qu'une anomalie au centre de la pièce. Celle-ci pourrait résulter d'un ancien système d'adduction d'eau. À 22 cm de profondeur (slice 2), on retrouve des anomalies linéaires provenant du centre de la pièce, en forme d'étoile, alimentant notre hypothèse d'un ancien réseau de drains non métalliques. Un demi-arc de cercle se distingue également à l'ouest marquant probablement l'emplacement d'une ancienne porte. Pour les profondeurs suivantes, des canalisations restent visibles mais certaines anomalies apparaissent également plus rectangulaires, et pourraient être liées à un remblai différent ou à d'autres vestiges comme des citernes.

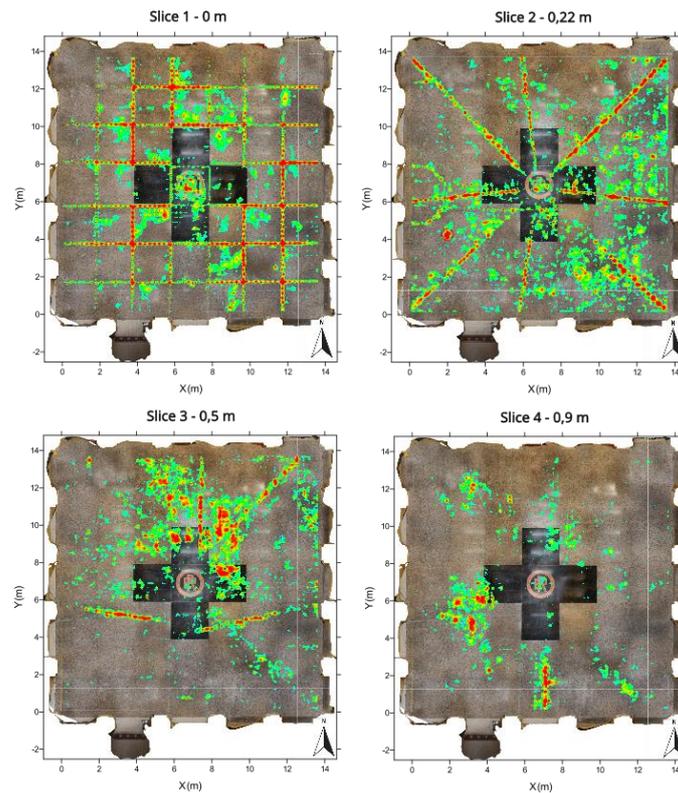


Fig. 2 – Palais du gouvernement : coupes temporelles de 12 cm d'épaisseur (échelle d'amplitude du bleu (ou transparent pour lisibilité) au rouge (maximum)).

SITE 2 : Palais des Hérons (Présidence)

Le Palais des Hérons, ou *Palacio de Las Garzas*, est le siège actuel de la présidence de la République de Panama. Le bâtiment originel, édifié en 1673, servait d'atelier collectif avant d'accueillir les douanes et des bureaux commerciaux. Après les incendies dévastateurs de 1737 et 1756, il tombe en ruine. Sa reconstruction débute en 1764 sous la direction de Manuel Hernandez, avec l'ajout notable d'une citerne et d'un puits. Le site devient ensuite une école entre 1872 et 1875, avant d'être affecté aux fonctions gouvernementales. D'importants travaux de rénovation en 1922 lui donnent son apparence actuelle (Castillero 2014). Les investigations géophysiques se concentrent sur le patio à l'entrée du bâtiment, où se serait trouvée la citerne, ainsi que dans un salon qui pourrait avoir disposé d'un puits (Fig. 3).

Dans la première zone d'étude, des systèmes de canalisations métalliques récents sont visibles en proche surface. À 50 cm de profondeur, on peut distinguer d'anciens murs ainsi qu'une anomalie circulaire qui suggère la présence d'un puits. Dans la deuxième zone, un réseau de canalisations alimentant la fontaine centrale est clairement visible en proche surface. Un peu plus en profondeur, des anomalies de très forte amplitude se dessinent aux quatre coins de la fontaine, à l'emplacement d'actuels regards en surface.

CONCLUSIONS

Pour localiser les anomalies liées aux anciens vestiges et formuler des hypothèses sur leur origine, les informations provenant des archives jouent un rôle crucial. À Panama, bien que les plans d'architecte soient rares, celui du Palais des Hérons en est un exemple précieux. Il a permis d'identifier une citerne et un puits, bien que ce dernier ne se trouve pas exactement à l'endroit indiqué sur le plan – il est fort probable qu'il ait été creusé ailleurs pour des raisons pratiques.

L'utilisation du géoradar en intérieur peut avoir ses limites lors du traitement. Dès lors que la profondeur dépasse le mètre, la majorité des ondes visibles sont celles aériennes qui se réfléchissent sur les

murs. Au vu de tous les travaux qui ont pu avoir lieu dans ces bâtiments, de nombreux réseaux de canalisations sont également visibles et il devient compliqué de les différencier en fonction de leur âge. Néanmoins, les résultats permettent d'identifier sur ces deux sites d'études les structures recherchées et la méthode semble prometteuse pour les autres bâtiments investigués au sein de Casco Antiguo.

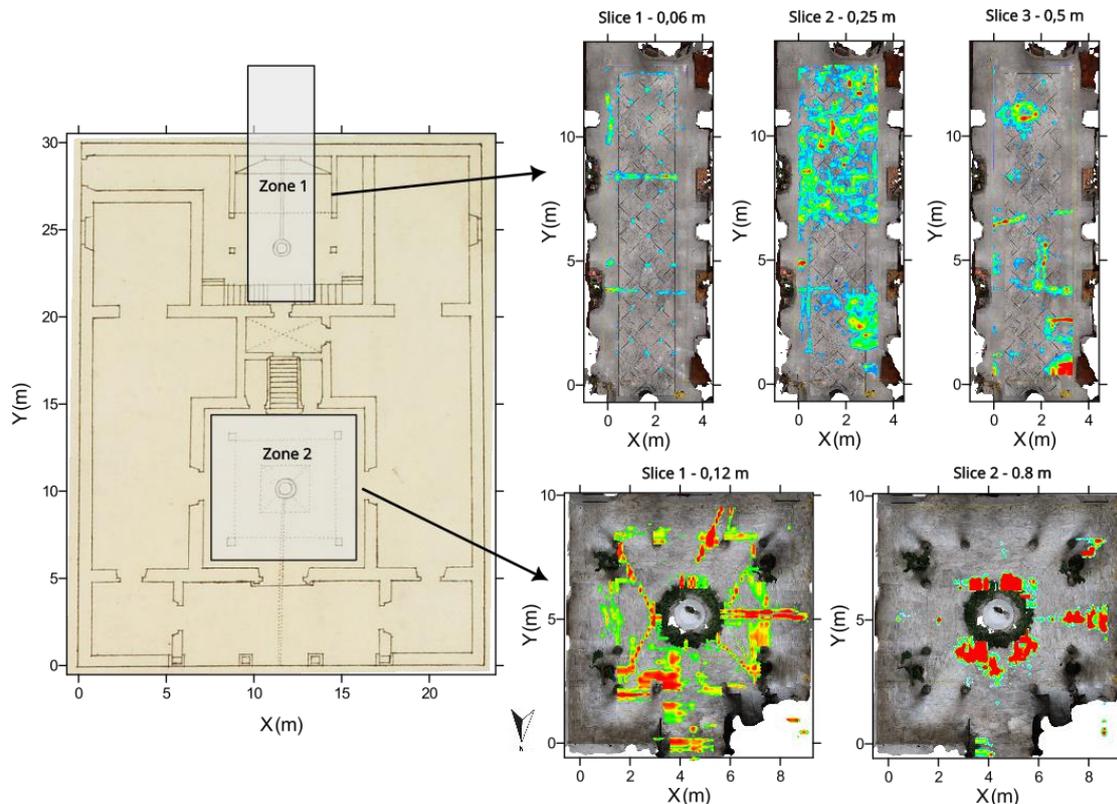


Fig. 3 – Palais des hérons : plan de Manuel Hernandez datant de 1766 et coupes temporelles de 12 cm d'épaisseur (échelle d'amplitude du bleu (ou transparent pour lisibilité) au rouge (maximum), Zone 1 = salon, Zone 2 = patio).

REMERCIEMENTS

Ces travaux font partie du projet intitulé "El regreso del aljibe urbano: pasado y futuro de las fuentes de agua de la ciudad de Panamá" (#IDDS22-01) financé par la SENACYT ("Secretaria nacional de ciencias tecnología e innovación").

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CASTILLERO CALVO A., 2014 – La Ciudad Imaginada. Historia social y urbana del Casco Viejo de Panamá. *Editora Novo Art S.A.*, 250 p.

CUBERO HERNANDEZ A., ARROYO DUARTE S., 2020 – Colonial Architecture in Panama City. Analysis of the Heritage Value of Its Monastic Buildings. *Designs*, 4(4), 57

MOJICA A., REJIBA F., WANG A., FINCO C., HOVHANNISSIAN G., MENDIZABAL T., POURCELOT J., MARTIN-RINCON J., HO C., 2023 – Understanding the origins of the Colonial Fort of San Lorenzo, Panama through geophysical surveys. *NSG2023 29th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Edinburgh (Scotland)*

THIESSON J., BENECH C., CAMERLYNCK C., DABAS M., HULIN G., MATHÉ V., PETIT C., SIMON F.-X., VITALE Q., 2024 – Variety in Archaeo-Geophysics: The French Example. *World Archaeo-Geophysics, Springer*, pp. 245-279

ESTIMATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES D'UN BASSIN VERSANT PAR SUIVI GPR D'UNE INFILTRATION D'EAU

BELLOEIL Camille¹, CHAMPOLLION Cédric², GIRARD Jean-François¹, LESPARRE Nolwenn¹

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

²Géosciences Montpellier, UMR5243, CNRS, Université Montpellier, Montpellier, France., cedric.champollion@umontpellier.fr

RESUME

L'estimation des paramètres hydrodynamiques d'un bassin versant est essentielle pour modéliser fidèlement les processus hydrogéologiques. Le suivi à l'aide radar de sol ou GPR (Ground Penetrating Radar) d'une infiltration d'eau dans le sol est une méthode géophysique d'estimation de ces paramètres via la mesure du temps de trajet d'une onde radar. Pour cela, une inversion stochastique MCMC (Markov Chain Monte Carlo) des données GPR est réalisée, tout d'abord avec des données synthétiques, puis avec des données acquises au SCERES, un site expérimental contrôlé. Enfin, une autre sera réalisée avec des données obtenues au bassin versant du Strengbach.

Mots clés : infiltration, GPR, bassin versant, paramètres hydrodynamiques

ESTIMATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF A CATCHMENT BY GPR MONITORING OF WATER INFILTRATION

ABSTRACT

Estimating of the hydrodynamic parameters of a catchment area is crucial for modeling faithfully hydrogeological processes. Water infiltration monitored by GPR (Ground Penetrating Radar) is a geophysical method used to estimate these parameters by measuring the two-way travel time of a radar wave. For this matter, an MCMC inversion (Markov Chain Monte Carlo) of GPR data is carried out, first with synthetic data, then with data acquired at SCERES, a controlled experimental site. Finally, another will be performed with data from the Strengbach catchment.

Key words: infiltration, GPR, catchment, hydrodynamics parameters

INTRODUCTION

Le bassin versant du Strengbach est un petit bassin de 0.8 km² situé dans les Vosges, entre 880 et 1150 m d'altitude. Il est le site d'étude de l'OHGE (Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement) depuis 1986. Il repose sur un socle granitique hercynien, avec des inclusions de micro-granite et de gneiss sur les crêtes (Lesparre et al., 2024). D'après de nombreuses études dont Pierret et al. (2018) la zone critique de ce site est composée localement d'un sol d'environ un mètre, puis d'une couche de granite altéré, appelée sapolite, dont l'épaisseur et les propriétés hydrodynamiques sont très variables au sein du bassin. Cette variabilité s'explique entre autres par des pentes différentes, allant jusqu'à 30°, et une histoire géologique différente.

L'estimation des paramètres hydrodynamiques est donc un enjeu important pour mieux comprendre les dynamiques du bassin versant. La géophysique se révèle être un atout précieux, proposant plusieurs méthodes non invasives du milieu, et simple à mettre en place sur le terrain, en comparaison avec des fosses ou des forages. Cette étude se concentre sur la méthode d'infiltration d'eau dans le sol, avec un suivi par GPR. Le GPR est particulièrement adapté par sa sensibilité au contenu en eau. Ce protocole a été mis en place par Moua et al. (2023) et testé sur des données synthétiques.

METHODE GPR DE SUIVI DE L'INFILTRATION

L'expérience d'infiltration utilise un infiltromètre, rempli d'une hauteur d'eau constante prédéfinie, qui reste inchangée pendant toute la durée de l'expérience. De plus, des réflecteurs, naturels ou artificiels, peuvent être présents dans le sol. Le suivi de l'expérience est assuré par GPR. Le radar, de fréquence 800MHz, est composé d'un transmetteur et d'un récepteur et est considéré à offset nul. Puis, les suivis GPR sont analysés pour estimer les temps aller-retour de trajet (TWT : Two Way Travel Time) du front d'infiltration et des réflecteurs existants.

L'infiltration est ensuite modélisée à l'aide d'un modèle unidimensionnel, basé sur l'équation de Richards 1D et sur le modèle de Mualem - Van Genuchten (Moua et al., 2023). Les paramètres hydrodynamiques étudiés comprennent la conductivité hydraulique (K_s), la teneur en eau saturée (θ_s), la teneur en eau résiduelle (θ_r), ainsi que les paramètres de Van Genuchten, c'est-à-dire α et n .

Pour l'inversion des données, à savoir les temps de trajet des ondes électromagnétiques, la méthode bayésienne MCMC est utilisée (voir Moua et al., 2023). Cette inversion présente l'avantage d'estimer les incertitudes des paramètres et leur corrélation.

EXPERIENCES

Modèle synthétique de suivi GPR d'infiltration

Les premières infiltrations ont été réalisées de manière synthétique pour calibrer le modèle. L'expérience consiste en une infiltration 1D d'eau dans un milieu homogène non saturé, avec une nappe d'eau présente à 100 cm de profondeur. Deux réflecteurs ont été insérés à 50 cm et 120 cm de profondeur. Les valeurs des paramètres choisis sont proches de ceux trouvés au SCERES, c'est-à-dire $K_s=0,08$ cm/s, $\theta_s=0,4$, $\theta_r=0,07$, $\alpha=0,145$ et $n=2,68$. Le modèle prend comme entrée ces paramètres hydrodynamiques, ainsi que les conditions aux limites et les paramètres de maillage.

L'expérience est initialement à l'équilibre hydrostatique, avec une hauteur d'eau constante de 10 cm. La discrétisation se fait en cellules de 1 cm. En sortie, on obtient les temps de trajet TWT du front d'infiltration et des réflecteurs représentés Fig.1.

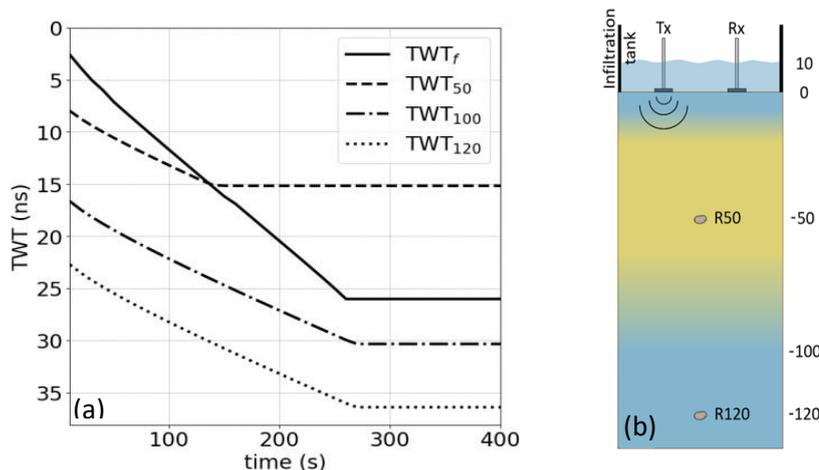


Fig. 1 – a) Temps TWT modélisés, TWT_f est le temps de trajet pour le front d'infiltration, TWT_{50} et TWT_{120} sont ceux des réflecteurs situés à 50 et 120 cm de profondeur respectivement et TWT_{100} représente la nappe d'eau. **b)** Illustration de l'expérience (Moua et al., 2023) : Tx et Rx sont les antennes émettrice et réceptrice du GPR, les zones bleues représentent les zones saturées (par la propagation du front d'infiltration ou la nappe) et R50 et R120 sont les réflecteurs.

Puis, une inversion de type MCMC de ces temps de trajet est réalisée à l'aide de la suite de fonction Matlab DREAM (Vrugt et al., 2016). Les distributions des solutions sont représentées Fig.2.

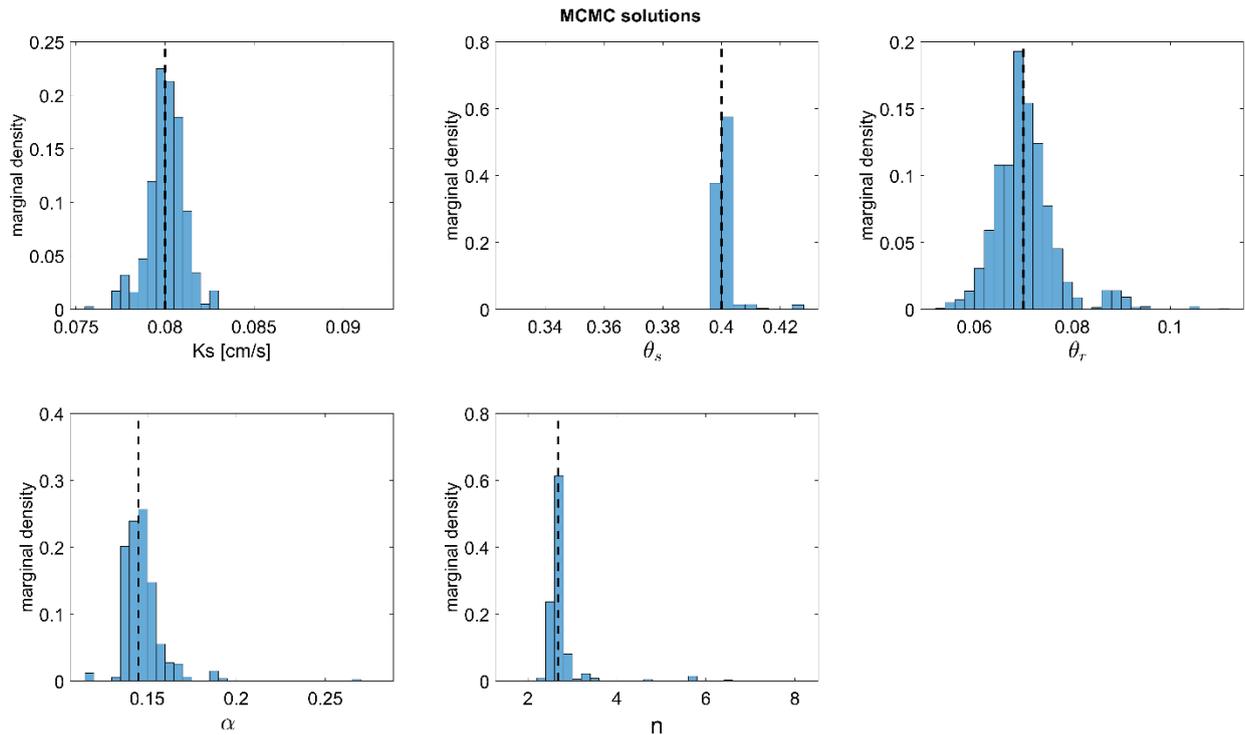


Fig. 2—Résultats d’inversion MCMC de données synthétiques. Les traits noirs en pointillé représentent la valeur de référence

En milieu contrôlé : SCERES

Avant de réaliser l’expérience en milieu naturel, la méthode est testée en milieu contrôlé, au site expérimental du SCERES (Site Contrôle Expérimental pour la Réhabilitation des Eaux et des Sols), situé au campus CNRS de Strasbourg-Cronenbourg. Le site se compose d’un bassin de 25 m de long, de 12 m de large et 3 m de profondeur, et a pour but de recréer un aquifère alluvial (Jellali et al., 2003). Le sol de l’expérience d’infiltration est un sable de grain moyen, de type H2F. Les données ont été acquises durant l’été 2021. Le GPR était placé au centre d’un infiltromètre, rempli d’eau. Les réflecteurs utilisés étaient des grilles enterrées à différentes profondeurs. Les données acquises sont représentées Fig. 3.

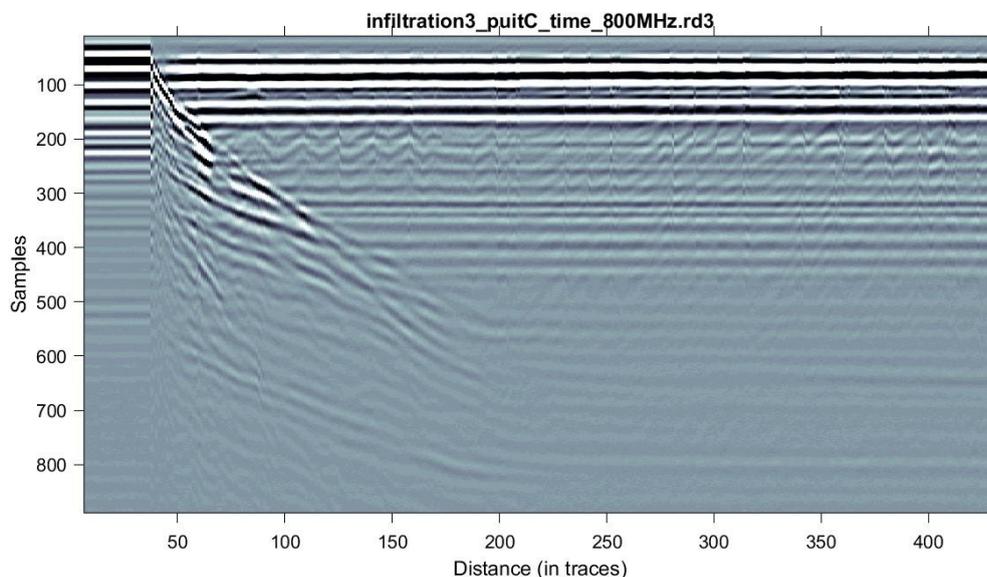


Fig. 3—Suivi GPR d’une infiltration au SCERES durant l’été 2021

En milieu naturel

Les données ont été acquises durant l'été 2021, dans le bassin versant du Strengbach, à différents emplacements. Le même dispositif d'expérience que celui du SCERES est utilisé, et est représenté Fig.4. Les données GPR seront inversées en suivant la méthodologie développée à partir des expériences synthétiques et validées au SCERES sur des expériences en milieu contrôlé.



Fig. 4–Photo prise lors de l'acquisition des mesures au Strengbach

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les expériences synthétiques et en milieu contrôlé serviront à calibrer et à valider la méthode d'estimation de paramètres du sol. Elle pourra ensuite être appliquée aux expériences en milieu naturel. Les éventuelles difficultés du milieu naturel se trouvent dans la vérification des hypothèses, par exemple l'équilibre hydrostatique, et également dans le pointé des temps de trajet, où la nature plus hétérogène du sol, comparée au milieu contrôlé, peut amener à des réflexions parasites.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- JELLALI, S., BENREMITA, H., MUNTZER, P., RAZAKARISOA, O., SHÄFER, G., 2003 – A large-scale experiment on mass transfer of trichloroethylene from the unsaturated zone of a sand aquifer to its interfaces. *J. Contam. Hydrol*, 60, 31-53.
- LESPARRE, N., PASQUET, S., and ACKERER, P., 2024 – Impacts of hydrofacies geometry designed from seismic refraction tomography on estimated hydrogeophysical variables. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 28(4), 873–897.
- MOUA, R., LESPARRE, N., GIRARD, J.-F., BELFORT, B., LEHMANN, F., YOUNES, A., 2023 – Coupled hydrogeophysical inversion of an artificial infiltration experiment monitored with ground-penetrating radar: synthetic demonstration. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 27(23), 4317–4334.
- PIERRET, M.-C., COTEL, S., ACKERER, P., et al., 2018 – The Strengbach Catchment: A Multidisciplinary Environmental Sentry for 30 Years. *Vadose Zone J.*, 17 (1), 180090.
- VRUGT, J. A., 2016 – Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation, *Environ. Model. Softw.*, 75, 273–316.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Rohianuu Moua, Florian Zapata, Sylvain Faller, Margaux Goupil et Chloé Cuchet pour l'acquisition des données de suivi d'infiltration. Ce projet est a reçu le soutien financier de l'ANR projet CASH 24 CE56 3383 01. Du temps de calcul a été fourni par le centre de calcul haute performance de l'université de Strasbourg.

CARACTERISATION DES PROPRIETES HYDRAULIQUES DU SOL PAR INVERSION JOINTE ELECTRIQUE-HYDRIQUE

DOUSSAN C.¹, BEUDEZ N.¹, ARDOUIN J.¹, ARHAB S.¹, VALOIS R.¹, BUIS S.¹

¹ UMR 1114 EMMAH, INRAE/AU, Avignon, France. Email : claude.doussan@inrae.fr

RESUME

Les propriétés hydrauliques du sol sont difficiles à estimer, ponctuelles et couteuses en temps. Estimer ces propriétés par inversion est une solution prometteuse et nous avons élaboré un schéma d'inversion conjointe hydro-géophysique. Il utilise un modèle d'hydrologie du sol, la simulation de mesures de tomographie de résistivité électrique et une relation pétrophysique (teneur en eau-résistivité), codés dans la plateforme VSoil. Une étude de sensibilité (Morris) est faite en fonction de la texture du sol. L'inversion, avec l'algorithme SCEUA, montre l'effet du nombre de mesures ERT dans le temps, l'apport de mesures conjointes hydriques et que les paramètres hydrauliques peuvent être estimés par classe de texture.

Mots clés : sol, ERT, inversion, propriétés hydrauliques

ABSTRACT

The hydraulic properties of soil are difficult to estimate, site-specific and time-consuming. Estimating these properties through inversion is a promising solution, and we have developed a joint hydro-geophysical inversion scheme. It uses a soil hydrology model, electrical resistivity tomography measurements simulation, and a petrophysical relationship between water content and resistivity, all coded within the VSoil platform. A sensitivity study (Morris) is conducted based on soil texture. The inversion, using the SCEUA algorithm, shows the effect of the number of ERT measurements over time, the contribution of joint hydric measurements, and that hydraulic parameters can be estimated by soil texture class.

Key words: Soil, ERT, inversion, hydraulic properties

INTRODUCTION

Dans la zone critique, le sol est au cœur de nombreux services écosystémiques dont le fonctionnement est fortement dépendant des stocks d'eau qu'il contient mais aussi des flux d'eau qui le traverse. L'évolution de ces stocks et flux est conditionnée par les propriétés hydrauliques du sol, propriétés fondamentales qui traduisent ses propriétés de rétention de l'eau (courbe de rétention) et de transfert (courbe de conductivité hydraulique). La connaissance de ces propriétés (et de leurs paramètres) permet de modéliser et prédire le comportement hydrologique en fonction des conditions environnementales. Cependant, la détermination de ces propriétés hydraulique est délicate, consommatrice en temps et sujette à erreur suivant l'expérience de l'expérimentateur. Cette estimation des propriétés de rétention et transfert est souvent réalisée en laboratoire, sur des échantillons prélevés non-remanié (e.g. méthode Wind, Wind ; Mohrath et al., 1997), mais destructive et de caractère ponctuel dans l'espace. Ces propriétés peuvent aussi être déterminées au champ, par exemple avec des mesures d'infiltrométrie en surface ou par installation de sondes de teneur en eau le long d'un profil. Dans ce dernier cas, ces données doivent être complétées par d'autres informations pour approcher les paramètres hydrauliques, comme des mesures de potentiel matriciel (Vereecken et al. 2008). Ces méthodes restent ponctuelles, nécessitant de nombreux points de mesure et souvent invasives. A contrario, les méthodes d'exploration géophysique sont des méthodes non-invasives qui permettent de cartographier le milieu et dont la variable mesurée peut être influencée par l'eau, comme pour le radar, la RMP ou encore la tomographie de résistivité électrique (ERT). L'ERT est assez facilement déployable au champ, couvrant des sections intégrant de l'hétérogénéité latérale et permettant un monitoring dans le temps. Comme la résistivité électrique est sensible à la teneur en

eau au premier ordre, le couplage de ces variations de résistivité, au travers d'une relation pétrophysique résistivité -teneur en eau, avec un modèle de transfert hydrique peut permettre en principe par inversion conjointe « électrique-hydrique » d'identifier les paramètres des propriétés hydrauliques du sol. Mboh et al. (2012) , Kuhl et al. (2018) ont montré que cette identification par inversion était faisable. Nous présentons ici un schéma d'inversion conjoint « électrique-hydrique » en analysant la sensibilité aux propriétés des sols (classes de texture, délimitant une variabilité des paramètres hydrauliques) et à l'ajout de données de mesures ponctuelles de teneur en eau. L'inversion est testée sur des données synthétiques et mesures hydriques tirées de mesures au champ.

1/ MISE EN PLACE DE L'INVERSION JOINTE ELECTRIQUE-HYDRIQUE

1.1 Modèle de transfert d'eau dans le sol et paramètres des propriétés hydrauliques à inverser

Les transferts de l'eau dans le sol sont représentés par la loi de Darcy-Richards, qui s'écrit en 1D vertical en formulation en potentiel matriciel :

$$(1) \quad C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - S(h)$$

Où h est le potentiel matriciel (exprimé en charge hydraulique), t le temps, z la profondeur, $K(h)$ la conductivité hydraulique et $S(h)$ un terme de prélèvement racinaire. $C(h) = \frac{d\theta}{dh}$ est la capacité capillaire, liée à la courbe de rétention, et θ la teneur en eau volumique du sol.

La courbe de rétention, $\theta(h)$, traduit la capacité du sol à retenir l'eau en fonction du potentiel matriciel peut être représentée par la formulation empirique de van Genuchten :

$$(2) \quad S_e = (1 + (\alpha \cdot h)^n)^{-m}$$

Où $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$; avec θ_r la teneur en eau résiduelle et θ_s la teneur en eau à saturation. α un facteur de forme lié au point d'entrée d'air. n et m sont liés à la distribution de taille de pores du sol et $m = 1 - \frac{1}{n}$.

La courbe de conductivité hydraulique K peut s'exprimer, suivant le modèle semi-empirique de Mualem – van Genuchten, par :

$$(3) \quad K(S_e) = K_s \sqrt{S_e} \left(1 - [1 - S_e^{1/m}]^m \right)^2$$

Avec K_s la conductivité hydraulique à saturation.

Les propriétés hydrauliques à identifier dans l'inversion sont la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique, c'est à dire les 5 paramètres qui les définissent : θ_r , θ_s , α , n , K_s .

1.2 Tomographie de résistivité électrique, modèle de transfert de courant dans le sol et relation pétrophysique résistivité-teneur en eau

Le processus de mesure de l'ERT consiste en une succession mesures de différence de tension (V) entre 2 électrodes M et N, engendré par une injection de courant (I) entre deux autres électrodes A et B, en faisant varier la longueur des dipôles d'injection et l'arrangement des quadripôles A,B,M,N le long d'un transect on obtient un ensemble de résistivités apparentes $\rho_a = k \frac{V}{I}$, avec k un coefficient géométrique du quadripôle.

Ce processus de mesure ERT est représenté par le modèle direct de transport de courant dans le sol (loi d'Ohm) :

$$(4) \quad \nabla(\sigma \nabla V) = I \cdot \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s)$$

Où σ est la conductivité électrique vraie du sol en (x,y,z) ; I l'intensité du courant injecté à la position (xs,ys, zs) et δ la fonction de Dirac.

La relation pétrophysique entre résistivité et teneur en eau utilisée ici est celle Waxman-Smiths, adaptée à des sols qui contiennent de l'argile et donc une conductivité de surface des solides :

$$(5) \quad \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{S_w^{nw}}{F} (\sigma_w + \frac{\sigma_s}{S_w})$$

$S_w = \theta/\theta_s$ est la saturation, F le facteur de formation et nw un exposant pour la saturation. σ_s la conductivité de surface peut s'exprimer en fonction de la texture du sol, selon Doussan et Ruy (2009) par : $\sigma_s = 0.654 \frac{\%Ag}{(100-\%Ag)} + 0.018$, avec %Ag le pourcentage d'argile du sol. La résistivité est corrigée de la variation de température T en la ramenant à une température de référence de 25°C avec un coefficient de variation de 1.8%.

1.3 Schéma d'inversion électrique-hydrrique et tests

L'inversion et les modèles directs de transfert de courant et d'eau dans le sol ont été implémenté sur la plateforme VSoil de simulation couplée des processus physiques, chimiques et biologiques du sol

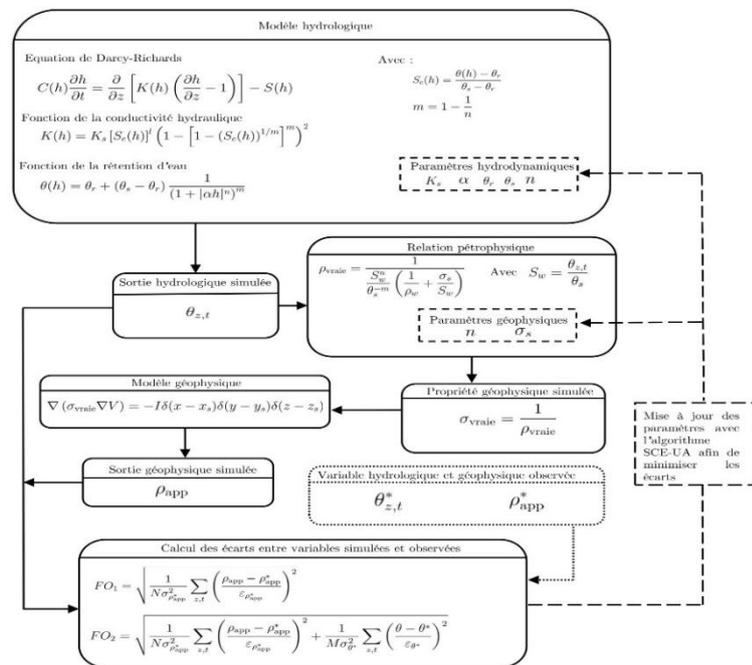


Fig. 1 – Schéma d'inversion hydro-électrique de propriétés hydrauliques du sol. Deux fonctions objectifs sont définies: une n'utilisant que des mesures ERT, l'autre mélangeant des mesures ERT et de teneur en eau.

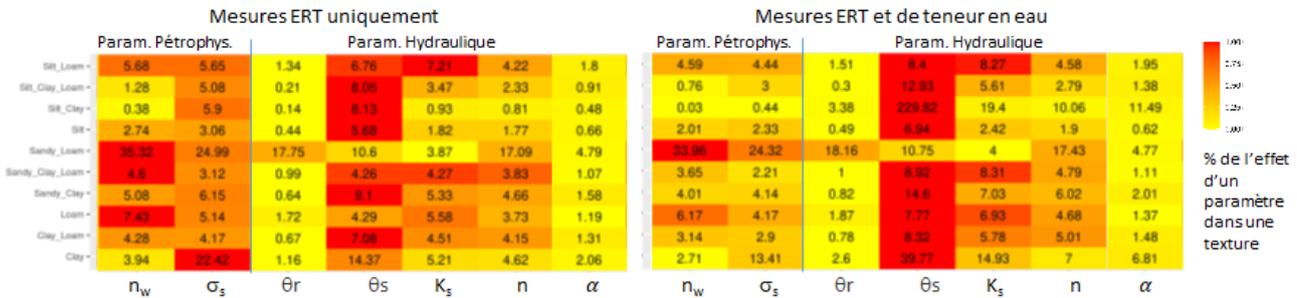
développée à EMMAH (<https://vsoil.hub.inrae.fr/>) dans laquelle a été implémenté le modèle direct de courant de la bibliothèque de pyGIMLi (Rücker et al., 2022). La figure 1 présente le processus d'inversion. Le schéma d'inversion est testé sur une période culturale de maïs, d'un sol de profondeur 2 m. Des mesures ERT sur un transect de 32 électrodes sur 15.5 m, espacées de 0.5m en Wenner-Schlumberger sont simulées. Des tests de sensibilité des paramètres des fonctions hydrauliques et pétrophysiques sont étudiés avec la méthode de Morris pour différentes textures de sol. Des scénarios d'inversions avec plus ou moins de dates de mesure et des fonctions objectif fondées sur l'utilisation de seulement des mesures ERT ou de mesures ERT et de teneur en eau (avec

un bruit sur les mesures) sont également définis. Seul le cas d'une couche homogène sur la profondeur de sol est présenté ici (avec 7 paramètres à inverser).

2/ RESULTATS

Le tableau 1 présente un **résultat d'analyse de sensibilité**, avec la moyenne des effets élémentaires (en valeur absolue, μ^*) de Morris sur des paramètres pétrophysiques et hydrauliques sur l'inversion, soit n'utilisant que des mesures ERT, soit en combinant mesures ERT et teneurs en eau. Il ressort (i) que α et θ_r sont les moins sensibles des paramètres hydrauliques dans l'inversion quelle que soit la texture tandis que n_w et σ_s peuvent avoir une influence similaire à celle des paramètres hydrauliques sur l'inversion, (iii) l'ajout de mesures de teneur en eau rend moins sensible l'inversion aux paramètres pétrophysiques et plus aux paramètres hydrauliques. **Les tests d'inversion**, avec différents scénarios, montrent qu'il est possible d'identifier les paramètres hydrauliques et pétrophysiques avec un nombre

Tableau 1 – Analyse de sensibilité de l’inversion aux paramètres pétrophysiques et hydrauliques, utilisant soit seulement des mesures ERT soit des mesures ERT et de teneur en eau en fonction de différentes textures. L’indice de sensibilité présenté est la valeur absolue moyenne des effets élémentaires (μ^*) de la méthode de Morris. L’autre indice de Morris, la variance des effets élémentaires, suit les mêmes tendances.



« réduit » de mesures : une mesure mensuelle (soit 6 mesures sur la période de croissance du maïs), couvrant des épisodes secs et humides peuvent être suffisants. Par contre, il vaut mieux inverser tous les paramètres à la fois plutôt que de fixer avec incertitude les paramètres les moins sensibles (α , θ_r). L’ajout de données de teneur en eau permet d’améliorer l’inversion, surtout si des données en sec et humides sont présentes (tableau 2).

Tableau 2 – Identification des paramètres pétrophysiques et hydrauliques dans différents scénarios d’inversion. SC1 et SC2: en fixant avec moins ou plus d’erreur α et θ_r . SC3 en inversant tous les paramètres. Les indices r et r,q indiquent une inversion qu’avec l’ERT et ERT+teneur en eau respectivement. $\widehat{SC3}$ signifie que des données de période humide et sèche sont représentées.

Paramètre de référence :	n_{petro}	σ_s	θ_s	$\log(K_s)$	n_{vg}	α	θ_r
	2	0.087	0.46	-6.1586	1.37	1.6	0.034
$SC1_p$	1.94 (-2.8%)	0.083 (-4.3%)	0.458 (-0.48%)	-6.1921 (+0.54%)	1.366 (-0.32%)	2(+0.5 σ)	0.039(+0.5 σ)
$SC1_{p,\theta}$	1.93 (-3.6%)	0.082 (-6%)	0.467 (+1.6%)	-6.054 (-1.7%)	1.36 (-0.7%)	2	0.039
$SC2_p$	1.98 (-1%)	0.088 (+1.2%)	0.457 (-0.68%)	-6.091 (-1%)	1.358 (-0.9%)	2.3(+1.5 σ)	0.044(+1.5 σ)
$SC2_{p,\theta}$	2.02 (+1.2%)	0.088 (+0.89%)	0.462 (+0.47%)	-6.051 (-1.8%)	1.35 (-1.8%)	2.3	0.044
$SC3_p$	1.96 (-2%)	0.099 (+14%)	0.44 (-4%)	-6.153 (-0.09%)	1.359 (-0.83%)	1.62 (+1%)	0.022 (-34%)
$SC3_{p,\theta}$	2.03 (+1.4%)	0.088 (+1.2%)	0.457 (-0.56%)	-6.18 (+0.35%)	1.37 (+0.02%)	1.69 (+5.4%)	0.0317 (-6.9%)
$\widehat{SC3}_p$	2.04 (+1.9%)	0.098 (+13%)	0.445 (-3.3%)	-6.17 (+0.25%)	1.377 (+0.51%)	1.18 (-26%)	0.0367 (+7.8%)
$\widehat{SC3}_{p,\theta}$	1.94 (-3%)	0.084 (-3.7%)	0.46 (+0.1%)	-6.192 (+0.53%)	1.386 (1.1%)	1.59 (-0.37%)	0.0373 (+10%)

3/ CONCLUSIONS

Sur un exemple synthétique, l’analyse de sensibilité montre globalement que les facteurs les plus influents sont, par ordre décroissant : θ_s , σ_s , n_w , K_s et n et qu’il n’existe pas d’effet de linéarité ou d’indépendance des paramètres dans le modèle couplé, ils sont tous en interaction. Un grand nombre de mesures n’est pas essentiel pour une estimation correcte des paramètres hydro-géophysiques, mais il est important de capturer différents niveaux de teneurs en eau du sol et l’inversion s’améliore en prenant en compte des teneurs en eau mesurées. L’inversion d’un milieu bicouche est possible (non montrée) mais la finesse texturale de la couche de surface influe sur la sensibilité des paramètres de la couche profonde.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DOUSSAN, C., RUY, S., 2009 - Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity. *Water Resources Research*, 45 (12), W10408

KUHL, A.S., KENDALL, A.D., VAN DAM, R.L. AND HYNDMAN, D.W., 2018 - Quantifying Soil Water and Root Dynamics Using a Coupled Hydrogeophysical Inversion. *Vadose Zone Journal*, 17: 1-13 170154.

MBOH, C. M., HUISMAN, J. A., VAN GAELLEN, N., RINGS, J., & VERECKEN, H., 2012 - Coupled hydrogeophysical inversion of electrical resistances and inflow measurements for topsoil hydraulic properties under constant head infiltration. *Near Surface Geophysics*, 10, 413–426.

MOHRATH, D., BRUCKLER, L., BERTUZZI, P., GAUDU, J.C. AND BOURLET, M., 1997 - Error Analysis of an Evaporation Method for Determining Hydrodynamic Properties in Unsaturated Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 725-735.

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

VERECKEN H., HUISMAN J. A., BOGENA H., VANDERBORGH T., VRUGT J. A., AND HOPMANS J. W., 2008 - On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water resources research*, 44. W00D06.

ÉTUDE MULTI-METHODES DE LA GÉOMÉTRIE DES ROCHES ALTÉRÉES

DURAND L.¹, CHAMPOLLION C.², AUBINEAU J.³, BALLAS G.⁴, BAYER R.⁵, CAMERLYNCK C.⁶, CAZES G.⁷, LE BER E.⁸, PASQUET S.⁹, VERNANT P.¹⁰, CHARLIER J.B.¹¹

¹ Géoscience Montpellier-BRGM-UMR G-EAU, Montpellier, France, lise.durand@umontpellier.fr

² Géoscience Montpellier, Montpellier, France, cedric.champollion@umontpellier.fr

³ Géoscience Environnement Toulouse, Toulouse, France, jeremie.aubineau@cnrs.fr

⁴ Géoscience Montpellier, Montpellier, France, gregory.ballas@umontpellier.fr

⁵ Géoscience Montpellier, Montpellier, France, roger.bayer@neuf.fr

⁶ UMR 7619 METIS, Paris, France, christian.camerlynck@sorbonne-universite.fr

⁷ Géoscience Montpellier- CENOTE, Montpellier-Nîmes, France, gael.cazes@cenote.fr

⁸ Géoscience Montpellier, Montpellier, France, erwan.le-ber@umontpellier.fr

⁹ UMR 7619 METIS- UAR 3455 OSU ECCE TERRA, Paris, France, sylvain.pasquet@sorbonne-universite.fr

¹⁰ Géoscience Montpellier, Montpellier, France, philippe.vernant@umontpellier.fr

¹¹ BRGM-UMR G-EAU, Montpellier, France, j.charlier@brgm.fr

RESUME

La géométrie des roches altérées est une clé essentielle pour comprendre la formation du karst et son fonctionnement hydrogéologique. Elle est étudiée via une approche multi-méthodes en géophysique en réalisant des inversions contraintes et un modèle synthétique en cohérence avec les observations de terrain. Le signal géophysique de ces roches altérées est interprété grâce à la présence de forages et d'analyses sur roches en pétrophysique et minéralogie.

Mots clés : Karst, multi-méthodes, identification de la géométrie

ABSTRACT

The geometry of weathered rocks plays a crucial role in understanding karst development and its hydrogeological behavior. It is studied using a multi-method geophysical approach through constrained inversions and a synthetic model consistent with field observations. The geophysical signal of these weathered rocks is interpreted using borehole data and analyses of rocks through petrophysical and mineralogical studies.

Key words: karst , multi-method, geometry identification

INTRODUCTION

Les aquifères karstiques permettent d'alimenter 20 à 25% de la population mondiale en eau (Ford et Williams, 2007). Les roches altérées suscitent de plus en plus d'interrogations sur leur rôle dans le fonctionnement hydrogéologique (Dandurand, 2011 ; Baral et al., 2023). Depuis une vingtaine d'années, l'étude des propriétés pétrophysiques ainsi que la géomorphologie de ces roches sont étudiées principalement en milieu calcaire (Dubois et al., 2014 ; Kaufmann et al., 2014 ; Castro et al., 2023).

L'objectif de ce travail est d'élaborer une stratégie permettant de déterminer les géométries des roches altérées ainsi que leur propriétés (pétrophysiques et minéralogiques) dans le cas d'un karst dolomitique (Observatoire du Larzac, Sud de la France).

Ce travail se base sur l'acquisition multi-méthodes de profils géophysiques : géoradar, tomographie de résistivité électrique (ERT), tomographie de sismique réfraction (SRT) et mesures

gravimétriques. Tout d'abord le signal géophysique des roches altérées est étudié sur un profil provenant de chaque méthode. Par la suite la géométrie 2D est analysé via des inversions contraintes ou un modèle synthétique. Ces informations sont utilisées par la suite pour représenter la géométrie en 3D de ces roches altérées en utilisant l'ensemble des profils géophysiques de la zone d'étude (250m x 250m). Ces données sont complétées par des analyses de diffraction et fluorescence à rayon X et microscope optique à balayage sur des échantillons de roches et des observations de terrain.

SITE ET INSTRUMENTATION

Le site d'étude est situé dans le sud de la France, à l'observatoire du Larzac (SNO H+, infrastructures OZCAR et eLTER). Le site est composé de roche bathonienne ruiniforme (164 à 167 Ma). Autour du site d'étude se trouvent des dolines, des cavités et des couloirs vidés (Fig. 1A). Les couloirs vidés (Fig. 1B) sont étroits et de longueur variable, leurs parois ou leur sol présentent des roches altérées (texture similaire à celle d'un sable plus ou moins consolidé). Les profils géophysiques sont acquis sur une zone sans relief particulier au-dessus d'une cavité (-100m ; au-delà de la profondeur d'investigation). Les seules informations sur la présence de roches altérées proviennent du forage B1, qui les recoupe sur les 8 premiers mètres. Le forage B2 recoupe essentiellement de la roche non altérée (Fig. 1C et 1D).

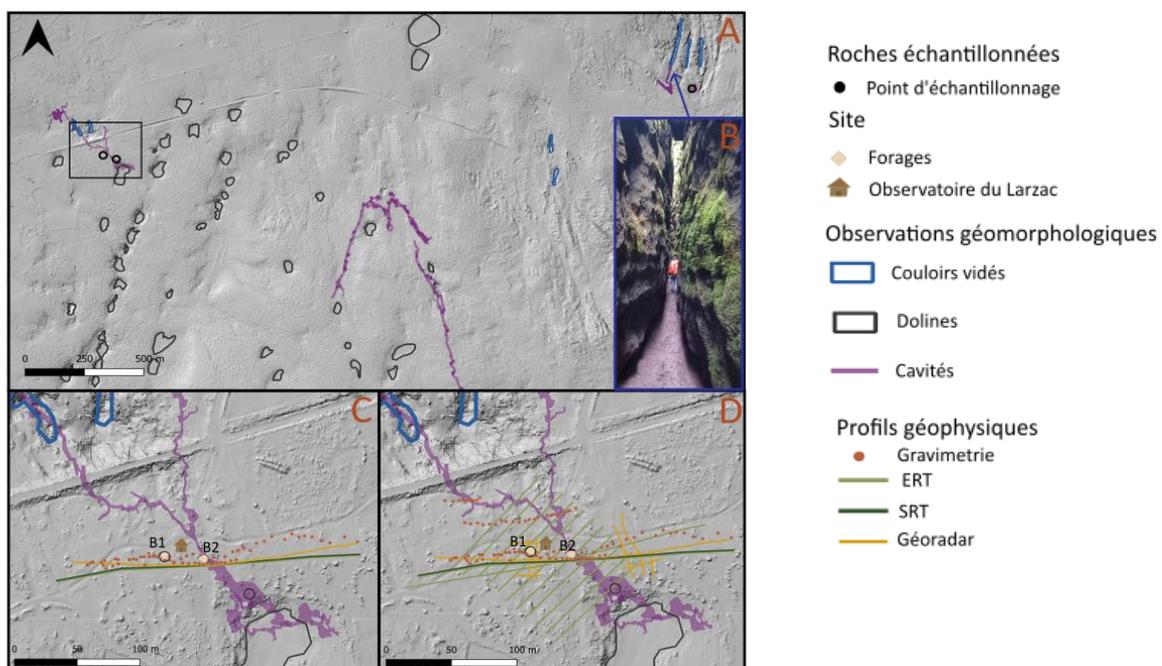


Fig. 1 – Cartes de la zone d'étude et exemples de la géomorphologie du karst dolomitique. (A) Zone d'étude avec les formations karstiques de surface et cavités et les sites d'échantillonnages de roches altérées et saines pour réaliser des mesures en pétrologie et minéralogie, modèle numérique de terrain (MNT) donné Lidar HD 2021 (IGN). (B) Photo d'un couloir vidé. (C) Zoom sur le site de l'observatoire avec les quatre profils étudiés de manière approfondie passant à proximité des forages. (D) Ensembles des profils géophysiques acquis sur la zone d'étude.

SIGNAL GÉOPHYSIQUE ET GÉOMÉTRIE 2D DES ROCHES ALTÉRÉES

Un focus est réalisé sur un profil de chaque méthode passant à proximité des forages B1 et B2 (Fig.1C). Le forage B1 est composé sur les 8 premiers mètres de roches altérées, il est donc possible d'identifier le signal des roches altérées pour chacune des méthodes. Une géométrie simple 2D des roches altérées est testée par la suite en cohérence avec l'ensemble des profils géophysiques.

Au niveau du forage B1, une zone de forte atténuation se distingue pour le signal géoradar (encadré noir, Fig.2A), ainsi qu'une anomalie du signal gravimétrique (Fig.2C), une résistivité faible $\approx 100\text{ohm.m}$ (Fig.2D) et des vitesses lentes $\approx 800\text{m/s}$ (Fig.2E).

Pour l'ensemble des données géoradar, deux autres zones de forte atténuation verticale sont visibles (encadrés noir; Fig.2A). Nous avons vérifié par la suite si ces structures verticales sont pertinente également pour les autres méthodes en travaillant avec la bibliothèque PyGIMLI (Rücker et al., 2017 ; Fig. 2B, C, D et E). Un mesh est construit avec des structures verticales en proche surface ou en profondeur (Fig.2B, structures vertes et jaunes).

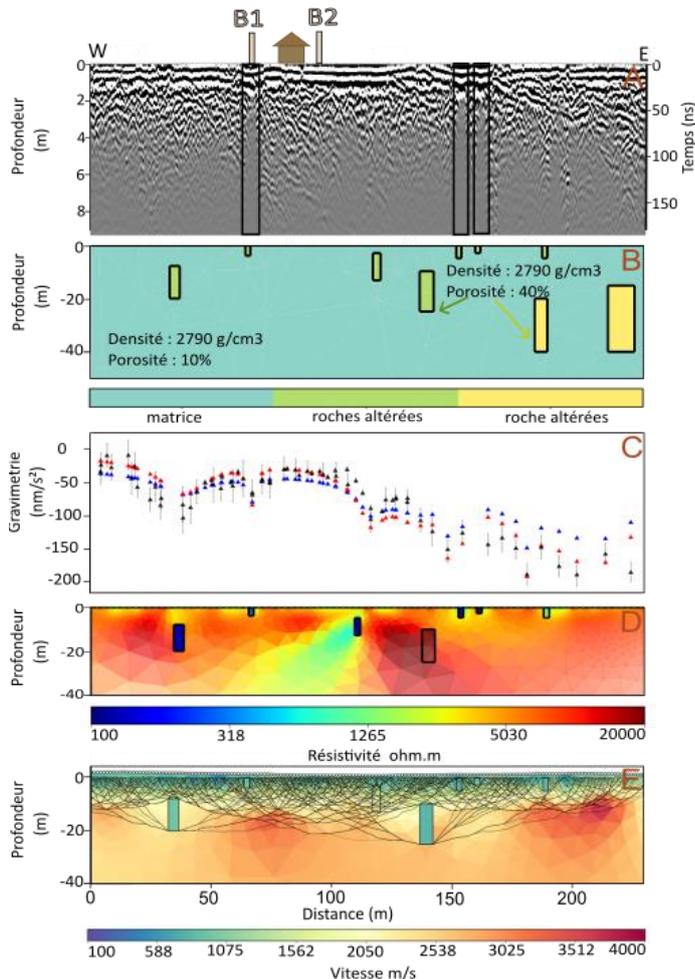


Fig. 2 – Résultats des inversions des données de terrain pour les quatre profils étudié. (A) Données de terrain géoradar, les encadrés noirs sous les trois zones de plus fortes atténuations. (B) Modèle initial utilisé pour réaliser le modèle synthétique, les valeurs de porosité et densité sont acquises sur des échantillons de roches. Le bleu représente la matrice, les roches altérées sont en vert et jaune, les structures vertes sont utilisées pour réaliser le mesh pour les inversions contraintes ERT et SRT, les structures jaunes sont ajoutées pour générer les données synthétiques gravimétriques. (C) Données gravimétrie de terrain en noir, les données synthétiques sont en bleu et rouge. En bleu les milieux sont entièrement saturés en eau et en rouge non saturés. (D) Résultats de l'inversion contrainte des données de terrain ERT. (E) Résultats de l'inversion contrainte des données SRT de terrain.

Dans le cas de la gravimétrie, un modèle synthétique est testé, dont le modèle initial est construit sur la base des données de densité et porosité obtenues sur les échantillons de roches analysées (Fig.2B). Ne connaissant pas la saturation du milieu, deux tests ont été réalisés, en condition de saturation total et sans saturation. Les structures en proche surface permettent de reproduire des anomalies négatives de faibles longueurs d'onde observées au niveau du forage B1. Les plus grandes longueurs d'onde sont expliquées par les structures plus en profondeur. La partie Est est moins bien expliquée par les données synthétiques malgré l'ajout de deux structures supplémentaires par rapport aux autres méthodes (Fig. 2B structures jaunes). Pour les données ERT et SRT, des inversions contraintes des données de terrain sont réalisées (pas de lissage entre les structures et la matrice; Figure 2D et E). Les valeurs dans la majorité des structures sont similaire aux observations réalisées pour forage B1.

Ces structures verticales simples permettent de retrouver des valeurs cohérentes pour l'ensemble des méthodes, ce travail pourrait être approfondi en réalisant une inversion conjointe.

ETUDE DES ROCHES ALTÉRÉES EN 3D

Les interprétations réalisées sur les profils 2D permettent d'interpréter les autres profils sur la zone d'étude (Fig.1D). Les observations sur l'ensemble des profils permettent de cartographier les zones de roches altérées sous la forme de couloirs en surface ou profondeur discontinue (Fig.3A). Les

travaux de Valois (2011) en SRT 3D ont permis également d'imager un couloir altéré de faibles vitesses (Fig 3A), ce qui est cohérent avec nos données. L'ensemble des couloirs altérés détectés ont une orientation similaire à la fracturation décrite par Deville (2013) et aux couloirs vidés sur la zone d'étude (Fig. 3A). Le lien entre fracturation et orientation des couloirs de roches altérées est une observation également réalisée dans le cas des études sur les roches calcaires (e.g. Dubois et al., 2014).

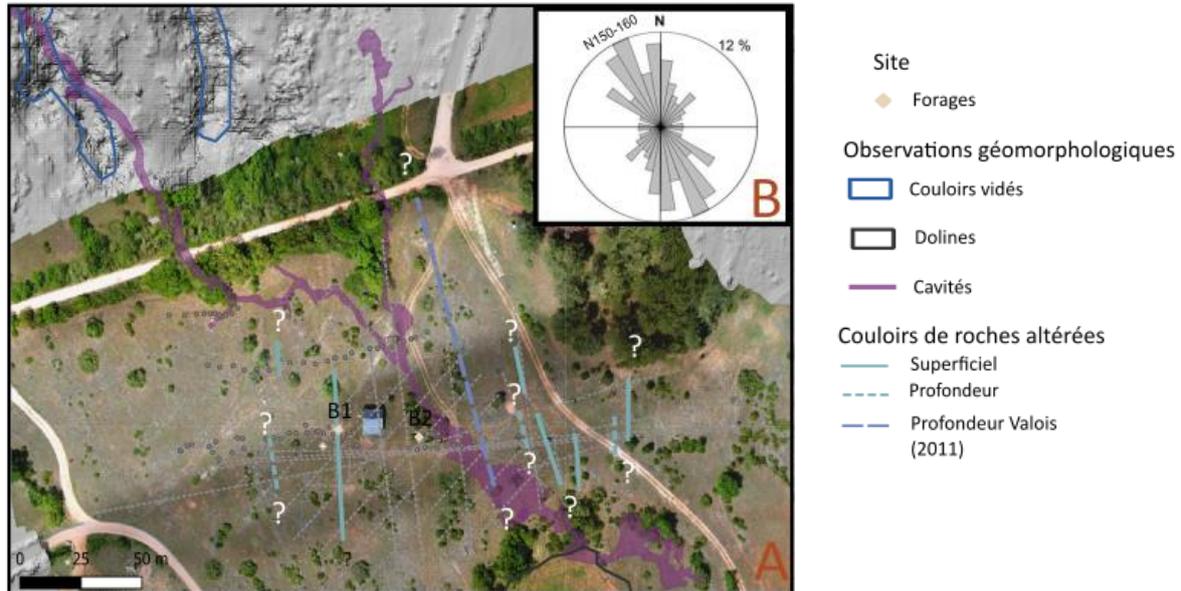


Fig. 3 – Cartographie des couloirs contenant les roches altérées, (A) Site d'étude avec l'ensemble des profils géophysiques et les couloirs altérés, fond de carte image lidar et modèle numérique de terrain (MNT) donné Lidar HD 2021 (IGN). (B) Diagramme en rose des fracturations sur le site d'étude modifié d'après Deville (2013).

CONCLUSION

Pour notre site d'étude, les roches altérées sont imagées par des atténuations fortes, anomalie négative gravimétrique, faible résistivité et vitesse lente. La géométrie a pu être déterminée par des inversions de contraintes et un modèle synthétique. Cette géométrie est en cohérence avec les observations de terrain. Les analyses sur les échantillons ont permis de déterminer une porosité importante des roches altérées ainsi qu'une absence de variations minéralogique (Diffraction et fluorescence à rayon X et microscope optique à balayage). En nous basant sur ces observations, nous proposons que les roches altérées jouent un rôle de stockage en eau. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes sur la zone d'étude (e.g. Deville, (2013)). L'impact des roches altérées dans le fonctionnement hydrogéologique pourrait être affiné par un suivi temporel en géophysique, ou en utilisant par exemple des données de débit et l'hydrochimie des eaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARAL, C., SERANNE, M., CAMUS, H., JOUVES, J., 2023. Impact of alteration corridors on karst reservoir organisation and evolution of groundwater flow path: An example from the southern border of the Larzac Causse, southern France. *BSGF*
- DANDURAND G., 2011. Cavités et remplissages de la nappe karstique de Charente (bassin de la Touvre, La Rochefoucauld). Spéléogénèse par fantômisation, archives pléistocène et holocène, rôle de l'effet de site. Géomorphologie. Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, 2011. Français. NNT : tel-00684382
- DE CASTRO, D.L., BEZERRA, F.H.R., 2023. Characterization of a ghost-rock karst system controlled by fracture network and bedding planes in a semiarid region (NE Brazil) using ground penetrating radar (GPR). *Environ Earth Sci* 82, 366.
- DEVILLE, S., 2013. Caractérisation de la zone non saturée des karsts par la gravimétrie et l'hydrogéologie. *Géophysique [physics.geo-ph]*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2013. Français. NNT : tel-0082934
- DUBOIS, C., QUINIF, Y., BAELE, J.-M., BARRIQUAND, L., BINI, A., BRUXELLES, L., DANDURAND, G., HAVRON, C., KAUFMANN, O., LANS, B., MAIRE, R., MARTIN, J., RODET, J., ROWBERRY, M.D., TOGNINI, P., VERGARI, A., 2014. The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Reviews* 131, 116–148.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W., 2007. In: John Wiley, Sons (Ed.), *Karst Hydrogeology and Geomorphology* (Chichester, 562 pp.).
- KAUFMANN, O., DECEUSTER, J., 2014. Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournais area through geophysical methods. *Geologica belgica*. 17-26
- RUCKER, C., GUNTHER, T., WAGNER, F.M., 2017. pyGIMLI: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences* 109, 106–123.721
- VALOIS, R., 2011. Caractérisation structurale de morphologies karstiques superficielles et suivi temporel de l'infiltration à l'aide des méthodes électriques et sismiques. *Géophysique [physics.geo-ph]*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011. Français. NNT : tel-00659289

APPLICATION DES TECHNIQUES ERT ET SISMIQUE RÉFRACTION POUR LA CARACTÉRISATION DE SITES EN AMONT DES PROJETS DE CONSTRUCTION : CAS DU SITE DE SONGON (COTE D'IVOIRE)

BIKPO A. M.^{1,2}, KOUAMÉ L.N.¹, KOUADIO K.J.O.¹

¹ Laboratoire de Géologie Ressources Minérales et Energétiques (LGRME), Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, aimemarcelbikpo@gmail.com, moayek@gmail.com, olivierkouame05@gmail.com

² Formation Doctorale Sciences, Technologie et Agriculture Durable (FD-STAD), Spécialité Géophysique Appliquée, Abidjan, Côte d'Ivoire

RESUME

L'objectif de ce travail est de caractériser la subsurface par une combinaison de méthodes géophysiques en vue de réduire les risques d'effondrement des bâtiments à Abidjan, Côte d'Ivoire. Pour ce faire, sur des sites sélectionnés l'ERT a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal Pro et la sismique réfraction à l'aide du sismographe GEA 24. La profondeur investiguée est de l'ordre des 10 premiers mètres. Les résultats ont montré une corrélation entre la résistivité électrique, la vitesse sismique, la rigidité et la compressibilité. Cela a permis d'identifier des zones à risque en vue de prendre des dispositions adéquates lors de l'exécution des projets de constructions.

Mots clés : *Caractériser la subsurface, ERT, sismique, construction, effondrement de bâtiments.*

ABSTRACT

The aim of this work is to characterize the subsurface using a combination of geophysical methods in order to reduce risk of building collapse in Abidjan, Côte d'Ivoire. ERT was carried out at selected sites using a Syscal Pro resistivity meter and refraction seismic using the GEA 24 seismograph. The depth investigated is around 10 meters. The results showed a correlation between electrical resistivity, seismic velocity, rigidity and compressibility. This has made it possible to identify areas at risk so that appropriate measures can be taken when building projects are carried out.

Key words: *Characterizing the subsurface, ERT, seismic, construction, building collapses.*

INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, Le développement urbain accéléré de la ville d'Abidjan ces dernières décennies dû à la croissance démographique se heurte à des problèmes environnementaux majeurs se traduisant par des effondrements partiels ou totaux des bâtiments. En effet, de 2016 à 2022 la ville d'Abidjan a enregistré plus d'une trentaine d'effondrement de bâtiments (Gouv-ci.2022). De plus 80 % des constructions à Abidjan sont bâties sans permis de construire (Jeune Afrique, 2021). Ces chiffres inquiétants nous imposent des réflexions poussées sur la construction des infrastructures en Côte d'Ivoire. Plusieurs études imputent ces effondrements aux non respects des normes de constructions, aux problèmes de stabilité de sol, à la qualité moindres des matériaux utilisés. Toutefois un paramètre important semble parfois être négligé, il s'agit des propriétés des sols sous la structure (Bayode, 2020). Le sol est celui-là même qui reçoit toute la charge du bâtiment, sa connaissance avant la construction est donc impérative. Généralement avant les constructions, des études géotechniques sont effectuées. Il s'agit de tests *in situ* et d'analyse en laboratoire visant à connaître les propriétés mécaniques du sol et évaluer sa stabilité avant la construction (Das et Sobhan, 1990). Ces études géotechniques sont efficaces et fiables. Cependant en présence de variations spatiales importantes dans la structure du sous-sol, leur nature ponctuelle peut les rendre limitées sur de grandes surfaces et peut conduire à une sous-évaluation des risques (Guerrero, 2014). Alors que la géophysique, à partir de ses méthodes non intrusives permet de couvrir de grands périmètres et surtout de suivre la continuité latérale et verticale des propriétés du sol. La géophysique apparait comme une alternative complémentaire à

l'étude géotechnique classique. Elle offre une vue globale des conditions souterraines et permet une prise de décision plus éclairée avant les projets de construction. Le site de Songon sélectionné est situé dans l'Ouest de la ville d'Abidjan et est une zone destinée à abriter des bâtiments. La zone appartient au Bassin sédimentaire Ivoirien où l'on retrouve des sédiments datant principalement du Mio-pliocène et du Quaternaire. Ces sédiments sont des sables argileux, des argiles, des vases, des sables etc. En fonction des conditions environnementales et des conditions de dépôts, ces sédiments présentent des caractéristiques variables, il est donc impératif de quantifier leurs résistivités avant les projets de construction. C'est donc dans cette optique que cette étude a été initiée avec pour objectif de caractériser le sous-sol du site de Songon avant les constructions par les méthodes géophysiques en vue de réduire les risques d'effondrement des bâtiments et de s'inscrire dans une dynamique de développement durable des infrastructures en Côte d'Ivoire.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour mener à bien ce travail, deux techniques géophysiques ont été mise en œuvre. Il s'agit de la tomographie de résistivité électrique (ERT) et de la sismique réfraction de faible profondeur. L'ERT comme la plupart des méthodes électriques en courant continu a consisté à envoyer du courant électrique dans le sous-sol et à mesurer les variations de la résistivité électrique. Cette technique a permis d'observer des hétérogénéités dans la structuration du sous-sol suivant des profils et de délimiter des zones à risque sur le site. Quant à la sismique, elle a consisté à envoyer de petites ondes sismiques dans le sol et à observer le comportement du sol au passage de ces ondes. Cette technique a permis d'analyser les vitesses sismiques, de calculer les modules d'élasticité du sol et d'évaluer la variation de la rigidité et de la compressibilité sur le site.

Les données collectées ont été traitées à l'aide de divers logiciels dont Prosys II, Res2Dinv, Oasis montaj de Geosoft et ZondST2D. Le traitement des données électriques a consisté en un filtrage, une inversion, suivie d'une spatialisation. Ce traitement a permis d'aboutir à la création de profils de résistivité électrique et de cartes de résistivité électrique à différents niveaux de profondeur. Le traitement sismique a débuté par un *picking* des premières arrivées pour les ondes P (Fig. 1A) et des secondes arrivées sur le sismogramme pour les ondes S (Fig. 1B), puis une inversion en vue d'obtenir des tomographies de sismique réfraction avec une présentation en 2D des pseudo-sections de vitesse des ondes P et S et enfin au calcul des propriétés élastiques, avec pour densité des sédiments rencontrés de l'ordre 2 g/cm^3 selon les équations (1), (2), (3), (4) et (5). Les modules d'élasticité obtenus ont permis d'aboutir à des cartes représentant la distribution spatiale de ces modules sur l'ensemble du site d'étude. Il faut toutefois signifier que les profils géophysiques obtenus ont été calibrés à l'aide de forages géotechniques effectués sur le site d'étude, en vue de renforcer la pertinence de l'interprétation géophysique.

$$\text{- le coefficient de Poisson} \quad \nu_d = \frac{(Vp^2 - 2Vs^2)}{2X(Vp^2 - Vs^2)} \quad (1)$$

$$\text{- le module de Young} \quad E_d = 2 \cdot \rho \cdot Vs^2 (1 + \nu) \quad (2)$$

$$\text{- le module de cisaillement} \quad \mu_d = \rho \cdot Vs^2 \quad (3)$$

$$\text{- le module de compressibilité} \quad k_d = \rho (Vp^2 - 4/3Vs^2) \quad (4)$$

$$\text{- le paramètre de Lamé} \quad \lambda_d = \rho (Vp^2 - 2Vs^2) \quad (5)$$

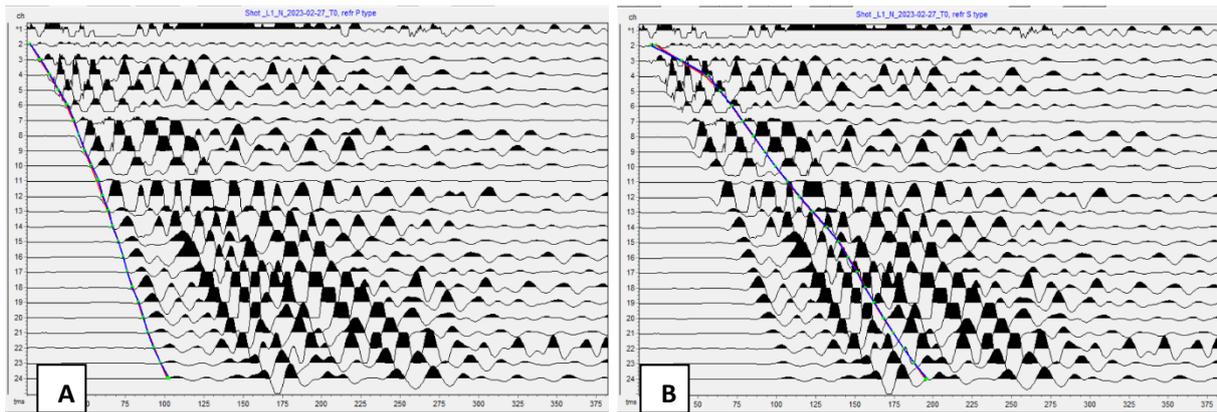


Fig. 1: A) Picking des ondes P; B) Picking des ondes S

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Profils de résistivité électrique et de vitesses sismiques

La figure 2 montre le profil de la variation de la résistivité électrique (Fig. 2A), la distribution de la vitesse des ondes P (Fig. 2B) et des ondes S (Fig. 2C) suivant la ligne 0 du site de Songon. Les faibles valeurs de la résistivité électrique représentées en bleu et en vert, indiquent la présence de couches conductrices pouvant être associées à des sédiments peu résistants susceptibles de se tasser (Capozzoli et al., 2020). De même, la baisse de la vitesse indique la présence de couches de rigidité faible. Sur les profils, les zones où la résistivité baisse, la vitesse baisse également, surtout au centre de la ligne et en fin de ligne dans le cadran Est. Ces zones sont de potentielles zones à risque pour les fondations des constructions.

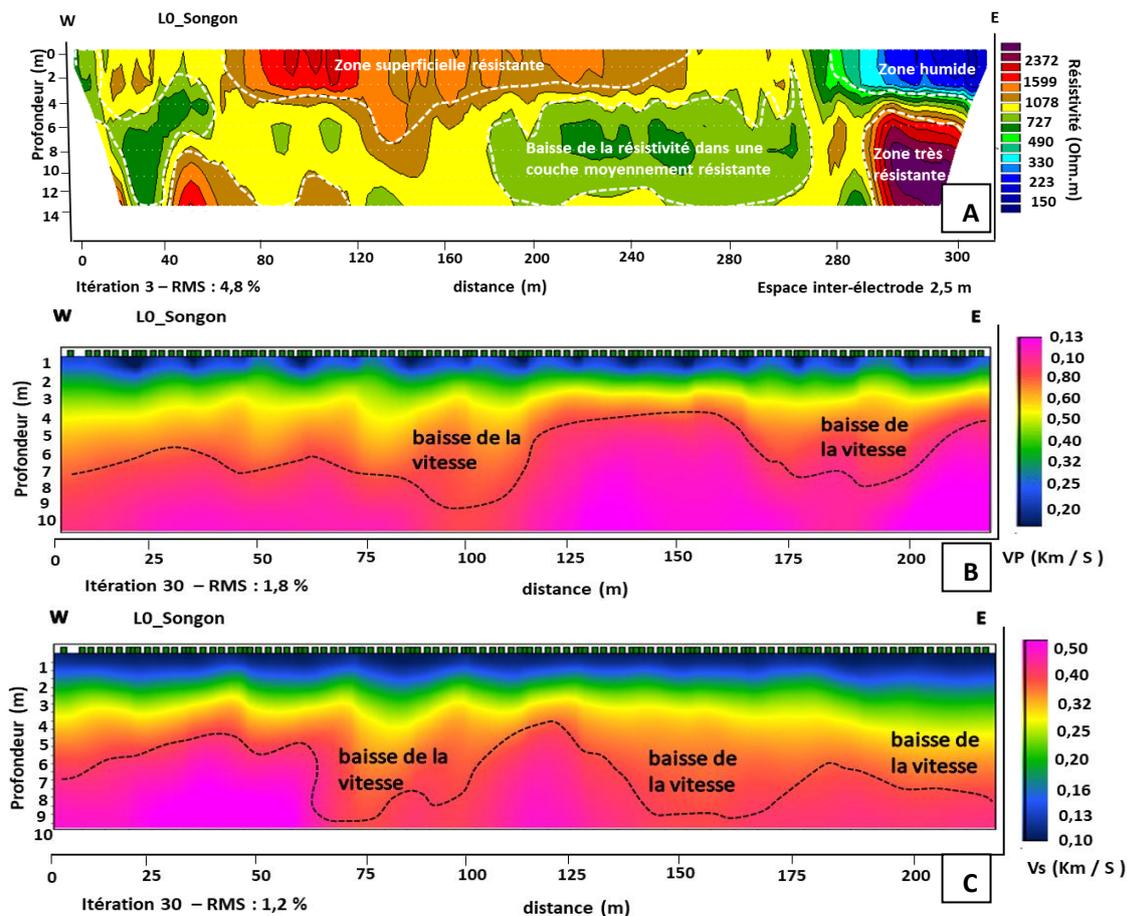


Fig.2 : A) Profil de résistivité électrique ; B) Profil de vitesse des ondes P ; C) Profil de vitesse des ondes S

En plus de la variation de la résistivité électrique et de la vitesse de l'onde de cisaillement suivant un profil, la mise en relation de tous les profils du site a permis d'évaluer la distribution spatiale de ces paramètres sur tout le site d'étude. Une corrélation a été également faite entre la carte de résistivité électrique (Fig. 3A) et celle du module de Young (Fig. 3B) traduisant la rigidité. La zone à risque est celle présentant à la fois une résistivité et une rigidité faible dans le quadrant Sud-Est du site.

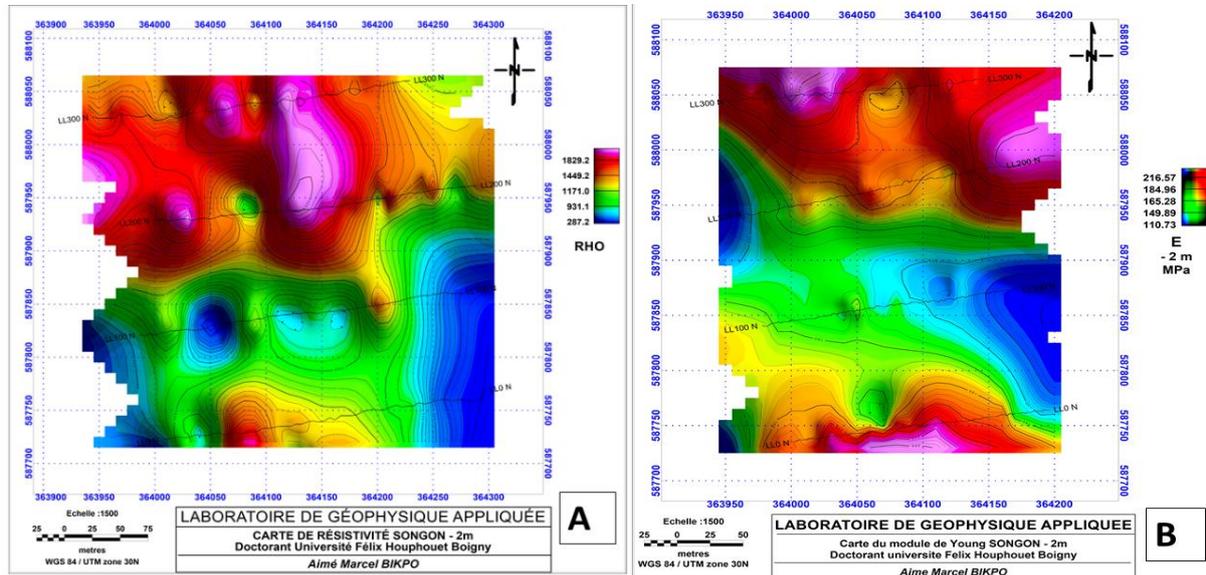


Fig.3 : A) variation de la résistivité électrique ; B) variation de la rigidité

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'utilisation des méthodes géophysiques à des fins de génie civil, ouvre de nouvelles perspectives pour la construction durable et la sécurité des infrastructures. L'objectif de ce travail est atteint. Il serait judicieux de la part des décideurs de systématiser l'étude géophysique dans le protocole d'étude des sites avant les constructions. Elle permettra de mieux relier les points de forages géotechniques et d'avoir une vue exhaustive sur la variation des propriétés mécaniques du sol et cela garantirait la durabilité des constructions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAYODE S. et EGBEBI A.A., 2020- Subsoil characterization for foundation stability using geophysical and geotechnical methods. Journal of Environment and Earth Science, Volume 10, pp 82-107.

CAPOZZOLI L., DE MARTINO G., POLEMIO M. et RIZZO E.,2020. Geophysical Techniques for Monitoring Settlement Phenomena Occurring in Reinforced Concrete Buildings. Springer Nature, Survey in Geophysics, volume 41, pp 575–604.

DAS B.M. et SOBHAN K.,1990- Principles of geotechnical engineering. Academia, 156 p.

GUERRERO O. ,2014- Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 220 p.

WEBOGRAPHIE

GOUV-CI.,2022- <https://www.gouv.ci/actualite-article.php?recordID=13235> ; Web le 08 / 03 /2022.

JEUNE AFRIQUE.,2021- <https://www.jeunefrique.com/1185632/economie-entreprises/cote-divoire-construire-construire-a-tout-prix/> ; Web le 11 / 08 / 2021.

APPORT DES SONDAGES ELECTRIQUES VERTICAUX DANS LA COMPREHENSION DES INONDATIONS DUES A LA REMONTEE DE NAPPE PHREATIQUE EN MILIEU URBAIN : CAS DE LA VILLE DE NIAMEY (REPUBLIQUE DU NIGER)

ALASSANE HADO H.¹, ADAMOU M.M.¹, FAVREAU G.², LACHASSAGNE P.².

¹ Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, alassanehado@yahoo.fr ; moustapha_a@yahoo.com

² Institut de Recherche pour le Développement, IRD, guillaume.favreau@ird.fr ; patrick.lachassagne@ird.fr

RESUME

Afin de mieux comprendre les conditions de mise en place des inondations permanentes dans la ville de Niamey, des investigations hydrogéophysiques ont été initiées. La méthodologie basée sur des sondages électriques verticaux (selon le dispositif Schlumberger) corrélés aux données géologiques disponibles et combinés aux mesures régulières et continues du niveau de la nappe phréatique a permis d'aboutir aux principaux résultats suivants : trois principaux types de terrains ont été déterminés.

Mots clés : inondation, nappe phréatique, géophysique, SEV, Schlumberger, Niamey.

ABSTRACT

In order to better understand the conditions for the establishment of permanent floods in the city of Niamey, hydrogeophysical investigations were initiated. The methodology based on vertical electrical surveys (according to the Schlumberger device) correlated with the available geological data and combined with regular and continuous measurements of the water table level made it possible to arrive at the following main results: three main types of terrain were determined.

Key words: flooding, water table, geophysics, VES, Schlumberger, Niamey.

INTRODUCTION

La vallée de Gounti Yéna est située dans le centre urbain de la ville de Niamey (fig. 2). Près de 60 % des quartiers de la capitale repose sur le bassin versant de Gounti Yéna et aujourd'hui des secteurs observent le phénomène d'inondation permanente liée à la montée de la nappe phréatique (Hado et al., 2021). Ce risque d'inondation correspond à la rencontre, sur un même espace, d'un aléa et d'enjeux sanitaires, humains, économiques ou environnementaux. L'action des gestionnaires et des scientifiques, attachés aux relations entre la ville et ses ressources en eau, s'est surtout concentrée sur les eaux de surface où par exemple l'actualisation du schéma directeur d'assainissement de la ville de Niamey s'intéresse uniquement aux eaux pluviales depuis 2018. Plusieurs facteurs affectent aujourd'hui la gestion du risque d'inondation en ville et influent sur l'aggravation de ce phénomène, dont les facteurs météorologiques, topographiques, géologiques, hydrologiques et humains (Redjem et al., 2020).

L'urbanisation entraîne un accroissement important du ruissellement des eaux pluviales et une imperméabilisation des sols. Mais un examen plus fin du devenir de ces eaux à l'interface sol-atmosphère en ville est possible en analysant les effets de l'urbanisation à trois niveaux, depuis la surface du sol jusqu'aux nappes souterraines permanentes en passant par le sous-sol proche (Raimbault, 1996). Ces trois niveaux sont évidemment liés, mais une telle approche permet de mettre en évidence des mécanismes assez variés et peu étudiés. Dans le but de comprendre les échanges, cette étude a été initiée. Il s'agit d'utiliser les sondages électriques pour pousser ou améliorer les connaissances déjà acquises sur les inondations en milieu urbain.

MATERIEL ET METHODES

Techniques de sondage géophysique

A partir des mesures d'intensité et de différence de potentiel, la résistivité du sous-sol est calculée à la verticale du point centrale O du dispositif. Pour ce faire, le résistivimètre est placé au point O et on place les électrodes ABMN à partir de la méthode d'investigation choisie, ici c'est le Schlumberger qui a été choisie. Dans le cadre de cette étude, 30 sondages ont été réalisés avec 23 dans le bassin de Gounti Yéna et 8 hors du bassin. La distance totale des électrodes d'injections du courant choisie est

variable avec un écartement maximal de quatre cent mètres (AB=400m) ; ce qui conduit à une profondeur d'investigation estimée à près de cent mètres (Profondeur=100m). L'écartement des électrodes de réception a régulièrement varié de 1, 10 et 60m pour cette étude comme le montre l'exemple de la figure 1.

Quelle que soit la méthode géophysique utilisée, l'analyse des résultats d'une mesure sera fortement valorisée si l'on dispose d'un forage de reconnaissance permettant de caler l'interprétation des données géophysiques (BRGM, 2000). C'est ainsi que pour le traitement des données, des valeurs de résistivités ont été fixées au niveau du modèle grâce aux différents logs lithologiques disponibles. Dans certaines zones, ces logs lithologiques des forages ont permis d'établir des corrélations avec les données des sondages géophysiques collectées, comme c'est le cas au niveau de la figure 4.

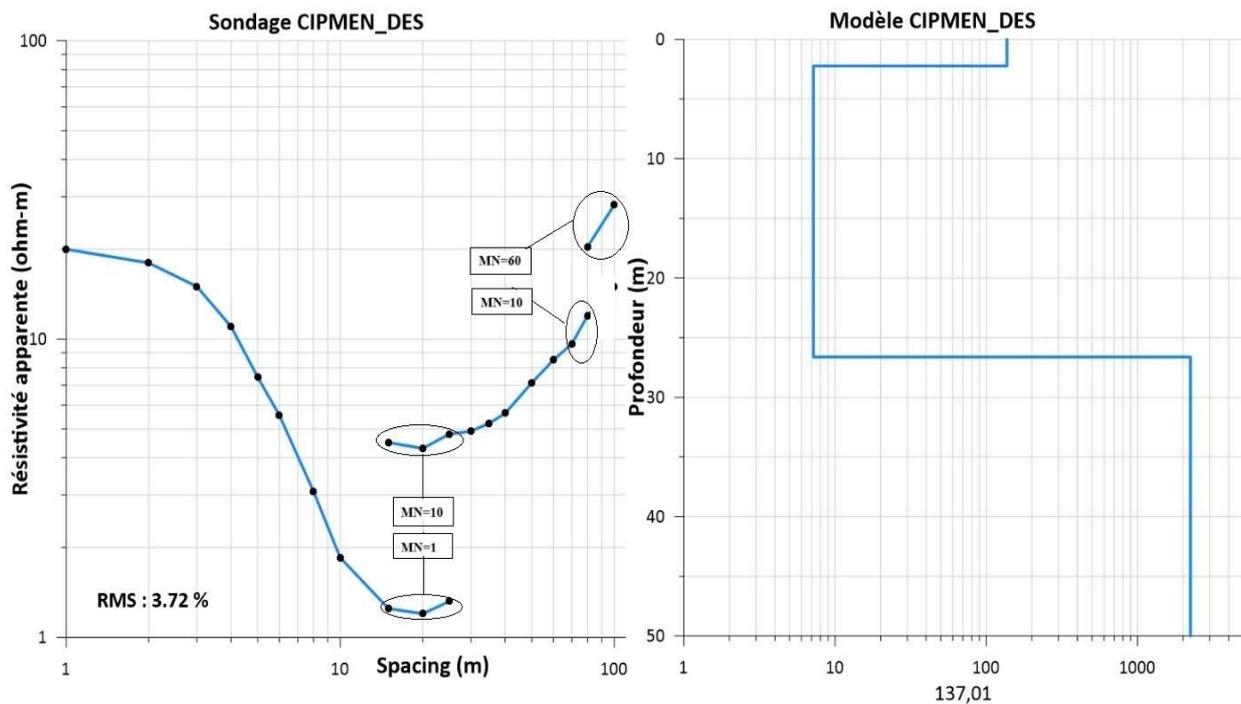


Figure 1 : Exemple de Sondage Electrique Vertical dans la Zone inondée aval

RESULTATS ET DISCUSSION

Sondage électrique vertical (SEV) dans le bassin de Gounti Yéna

L'interprétation des résultats obtenus par la méthode électrique (SEV) s'est effectuée site par site afin de mieux corréliser d'une part ces résultats entre eux et d'autre part avec les logs de forages à proximité obtenus dans le cadre de cette étude.

Traitement des sondages électriques verticaux (SEV) par transect dans le bassin

Les résultats obtenus par SEV, la proximité des sites des sondages (SEV), et le profil de sondage choisi (d'aval en amont) ont permis de diviser le bassin en trois parties ; à savoir : la partie aval, la partie centrale et la partie amont. Les différents sondages ont été corrélés entre eux afin d'établir un profil continu. Il sera présenté ici les résultats longitudinaux et ceux de la partie centrale (faisant l'objet d'inondation permanente).

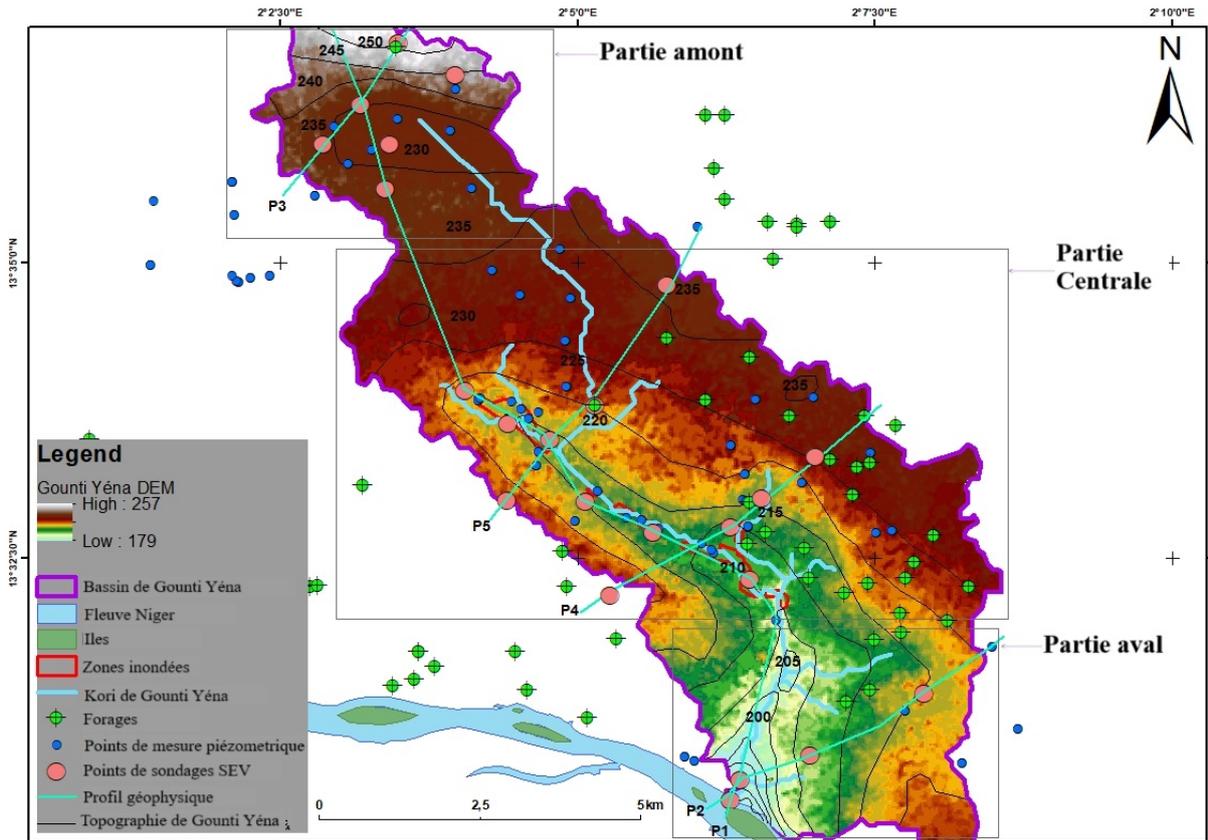


Figure 2 : Points des SEV suivant un profil de sondage S-N dans le bassin Goutti Yéna

• **Transect longitudinal Sud-Nord P1 du bassin versant de Goutti Yéna**

Conformément au profil longitudinal tracé à la figure 2, une corrélation a été effectuée entre les différents sondages passant par ce transect. La figure 3 constitue le résultat de cette corrélation selon l'axe longitudinal S-N du bassin. L'ordre des trois premiers terrains est respecté partout sauf à l'extrémité aval (au niveau du fleuve Niger où on peut faire face à uniquement deux terrains par endroit et à l'extrémité amont (dans la zone de Karsamba où la couche très conductrice disparaît). Il s'agit des terrains moyennement conducteurs, suivis de ceux très conducteurs et enfin à la base des terrains très résistants constituant le socle.

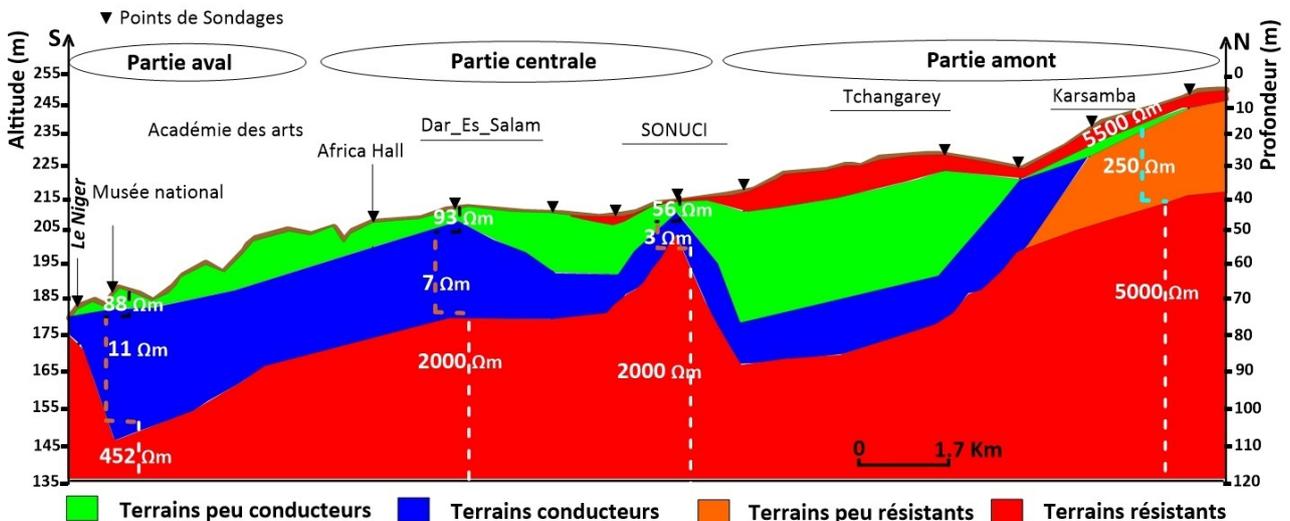


Figure 3 : Coupe lithologique à partir des SEV suivant un profil de sondage S-N du bassin du Goutti Yéna

- Partie centrale (P4 et P5 de la figure 2)

Dans la partie centrale du bassin versant se trouvent les deux zones inondées appelées dans cet article : zone inondée amont et zone inondée aval. Des coupes géo électriques de corrélation inter sondages à travers des transects transversaux passant par les zones inondées amont (fig. 4) et aval ont été établies.

Il s'agit des douze (12) SEV réalisés dans la partie centrale du bassin (fig. 2). Ces différents sondages ont permis de classer les zones investiguées en deux ou trois types de terrain principaux :

- Un premier terrain peu conducteur, formé de dépôt sédimentaire du quaternaire (sable et sable quartzeux) et du Continental Terminal (sable latérite ; sable avec gravillons latérites, argiles jaunes supérieures et oolithes ferrugineux) de résistivités variant de 90 à 517 $\Omega.m$ avec une épaisseur comprise entre 17 et 47 m pour la zone inondée amont (fig. 4) et de 58 à 120 $\Omega.m$ de résistivité avec une épaisseur variant de 8 à 27 m pour la zone inondée aval ;
- Un deuxième terrain conducteur, constituant les argiles du CT et les altérites du socle avec des valeurs de résistivités allant de 12 à 32 $\Omega.m$, une épaisseur variant de 6 à 27 m en ce qui concerne la zone inondée amont (fig. 4). Pour la zone inondée aval, cette zone est caractérisée par des résistivités variant de 11 à 31 $\Omega.m$ à avec des épaisseurs de 10 à 26 m. La faible profondeur du niveau argileux allant de 8 à 27 m contribue à l'inondation des quartiers situés dans ce secteur. Il faut également noter que les endroits inondés se trouvent dans un creux topographique (fig. 4) ;
- Un troisième terrain très résistant, le socle avec une résistivité de plus ou moins 2000 $\Omega.m$, apparaît à une profondeur minimale de 23 m et maximale de 55 m pour la zone inondée amont. Le profil utilisé n'a pas permis d'atteindre le socle dans la zone inondée aval.

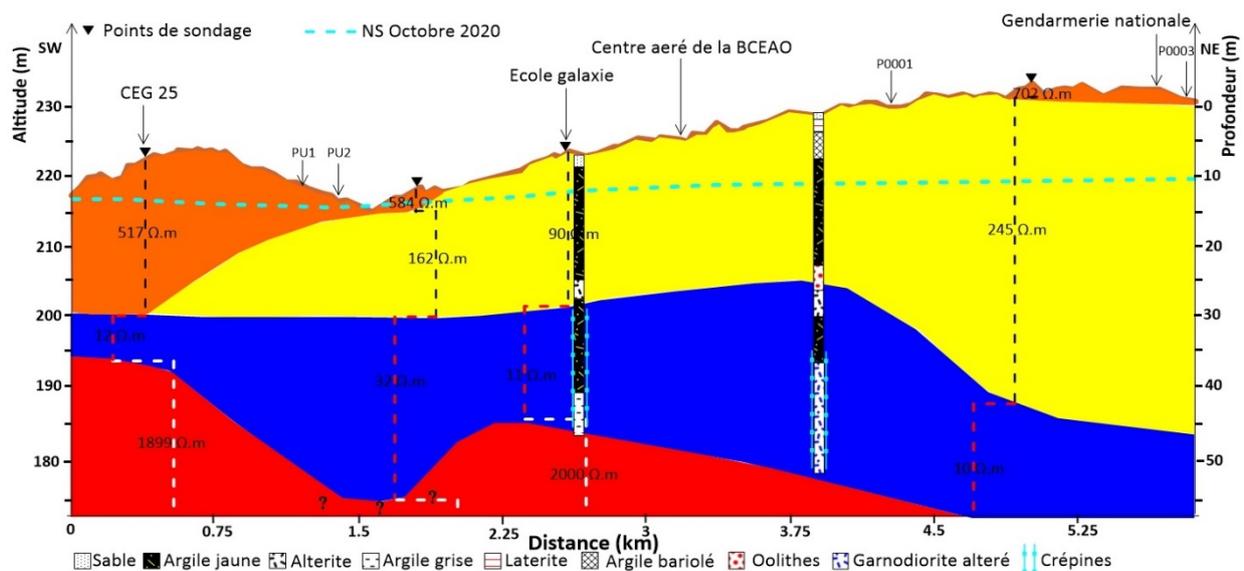


Figure 4 : Coupe géo électrique d'un transect central du bassin de Gounti Yéna (zone inondée amont)

CONCLUSION

Les changements apportés par changement climatique et l'urbanisation au cycle de l'eau ont des effets importants sur le sol et l'homme, mais certains demeurent encore mal connus ou difficilement quantifiables. La géophysique a permis de distinguer trois types de formations hydrogéologiques (perméable non aquifère, perméable aquifère et imperméable). Il est parfois difficile de distinguer la formation perméable aquifère d'une formation imperméable (exemple du sable saturé et des argiles).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Baltassat J.M., Mathieu F. (2000), Ressources en eau de Margeride ouest – Reconnaissance géophysique complémentaire, *Rapport BRGM/RP-50533FR*, 72 p., 5 fig., 4 tabl., 4 ann., 6 pl

Alassane Hado, H., Adamou, M.M., Favreau, G., Boucher, M., Hima, K. and Dan Dano, I. (2021), Rise of Urban Water Table as a Cause of Flooding: Improving Knowledge in the City of Niamey (Niger Republic). *Journal of Water Resource and Protection*, 13, 976-999. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.1312053>

CARACTÉRISATION PAR MESURES GÉOPHYSIQUES DE DÉCHARGES ENFOUIES SUR LE LITTORAL NORMAND

HAMELIN L.¹, THUILLIER S.², FINCO C.¹, ROBION P.³, FAUCHARD C.¹

1 Cerema, ENDSUM, 76120 Le Grand-Quevilly, France, cecile.finco@cerema.fr

2 UMR 76120 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, 75005 Paris, France, sarah.thuillier@sorbonne-universite.fr

3 CY Cergy Paris Université, Géosciences et Environnement Cergy (GEC), 95000 Cergy, France, philippe.robion@u-cergy.fr

RESUME

Cette étude porte sur la caractérisation géophysique des décharges enfouies sur le littoral normand dans le cadre du plan décennal de résorption des décharges lancé par le gouvernement en 2022. Une campagne de tomographie de résistivité électrique (TRE) a été réalisée en 2024 à Sotteville-sur-Mer (76), permettant de mieux comprendre la distribution des déchets enfouis et d'estimer un volume de déchets supérieur aux prévisions. Une étude géophysique similaire est prévue sur la décharge de Sainte-Marguerite-sur-Mer (76). Les résultats permettent ensuite de guider les actions de réhabilitation des sites.

Mots clés : *décharge, littoral, géophysique de sub-surface.*

ABSTRACT

This study focuses on the geophysical characterization of buried landfills along the Normandy coastline as part of the government's ten-year landfill remediation plan launched in 2022. A campaign of electrical resistivity tomography (ERT) was conducted in 2024 in Sotteville-sur-Mer (76) helping to better understand the distribution of buried waste and estimate a volume exceeding initial estimations. A similar geophysical study is planned for the Sainte-Marguerite-sur-Mer (76) landfill. The results help guide site rehabilitation efforts.

Key words: *landfill, coastal, subsurface geophysics.*

INTRODUCTION

La présence sur le littoral français d'anciennes décharges en front de mer constitue une menace environnementale croissante, notamment en raison du changement climatique, qui entraîne une élévation du niveau des mers et augmente les risques d'érosion côtière et de submersion. Face à ce constat, le gouvernement français a lancé en février 2022 un plan décennal de résorption des décharges littorales présentant, à court terme, le plus fort risque de déversement de déchets en mer. Les décharges concernées ont été identifiées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), accompagne les maîtres d'ouvrage dans la réhabilitation de ces sites et leur renaturation.

C'est dans ce contexte que le projet Geo2lac a été lancé, dans le cadre de CY Générations. Ce projet vise comprendre les interactions entre les décharges, les fluides environnants et la roche encaissante.

Cette étude porte précisément sur la caractérisation in situ de décharges par méthodes géophysiques. Une première campagne de TRE a été réalisée au printemps 2024 sur la décharge littorale de Sotteville-sur-Mer (76). L'interprétation de ces profils, couplée à une campagne photogrammétrique ont permis une estimation de l'emprise de la décharge et du volume de déchets. Une seconde décharge est en cours d'étude sur une commune voisine à Sainte-Marguerite-sur-Mer au phare d'Ailly.

CONTEXTE GEOLOGIQUE DES DECHARGES DU LITTORAL NORMAND

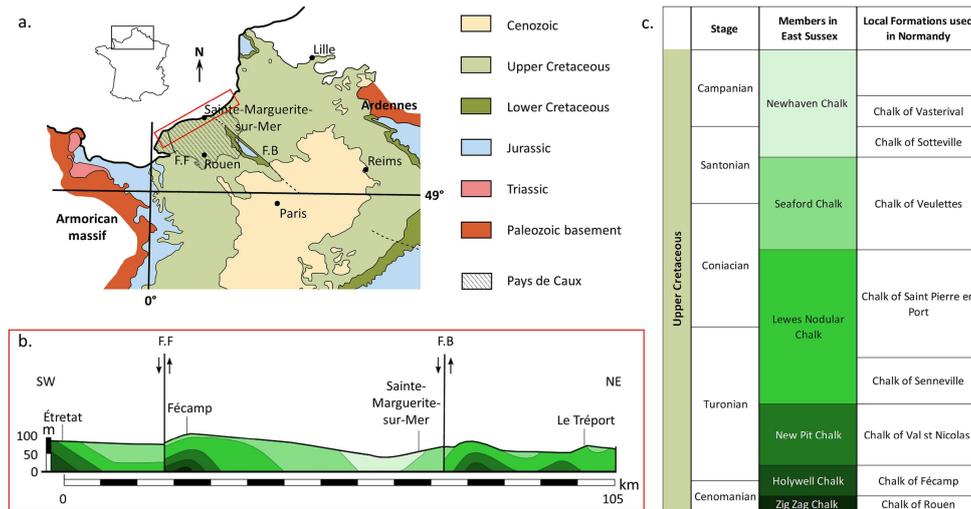


Fig. 1 – a. Carte géologique simplifiée du bassin parisien. b. Coupe géologique synthétique des falaises de craie côtières de Haute-Normandie, France. c. Formations lithostratigraphiques de craie. F.F.= faille Fécamp-Lillebonne, F.B. = faille du Pays de Bray. (Junique et al., 2024)

Les communes littorales de Sainte-Marguerite-sur-Mer et de Sotteville-sur-Mer se situent dans le bassin sédimentaire parisien, plus précisément dans la région du Pays de Caux, un plateau délimité par la Seine au sud, la Varenne à l'est et la côte d'Albâtre au nord et à l'ouest. Il est principalement constitué de craie datant du Crétacé supérieur (Fig. 1). Sotteville-sur-Mer se trouve à seulement quelques kilomètres à l'ouest de Sainte-Marguerite-sur-Mer. Bien que les falaises des deux communes soient composées de craies du Campanien et du Santonien, elles présentent des morphologies différentes.

Ces falaises, d'une hauteur comprise entre 20 et 30 m, sont particulièrement sujettes à l'érosion. En effet, entre 1966 et 2008, 0,09 m à 0,23 m par an ont été érodés au niveau des sommets des falaises entre le Cap d'Antifer et le Tréport (Junique et al., 2024).

LE SITE DE SOTTEVILLE-SUR-MER

Caractéristiques du site et histoire

La décharge de Sotteville-sur-Mer se situe sur le front de mer, sur une falaise dite « simple ». Ce type de morphologie est le plus fréquent : la falaise est composée de craies bien stratifiées, qui lui confèrent sa verticalité (Letortu, 2013). Son sommet est entaillé par deux valleuses qui délimitent le terrain d'étude : l'une au Nord-Est et l'autre au Sud-Ouest, cette dernière étant partiellement comblée par des déchets. Fermée définitivement en 1998, la décharge contenait des déchets ménagers ainsi que des matériaux issus du BTP.

Tomographie de résistivité électrique

Une campagne de TRE a été menée le 14 mai 2024, trois profils de 59,25-m ont été réalisés avec 80 électrodes espacées de 0,75-m pour une bonne résolution des deux premiers mètres. Le profil P1 a été acquis en configuration Wenner-Schlumberger et les profils P2 et P3 en Dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger (Fig 2.a). L'acquisition a été effectuée avec un Terrameter LS 2 d'ABEM avec la technique du "roll-along". Les points de mesures où l'erreur de « stacking » est supérieure à 5 % ont été filtrés (P1 : aucun point filtré, P2 : 37 points filtrés sur 3822, P3 : 64 points filtrés sur 3933).

L'analyse des profils inversés a révélé trois couches : une couche résistante en surface de 1,5 à 2 m d'épaisseur (C1), une couche intermédiaire (C2), plus conductrice et assez hétérogène, et enfin une couche plus profonde et plus résistante (C3) (Fig. 2.c). La couche C3 correspond à un matériau plutôt résistant d'environ 60 Ω .m, qui pourrait s'apparenter à de la craie. C2 pourrait alors correspondre à une zone de craie karstique et l'horizon résistant C1 serait associé à la couche de limon polluée. Sur le profil P3 cette couche s'amincit au SSO du tracé, là où la topographie est plus marquée et pourrait indiquer la limite de la décharge.

Les images de photogrammétrie ont permis de corroborer ces résultats en visualisant directement les différentes couches sur la paroi de la falaise (Fig. 2.a). Sur le zoom 1, une couche variant de 1,6 m à 1 m avec une forte concentration de déchets est bien visible, appuyant l'attribution de la couche résistante C1 au limon pollué. Sur le zoom 2, cette couche semble s'être amincie à environ 0,8 m d'épaisseur, avec une dispersion moindre des déchets. Le zoom 3 (Fig 2.b) confirme la structure géologique du terrain : on observe une couche surfacique de limon d'environ 1 m d'épaisseur mais qui peut varier avec la quantité de déchets stockée à certains endroits, suivie d'une zone karstique de craie altérée avec des zones qui semblent plus humides, et donc plus conductrices que d'autres, et enfin une craie saine à partir d'environ 3 m de profondeur.

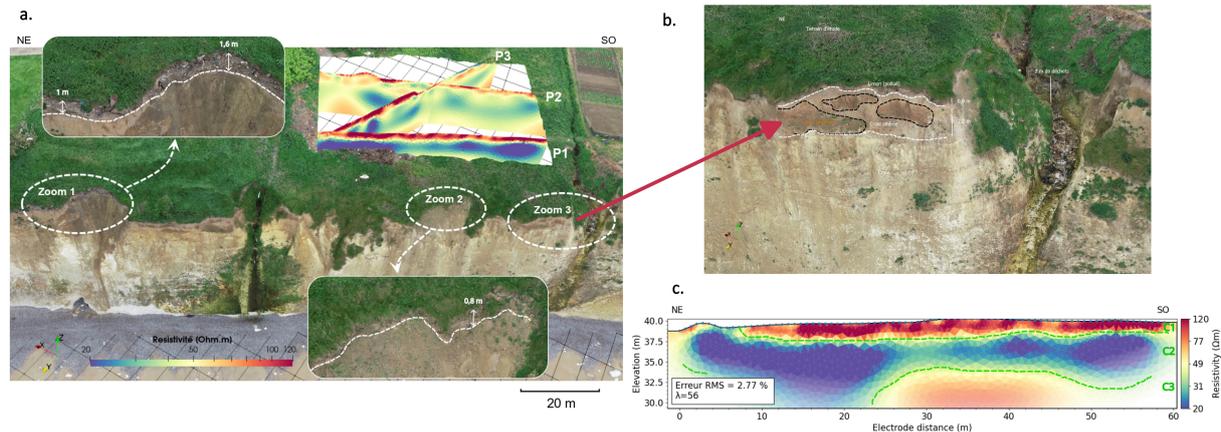


Fig. 2 – a. Comparaison entre la photogrammétrie et les profils électriques inversés avec la librairie python PyGIMLi (Rücker et al., 2017) – Profil P1 : configuration Wenner-Schlumberger avec λ coefficient de régularisation = 56 et RMS Root Mean Square = 2,77% - Profil P2 : inversion simultanée des configurations Wenner-Schlumberger et Dipôle-dipôle avec $\lambda = 56$ et RMS = 2,85% - Profil P3 : inversion simultanée des configurations Wenner-Schlumberger et Dipole-dipole avec $\lambda = 56$ et RMS = 4,72% . b. Zoom 3, structure géologique du terrain c. Inversions avec la librairie python PyGIMLi du profil P1 (Wenner-Schlumberger) avec C1 : limon pollué (~120 Ω .m), C2 : craie altérée (~20 Ω .m), C3 : craie (~60 Ω .m).

Finalement, si on considère une épaisseur de déchets moyenne de 1,5 m sur la surface englobant les couches les plus résistantes observées, surtout sur les profils P1 et P3, on atteint un volume de 2100 m³, pour 1400 m² de surface. Cette estimation est un minimum, puisqu'on observe dans la falaise des couches de déchets qui s'étendent sur le terrain situé à côté de notre zone d'étude. Le volume donné par la fiche CASIAS (Cartographie des Sites Anthropiques d'Intérêt pour les Autorités et la Société) de 50 à 99 m³ semble donc largement sous-estimé.

LE SITE DU PHARE D'AILLY

Caractéristiques du site et histoire

La décharge de Sainte-Marguerite-sur-Mer se situe sur un plateau au bord d'une falaise dite « complexe », qui présente une forte instabilité. Ces falaises se caractérisent, à leur base, par des craies, surmontées de terrains meubles sablo-argileux en haut de falaise. Ces dernières se composent de trois arrière-falaises avant l'abrupt terminal crayeux (Letortu, 2013). Cette configuration entraîne d'importants glissements de terrain appelés frettes.

Le site, entièrement recouvert de végétation, est non surveillé et inaccessible à la population en raison de sa topographie escarpée, ainsi que de la présence de clôtures et de signalétiques de sécurité.

La décharge a accueilli entre 1972 et 1990 principalement des déchets issus du BTP et des ordures ménagères. Des déchets sont visibles depuis l'estran, en bas de la falaise, et en affleurement depuis le plateau (Fig. 3). La superficie estimée de la décharge est de 8700 m², avec une épaisseur du massif inconnue mais certainement très variable.

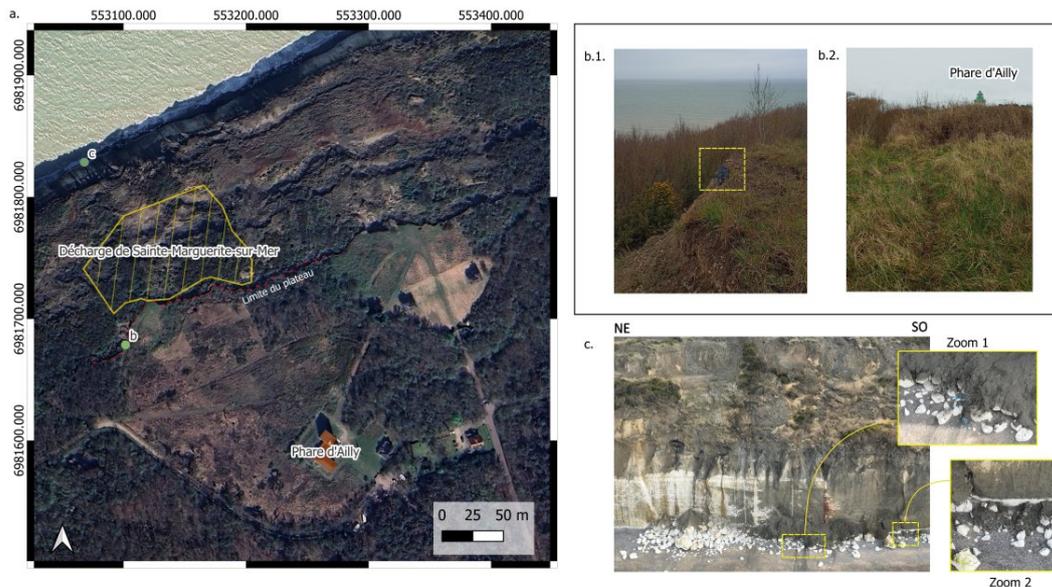


Fig. 3 – a. Carte de la localisation officielle de la décharge de Sainte-Marguerite-sur-Mer. b.1 Photo de déchets dans le sol prêts à tomber sur la limite du plateau (11/03/2025). b.2. Photo prise depuis la limite du plateau en direction du phare (11/03/2025) c. Photo de déchets (sacs plastiques bleus) au pied de la falaise en contrebas de la décharge (13/03/2025). Les déchets sont mis en évidence par un encadré jaune.

Perspective d'étude géophysique sur le plateau du Phare d'Ailly

L'étude qui sera menée sur la décharge de Sainte-Marguerite-sur-Mer se concentrera sur la zone entre la limite du plateau et le phare d'Ailly. L'objectif sera de caractériser d'éventuels dépôts de déchets encore présents sur le plateau, malgré le glissement de la décharge vers le bas de la falaise. L'étude géophysique de la décharge de Sainte-Marguerite-sur-Mer suivra une approche similaire à celle de Sotteville-sur-Mer, où la TRE a permis de cartographier efficacement l'emprise des déchets et où le modèle photogrammétrique a facilité l'interprétation des résultats. Des méthodes complémentaires comme l'électromagnétisme à faible nombre d'induction (EMI), seront utilisées pour déterminer l'emprise surfacique des déchets. Par ailleurs, un géoradar monté sur drone pourrait également être utilisé pour survoler la zone dans un cadre expérimental et faciliter la localisation d'anomalies plus ponctuelles liées aux déchets.

CONCLUSION

L'étude géophysique des décharges littorales permet de mieux comprendre l'ampleur des dépôts enfouis et leur impact sur l'environnement. Les techniques comme la TRE permettent l'estimation du volume de déchets et fournissent des données essentielles pour orienter les actions de gestion et de réhabilitation des sites. L'utilisation d'autres méthodes, telles que l'EMI, en complément de la TRE, pourrait affiner la caractérisation des contours et des anomalies associées aux dépôts. Des mesures de polarisation provoquée pourraient également compléter les investigations. Cette méthode, sensible aux contrastes de chargeabilité dans le sous-sol, permettrait de localiser la présence de polluants spécifiques, notamment ceux affectant la conductivité du fluide interstitiel ou induisant une polarisation de membrane.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Junique T., Antoine V., Guilbert B., Beaucamp C., Ledun S., Costa M., Olivier R., Davidson C., Fauchard C., 2024 - Investigation of the geological and hydrogeological structure of chalk cliffs with visible, thermal infrared and electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 630, 130642.

Letortu P., 2013 - Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits. Thèse de doctorat, Université de Caen.

Rücker C., Günther T., Wagner F. M., 2017 – pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106-123.

APPORT DE L'IMAGERIE GEOPHYSIQUE SUR LA COMPREHENSION DE LA DYNAMIQUE DE VEGETATION D'UN PIERRIER DE PENTE VALLEE DE MISERE (SARTHE)– PARC NATUREL REGIONAL & GEOPARC MONDIAL UNESCO NORMANDIE MAINE

AUBRON I.¹, GOUEZ JM.², PERROS M.², THOMAS M.², WACQUIER L.², PARDO ROMAN I.²

¹ Parc naturel régional et Géoparc mondial UNESCO Normandie Maine, Carrouges, France, isabelle.aubron@parc-normandie-maine.fr

² GEOSCOP, Brest, BZH FRANCE, jm.gouez@geoscop.com

RESUME

Les géophysiciens de GEOSCOP et les équipes du PNRNM ont réalisé avec le Conseil départemental de la Sarthe des investigations mêlant imagerie géophysique et reconnaissance pédo-environnementaliste d'un pierrier des Alpes mancelles. Ces investigations ont permis de mieux connaître la géométrie et le granoclassement de cette formation mais également de comprendre la dynamique de végétation de cette formation de pente. C'est ce dernier point qui est exposé ici.

Mots clés : Pierrier, imagerie géophysique, patrimoine naturel, dynamique de végétation

ABSTRACT

The geophysicists of GEOSCOP and the PNRNM teams have carried out investigations with the Departmental Council of Sarthe, combining geophysical exploration and pedo-environmentalist reconnaissance of a scree from the Alpes Mancelles. These investigations have made it possible to better understand the geometry and granoclassification of this formation but also to understand the vegetation dynamics of this slope formation. This last point is exposed here.

Key words: Screes, geophysics imaging, natural heritage, vegetation dynamics

INTRODUCTION

Les pierriers de pente sont une spécificité du Parc naturel régional et Géoparc mondial UNESCO Normandie-Maine. Formés lors des climats périglaciaires par gélifraction des Grès armoricain, ils représentent un patrimoine naturel (géodiversité, biodiversité, paysage) sur lequel la colonisation de la végétation peut être parfois très rapide (Aubron I. Portal C., 2013). Au cœur des Alpes mancelles, la vallée de Misère, acquise pour partie et classée par le Conseil départemental de la Sarthe, Espace Naturel Sensible de la Sarthe en 2017, présente des pierriers remarquables parsemés de landes, mais en constante régression depuis l'après-guerre : - 50 % entre 1949 et 2022 (Portal C., Aubron I. 2025). Dans quelle mesure la constitution du pierrier notamment en termes de géométrie et de granulométrie influence-t-elle la répartition de la végétation et sa dynamique ?

Le Conseil Départemental de la Sarthe, a mis en œuvre un programme d'actions pluridisciplinaire de connaissance de cette formation de pente, de la biodiversité, et des expérimentations de gestion. Une étude d'imagerie géophysique a été réalisée par GEOSCOP (2024) pour caractériser le pierrier dans son épaisseur (des blocs de surface jusqu'au substratum). Cette mission a également eu pour finalité d'étudier sa pertinence comme aide aux choix de gestion de cet espace patrimonial.

METHODOLOGIE

Description et cartographie du site

Afin d'analyser les résultats de l'imagerie géophysique au regard des éléments de surface, une description a été réalisée à partir de sources bibliographiques (carte géologique, Hascouet C., 1995, iconographie ancienne, etc.) et d'observations de terrain (description du pierrier, des affleurements, pendage, formations végétales...). Une cartographie a été effectuée depuis une image prise par drone (Cermosem UGA-Pacte, 2023). L'outil cartographique open-source Qfield a permis de géoréférencer le

pierrier et ses abords : les affleurements rocheux, leurs limites topographiques ainsi que les différentes formations végétales (bois, landes, fougères).

La principale limite méthodologique concerne les formations végétales et leur dynamique d'extension. Le pierrier a connu des travaux de restauration avec export de la végétation, souches, humus (2008) et des travaux d'abattage d'arbres sans dessouchage avec exportation à 80% en limite nord du pierrier (2024). Les formations végétales (landes, fougères) observées sont ainsi une réponse à une pression anthropique. Elles ne pourront être corrélées avec certitude à la constitution du pierrier.

Imagerie géophysique

Nous avons retenu une méthodologie géophysique multiméthode en raison de l'incertitude pesant sur la résolution et la profondeur d'investigation dans cette formation superficielle.

Ces investigations reposent sur deux types d'approche :

- Une exploration par imagerie 2 D de la géométrie des horizons superficiels et profonds. Cette approche menée par les méthodes électriques et sismiques (réfraction et MASW), techniques déjà expérimentées et validées en contexte similaire (BCG, 2017) a été enrichie par l'imagerie radar.
- Une cartographie Slingram visant à analyser la variabilité spatiale de la conductivité sur une zone de pierrier nu.

RESULTATS



Figure 1: Pierrier de l'ENS Vallée de Misère (72) © PNRNM Pierrier de quartzite assez évolué : absence de paroi, taille des blocs homométrique sans classement (5 à 50 cm) avec une dominance de blocs de 10 à 25 cm

pierrier nu ou propre n'est pas connue (plusieurs dizaines de cm au moins).

En surface le pierrier présente une pente maximale de 30° avec une légère convexité dans son tiers supérieur. Au-dessus de cette limite les pentes sont moins élevées, de l'ordre de 25°. Des affleurements sont alignés dans le sens de la pente sous forme de bombements plus ou moins végétalisés. Des lignes de végétation (landes à éricacées, fougère-aigle) se poursuivent presque en bas de pente sans qu'aucun affleurement ne soit suspecté. Dans la partie sud une légère dépression traverse le pierrier. Elle s'apparente à une tête de talweg dans la partie haute du pierrier puis un axe plus resserré souligné par une ligne de fougère (Figure 1). L'épaisseur du

Le recoupement des techniques géophysiques donne le modèle suivant :

Un pierrier d'une épaisseur de 1 à 4 m, constitué d'un horizon superficiel propre (enchevêtrement de blocs) surmontant un horizon colmaté par des éléments fins. Ces derniers sont associés à un phénomène de « crible » résultant de l'export vertical et latéral d'éléments fins depuis la surface. Le contact avec les quartzites très fracturés (épaisseur estimée à 10 à 15 m) se fait graduellement. Le pierrier est plus épais en bas de pente et le contact avec les alluvions est constaté au niveau de la rivière. Les observations de surface (convexité à mi pente, affleurements, talweg) sont confirmées par des variations de résistivité et vitesse sismique.

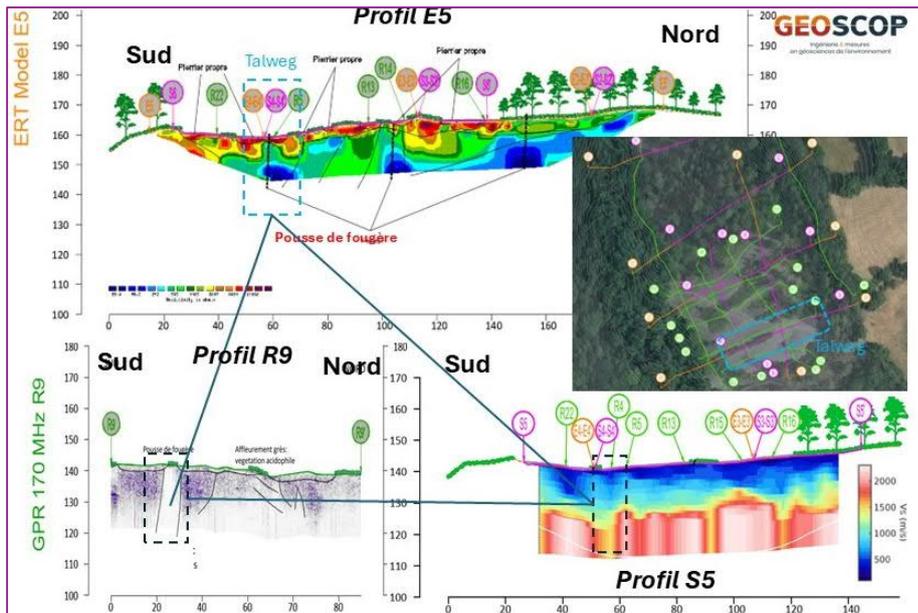


Figure 2 : En haut, tomographie électrique protocole WS 2m inter-électrode. Inversion forcée sous Res2Dinv avec profil de rocher obtenu par sismique réfraction ; En-bas: radar monostatique antenne 170MHz impulse Cross-over ; Sismique, 5m intertrace MASW traitement Multi window weighted stacking of Surface Waves

L'axe du talweg et la ligne de fougère peuvent être appréhendés par le profil radar R9 qui y présente une faible pénétration. Elle pourrait être attribuée à la présence d'éléments fins associés à une succession de failles N40 également visibles sur les profils électrique E5 et sismique S5.

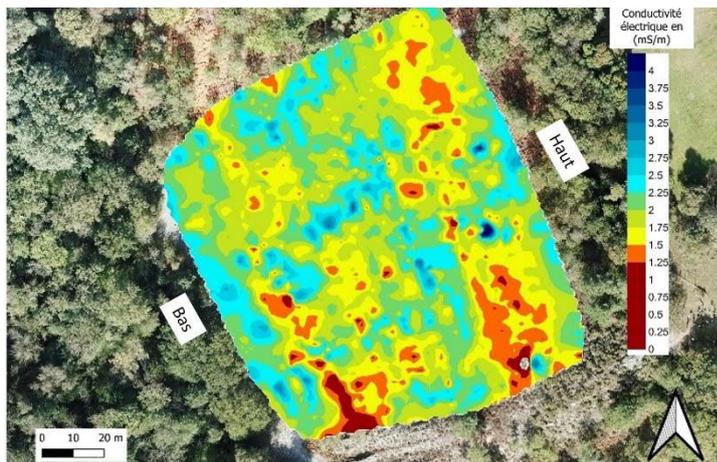


Figure 3 Carte électromagnétique PRP3 avec pente de 30° eq DOI=2m

zones de moindre résistivité à quelques exceptions près : partie haute nord-est du pierrier, partie basse (notamment au droit de la ligne de fougère). Concernant les affleurements plus ou moins végétalisés, la relation est moins évidente. Une grande partie amont des affleurements est très résistante, puis en fin d'affleurement (à l'approche de convexité) beaucoup moins et ceci indépendamment de la végétation présente. La partie haute de pierriers avec les résistivités moyennes pourrait correspondre à une zone plus fracturée surmontée d'un pierrier totalement colmaté et une pédogenèse développée. En pied de pente, les zones plus conductrices devraient correspondre à des alluvions recouvertes par le pierrier et soumis aux fluctuations d'une nappe alluviale.

DISCUSSION

La superposition cartographique géophysique/végétation offre une perspective dans l'évolution spatiale de la dynamique de végétation. Les zones de pierrier nu à forte résistivité devraient être moins sujettes à un développement de la végétation vasculaire. Sur les zones végétalisées résistantes (affleurement et pierriers), la restauration du pierrier peut être expérimentée (plus complexe sur les fougères qui se développent à partir d'un rhizome). A contrario, sur les zones de faible résistivité, on

Les zones de conductivité superficielles les plus faibles de 0 à 2 mS/m s'observent dans les zones de pierriers nus et pour partie sur les affleurements de grès. Les zones de conductivités les plus fortes : 2.5 à 3.5 mS/m en moyenne sont mesurées au niveau des patches de végétation mais également en bas de pierrier.

Dynamique de végétation

La superposition des cartes EM et formation végétales / affleurements (figure 4) indique que la répartition de la végétation est corrélée aux

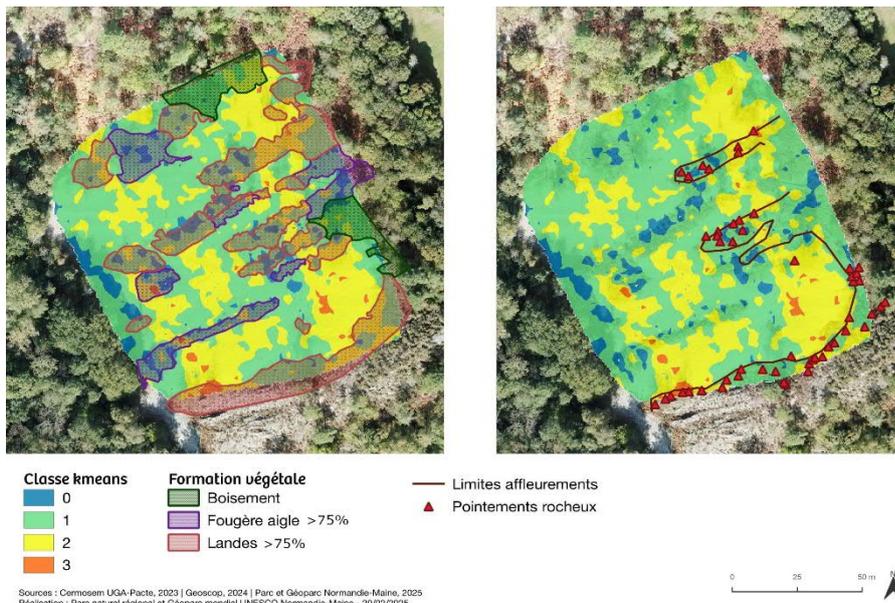


Figure 4 : Superposition entre la carte des classes obtenues par classification Kmeans sur la conductivité PRP3 et les observations visuelles réalisées sur le pierrier

proposera de restaurer ou conserver un habitat de landes à éricacées. Enfin, sur les zones boisées au nord du site, les zones de forte résistivité seront les plus propices pour restaurer une continuité entre pierriers nus.

CONCLUSION

L'imagerie géophysique permet d'améliorer la connaissance sur le pierrier dans les trois dimensions et de donner des éléments de réponse à la colonisation de la

végétation vasculaire et à sa dynamique. Elle peut permettre une aide à la décision dans la répartition spatiale des choix de gestion. Elle a également une valeur de perspective en cartographiant des zones de pierriers nus à faible résistivité où la probabilité de végétalisation peut être forte et a contrario des zones de forte résistivité où la probabilité de colonisation est plus faible.

Une étude diachronique d'images aériennes pourra être envisagée pour affiner la localisation des zones pouvant être restaurées. L'acquisition d'imagerie géophysique pourrait également être répliquée sur d'autres pierriers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUBRON I., PORTAL C., 2013 – Le Parc naturel régional Normandie-Maine et la reconnaissance des patrimoines géologique et géomorphologique. In : les nouveaux patrimoines en Pays de la Loire, pages 269 – 283.
- BCG, 2017 – Pierrier de la forêt d'Ecouvès, Landes de Goulte. Prospection géophysique sur un pierriers. PNR Normandie-Maine, 12 pages.
- DI GIUSEPPE M-G, et al, 2014- k-Means clustering as tool for multivariate geophysical data analysis. An application to shallow fault zone imaging. In : J. of app. geophysics Vol. 101, Feb. 2014, P. 108-115
- GAROFALO F., SAUVIN G., SOCCO L.V., LECOMTE I., 2015 - Joint inversion of seismic and electric data applied to 2D media. In: GEOPHYSICS, vol. 80 n. 4, EN93-EN104. - ISSN 0016-8033
- GOUEZ J.M., PERROS M., THOMAS M., WACQUIER L., 2024 – Imagerie géophysique multiméthode du pierrier de la vallée de Misère. GEOSCOOP pour le compte du Département de la Sarthe, 35 pages.
- HASCOUET C., 1995 – Etude géomorphologique des versants quartzitiques à blocs aux confins du Maine. Institut de géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes, 141 pages.
- PASQUET S., et al, 2021 - Multiwindow weighted stacking of surface-wave dispersion. In: *Geophysics* vol. 86.2, EN39-EN50.
- PORTAL C., AUBRON I., à paraître en 2025 - The Alpes mancelles : Geomorphological, cultural and ecological evolutions of a low-altitude Atlantic 'mountain', in Landscapes and Landforms of France,

APPORT DE LA GEOPHYSIQUE A LA DELIMITATION DES ZONES DE PLANTATION SUR UN NOUVEAU TERROIR VITICOLE, EXEMPLE EN NORMANDIE

ADELINET M.^{1,4}, ROHMER F.², HUBERT M.⁴, LE GOUEE P.³

¹ IFP SCHOOL, IFPEN, Rueil-Malmaison, France, mathilde.adelinet@ifpen.fr

² GEOREVA, Cintré, France, franz.rohmer@georeva.eu

³ Université de Caen, Caen, France, patrick.legouee@unicaen.fr

⁴ SCEA KAYAS, Saint-Sylvestre-de-Cormeilles, France, kayaswine@gmail.com

RESUME

On s'intéresse ici à l'apport de mesures géophysiques, en complément d'études de terrain et de sol, pour la délimitation de zones de plantation de vignes sur une parcelle sans passé viticole localisée dans le Lieuvin (Eure, Normandie). Le sous-sol est formé par la craie Crétacé et une formation résiduelle à silex au-dessus. Les profils de tomographie électrique nous ont servi à délimiter l'interface sol – roche mère et à préciser la texture du sol. La cartographie électro-magnétique a permis d'identifier des zones conductrices, plus riches en argile, et donc moins intéressantes pour l'implantation des vignes.

Mots clés : EM, ERT, Sol, Viticulture

ABSTRACT

Value of geophysical tools is highlighted for defining the boundaries of a new vineyard planting zone, in addition to field and soil studies. The study plot is in the Lieuvin, Normandy. The subsurface consists of Cretaceous chalk with a residual chert formation above. Electrical tomography profiles are used to delineate the soil - bedrock interface. Electromagnetic mapping identifies conductive areas that are richer in clay and therefore less suitable for vineyard planting.

Key words: EM, ERT, soil, vineyard

INTRODUCTION

La géophysique est classiquement utilisée en viticulture de précision, dans des vignobles déjà en place, afin de cartographier précisément les terroirs parcellaires [André et al., 2010 ; Martini et al., 2013 ; Meyers et al., 2018]. Les méthodes communément employées sont les méthodes électromagnétiques, électriques et RADAR. L'objectif recherché est d'augmenter la qualité de la maturité des baies de raisin en identifiant les zones les plus favorables en fonction de la disponibilité de l'eau du sol, de la température de celui-ci et de sa teneur en azote [Van Leewen et al., 2024]. Les méthodes géophysiques de proche surface peuvent également être utilisées dans les vignobles pour caractériser les zones endommagées par le travail mécanique du sol du fait du passage d'engins motorisés lourds entre les rangs [Lopane, 2024].

Nous nous proposons ici d'utiliser certaines de ces méthodes pour un autre objectif, celle de localiser les zones favorables à la plantation d'un nouveau vignoble. En effet, depuis l'assouplissement des règles de plantation en 2016, de nouvelles régions françaises se ré-ouvrent à la viticulture [Reux, 2023]. Dans ce contexte, la géophysique peut être un outil très intéressant, en complément d'autres méthodes classiques telles que les analyses et fosses pédologiques, pour caractériser ces nouveaux terroirs et affiner le choix des zones de plantation. On se propose ici de mettre en évidence cet apport sur une parcelle normande identifiée pour être plantée en vignes dans les années à venir.

SITE D'ETUDE

Le site d'étude est une parcelle de 4.4 Ha localisée dans le département de l'Eure sur la commune de Saint-Sylvestre-de-Cormeilles. Il s'agit d'un coteau orienté vers le Sud, partiellement planté en verger à pommes (figure 1 – a), proche de la confluence entre 2 cours d'eau, l'Angerville et la Calonne. Le modèle numérique de terrain fourni par l'IGN (RGE-ALTI résolution 1 m) est un outil intéressant pour caractériser la topographie de la zone, notamment en calculant les pentes à partir des altitudes (figure 1 – b). La parcelle se subdivise en 3 zones du haut vers le bas : une partie sommitale avec des pentes faibles (altitude moyenne 140 m), une première rupture de pente permettant d'accéder à une partie centrale légèrement moins pentue et une seconde rupture de pente formant le bas de la parcelle, avec les pentes les plus importantes. Les ruptures de pente correspondent aux changements de lithologie en profondeur. En effet, d'après la carte géologique harmonisée au 1/50000^e du BRGM, le sous-sol géologique de la parcelle est composé de 3 lithologies principales, du bas vers le haut (figure 1 – c) : la craie Cénonmanienne (base du Crétacé Supérieur, 100 Ma environ) ici riche en glauconie et en silex gris et noirs, la craie Turonienne (2^e étage du Crétacé Supérieur, 90 Ma environ) marneuse et pauvre en silex et enfin une formation résiduelle à silex comprenant argiles et sables. Cette dernière se retrouve très probablement sous forme de colluvions sur les pentes.

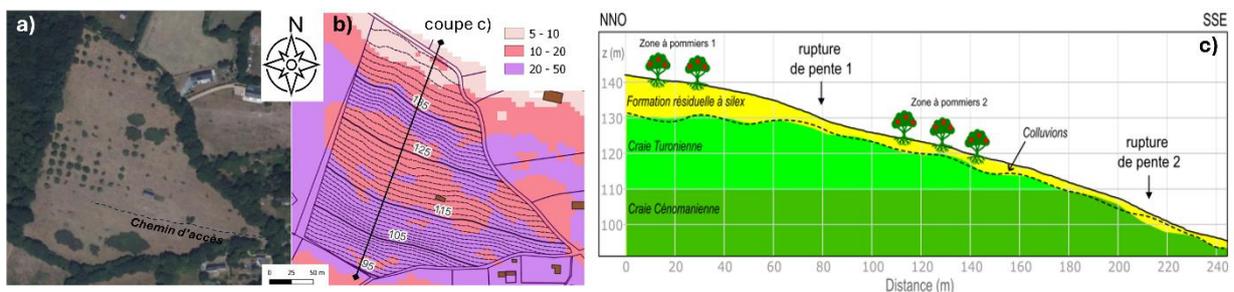


Fig. 1 – Site d'étude, commune de St Sylvestre de Cormeilles, Eure (27). a) Photo aérienne IGN de 2023. b) Modèle Numérique de Terrain (IGN RGE Alti 1 m). c) profil topographique NNO-SSE et coupe géologique interprétée à partir de la carte BRGM 1/50000^e et des observations terrain.

Ce découpage géologique incite à vouloir définir trois terroirs « lithologiques » sur la parcelle, les faciès crayeux du Turonien et du Cénonmanien étant notamment reconnus comme qualitatifs dans certains terroirs champenois et ligériens. Le réseau racinaire de la vigne s'implantant majoritairement dans les 2-3 premiers mètres du sol, il semble important de vérifier si les données pédologiques sont en accord avec les données géologiques. Sur le référentiel régional réalisé en 2016, la parcelle appartient à l'Unité Constitutive du Sol n°120 à savoir « Sols forestiers, peu à moyennement profonds, limono-argilo-sableux ou limono-sableux, parfois calcaires, généralement caillouteux, sur argiles à silex colluvionnées, des versants à pente forte du Lieuvin ». Pour préciser, nous avons réalisé 2 prélèvements de sol : l'un en partie haute de la parcelle et l'autre dans la zone basse. L'analyse granulométrique indique une structure limon-sableuse dans la partie haute et limono-sablo-argileuse dans la partie basse. Les 2 sols révèlent un pH très acide (respectivement 5.0 et 5.6 pour le haut et le bas de la parcelle), une forte teneur en matière organique (respectivement 3.5 et 6.7 %) et aucune teneur en carbonate. Il s'avère donc que les sols sont acides, même dans la zone basse où la craie domine le sous-sol, probablement en lien avec la teneur en silex et en argile de décalcification.

INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES

Il est important de noter que toutes les acquisitions géophysiques ont été faites sur la parcelle dans son état initial, *i.e.* sans préparation du sol, avec prairie et verger.

En octobre 2023, six profils électriques ont été acquis sur la parcelle : 4 parallèles aux lignes de niveau et 2 dans la pente (Figure 2). Le dispositif utilisé est un résistimètre 4-point light avec 24 électrodes espacées de 2 mètres, le protocole d'acquisition est un Wenner-Schlumberger. L'inversion a été réalisée avec le code Pygimli et les paramètres d'inversion suivants :

Max Itérations	Max Profondeur	Max erreur absolue	Max erreur relative	Taille cellule max
12	10 m	5.10^{-5}	3 %	0.5 m ²

La figure 2 de gauche présente les résultats obtenus pour les profils parallèles aux lignes de niveau, numérotés de 1 à 4. Pour les profils 1 et 4 on note une première couche très résistante correspondant aux 2-3 premiers mètres du sol. Cette couche pourrait correspondre au sol et à la zone d'éboulis – colluvion riche en silex. Pour les profils 2 et 3, cette couche résistante est inexistante, les premiers mètres sont plutôt conducteurs, voire très conducteurs (profil 3). En-dessous on atteint probablement la roche mère, à savoir la formation résiduelle à silex pour le profil 1, la craie Turonienne pour les profils 2 et 3 et la craie Cénomaniennne pour le profil 4, en accord avec les résistivités connues pour ces faciès [Meire et al., 2019].

En complément de ces profils ERT, une cartographie électro-magnétique a été réalisée à la même période sur la parcelle à l'aide d'un EM38-4 permettant de mesurer le champ vertical en phase et en quadrature pour 4 profondeurs entre 0 et 1.50 m. La figure 2 de droite présente les résultats interpolés pour la conductivité apparente 3 (0-1.32 m). Les premiers décimètres du sol montrent une structure très résistante en haut de parcelle, des conductivités moyennes dans la partie médiane et basse de la parcelle. Une zone fortement conductrice apparaît vers la limite Turonien – Cenomanien, en accord avec le profil ERT n°3, et correspond au chemin d'accès de la parcelle probablement endommagée par le travail mécanique.

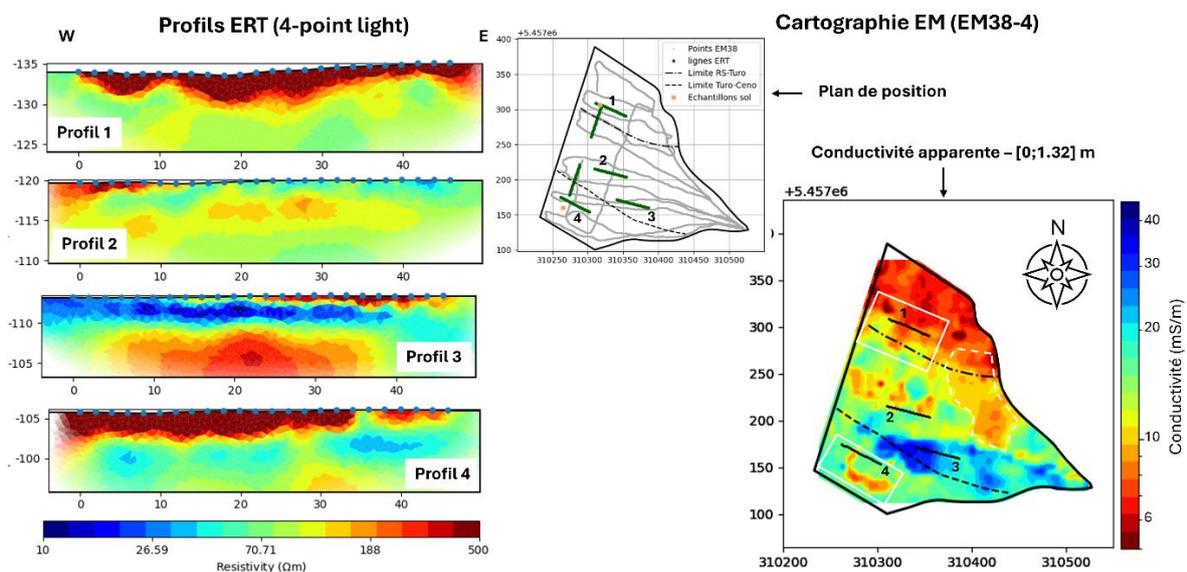


Fig. 2 – Résultats électriques et électro-magnétiques

DEFINITION DES ZONES DE PLANTATION

A l'aide des différents résultats obtenus sur la parcelle, une stratégie de plantation a été élaborée (Figure 3). La zone médiane de la parcelle, actuellement couverte par des pommiers ne semble pas

être la partie la plus favorable à l'implantation de la vigne : le sol y est plus conducteur, la pente plus faible et il existe une concurrence avec les fruitiers.

A l'inverse, les zones hautes et basses présentent des avantages : une pente permettant le ruissellement de l'eau de pluie, un sol limono-sableux drainant, une structure résistante en surface indiquant un écoulement de l'eau efficace et une richesse en silex dans les premiers horizons du sol. En allant plus loin, la zone haute (Zone 1 sur la Figure 3) semble présenter moins de risques par rapport à la zone basse (Zone 2 sur la Figure 3). En effet, sa position topographique lui confère une probable meilleure ventilation, sa texture du sol est moins argileuse et elle est davantage éloignée de l'humidité provenant du réseau hydrographique en contre-bas. Enfin une 3^{ème} zone prometteuse reste à investiguer au Nord-Est du bâtiment.

Fig. 3 – Proposition de zones de plantation favorable pour la vigne



CONCLUSIONS

Cette étude permet de mettre en évidence l'intérêt des méthodes géophysiques de proche surface pour la prédiction des zones favorables à l'implantation d'un nouveau vignoble, notamment dans de nouvelles aires de plantation sur lesquelles peu de données empiriques existent. Par ailleurs, la mise en commun d'informations topographiques, géologiques, pédologiques et géophysiques semblent indispensables pour aboutir à une stratégie de plantation correcte.

En prolongation de cette étude, les choix des cépages et des porte-greffes adaptés à cette parcelle pourront se faire en fonction des analyses de sol et des zones de plantation déterminée grâce aux résultats géophysiques. Enfin, le suivi de la parcelle sur les premières années de vie des ceps sera indispensable pour corroborer ou non les hypothèses émises par l'étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LOPANE, N., ALBÉRI, M., BARBAGLI, A., ... & STRATI, V., 2024 – Geoelectric Joint Inversion for 3D Imaging of Vineyard Ground. *Agronomy*, vol. 14, no 11, p. 2489.

MARTINI, E., COMINA, C., PRIORI, S., & COSTANTINI, E. A. C., 2013 – A combined geophysical-pedological approach for precision viticulture in the Chianti hills. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(2).

MEIRE, B., PORTAL, A., JACOB, T., PAQUET, F., BITRI, A., MATHIEU, F. & DAVID, P.Y., 2019 – Fonctionnement de l'hydrosystème, interactions et cheminements des eaux naturelles et de la n-nitrosomorpholine dans le secteur de la faille de Lillebonne-Fécamp (76) – Volet géologique et géophysique. *Rapport BRGM/RP-67087-FR*.

REUX, J., 2023 – Vignobles émergents. Le nouvel horizon du vin français. *Revue du vin de France*, no 670, p. 38-44.

VAN LEEUWEN, C., SCHMUTZ, M., & DE RESSEQUIER, L., 2024 – The contribution of near surface geophysics to measure soil related terroir factors in viticulture: A review. *Geoderma*, 449, 116983.

TRACEUR THERMIQUE POUR LA MODELISATION DE L'INTERFACE NAPPE RIVIERE

VITA CLINQUART^{1,2}, AGNES RIVIERE¹, NICOLAS RADIC¹, MAXIME GAUTIER¹, LUDOVIC BODET², ALEXANDRINE GESRET¹, NICOLAS FLIPO¹, SYLVAIN PASQUET³, ROLLAND MARTIN⁴, DIDIER RENARD¹, ROMANE NESPOULET³, AURELIEN BAUDIN¹

¹CENTRE DE GÉOSCIENCES, MINES PARIS – PSL, Fontainebleau, France

²UMR METIS, Sorbonne Université, Paris, France

³OSU ECCE TERRA, Sorbonne Université, Paris, France

⁴GET OSU OMP, Université de Toulouse, Toulouse, France

vita.clinquart@minesparis.psl.eu agnes.riviere@minesparis.psl.eu nicolas.radic@minesparis.psl.eu
maxime.gautier@minesparis.psl.eu alexandrine.gesret@minesparis.psl.eu nicolas.flipo@minesparis.psl.eu
didier.renard@minesparis.psl.eu aurelien.baudin@minesparis.psl.eu ludovic.bodet@sorbonne-universite.fr
sylvain.pasquet@sorbonne-universite.fr romane.nespoulet@sorbonne-universite.fr
roland.martin@get.omp.eu

RESUME

Caractériser et quantifier les processus d'échange nappe-rivière est primordial pour la gestion durable de la ressource en eau et des écosystèmes liés. La température est un facteur clé pour les écosystèmes et la qualité des eaux. L'utilisation de la chaleur comme traceur permet de modéliser ces processus de la zone critique par l'inversion de données thermiques et piézométriques. Les données haute fréquence inhérentes à cette étude ont été recueillies sur cinq sections d'interface nappe-rivière du bassin de l'Orgeval sur dix ans.

Mots clés : interface nappe-rivière, chaleur comme traceur, données haute fréquence, modèle numérique, inversion

ABSTRACT

Characterizing and quantifying groundwater-river exchange processes is essential for the sustainable management of water resources and related ecosystems. The temperature is a key factor for the ecosystem and water quality. Using heat as a tracer enables the modeling of these processes in the critical zone through the inversion of thermal and piezometric data. The high-frequency data inherent to this study were collected over ten years from five groundwater-river interface sections in the Orgeval basin.

Key words: stream-aquifer interface, heat as a tracer, high frequency data, numerical model, inversion

INTRODUCTION

En interagissant avec les masses d'eau de surface, les eaux souterraines influencent le bilan hydrique des hydrosystèmes (Krause et Bronstert, 2007), les étiages saisonniers et le transfert des contaminants. Associés aux flux de chaleur, les flux d'eau conditionnent également une multitude de processus chimiques et écologiques, tels que les taux de dénitrification (Harvey et al., 2013 ; Newcomer et al., 2018), les zones de refuge pour les espèces aquatiques (Brunke et Gonser, 1997; Marmonier et al., 2012), et jouent un rôle essentiel dans le maintien de la qualité des eaux de surface. Le changement climatique en cours réchauffe la subsurface en modifiant les régimes thermiques du sous-sol (Benz et al. 2024) et des rivières (Rivière et al. 2023).

Le sujet principal de cette étude est la caractérisation des régimes thermiques des aquifères, de la rivière et de l'interface nappe-rivière sur l'observatoire de la zone critique du bassin de l'Orgeval avec les changements globaux en cours. Quantifier avec précision les flux d'eau et d'énergie entre la surface et le sous-sol est un défi en raison de la multitude de facteurs morphologiques et physiques soumis à une variabilité spatiale et temporelle (Tonina et Buffington, 2009 ; Peralta-Maraver et al., 2018). L'utilisation de la chaleur comme traceur est bien établie en raison du coût relativement faible des capteurs de température et de leur facilité de déploiement (Lapham, 1989 ;

Anderson, 2005 ; Constantz, 2008; Kurylyk et al., 2019). Cette approche est facilitée par la différence de dynamique de la température de l'eau de la rivière et celle des aquifères.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites d'études

L'observatoire de la zone critique de l'Orgeval (46 km²) est situé à 70 km à l'est de Paris. Cet observatoire est suivi depuis les années 1960 pour les données météorologiques et les débits de rivières. Il est constitué d'un système aquifère multicouche composé de deux aquifères calcaires : l'aquifère de la Brie (Oligocène) et l'aquifère de Champigny (Éocène), séparés par un aquitard argileux. La rivière, sinueuse et peu profonde, est connectée à l'aquifère de la Brie dans sa partie amont et l'aquifère de Champigny dans sa partie aval.

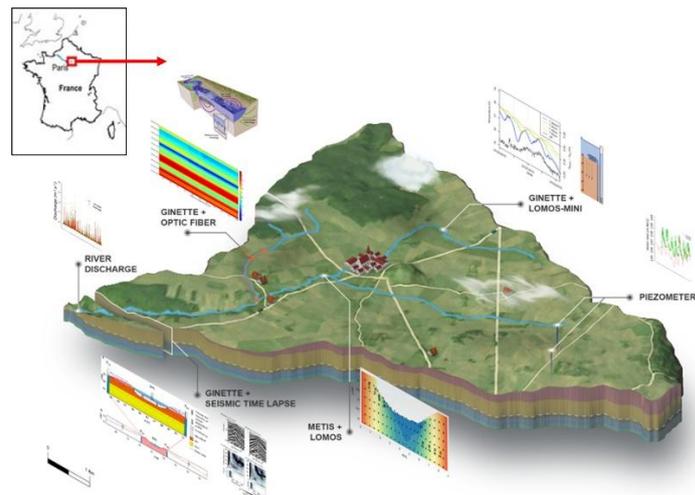


Fig. 1: Localisation et schémas des différentes mesures déjà effectuées de l'observatoire de la zone critique de l'Orgeval.

Depuis 2012, des stations de mesures des échanges nappe-rivières basées sur l'utilisation de la chaleur comme traceur sont déployées le long du réseau hydrographique (Fig. 1, amont, intermédiaire et aval, Mouhri et al., 2013). Les stations sont constituées d'un ou deux piézomètres (Fig. 2.a) peu profonds pour mesurer la température et les variations de charge hydraulique dans les aquifères, de deux profils de température dans le lit de la rivière, et d'un capteur enregistrant le niveau d'eau et de la température dans la rivière. Les sondes de pression et de température possèdent une précision de $\pm 0,5$ cm pour le niveau d'eau et de $0,02$ °C pour la température. Les profils de température dans le lit de la rivière sont équipés de quatre capteurs Pt100 espacés de $0,1$ à $0,2$ m, avec une précision de $\pm 0,2$ °C. Toutes les données sont enregistrées avec un intervalle de 15 minutes (Fig. 2.b)

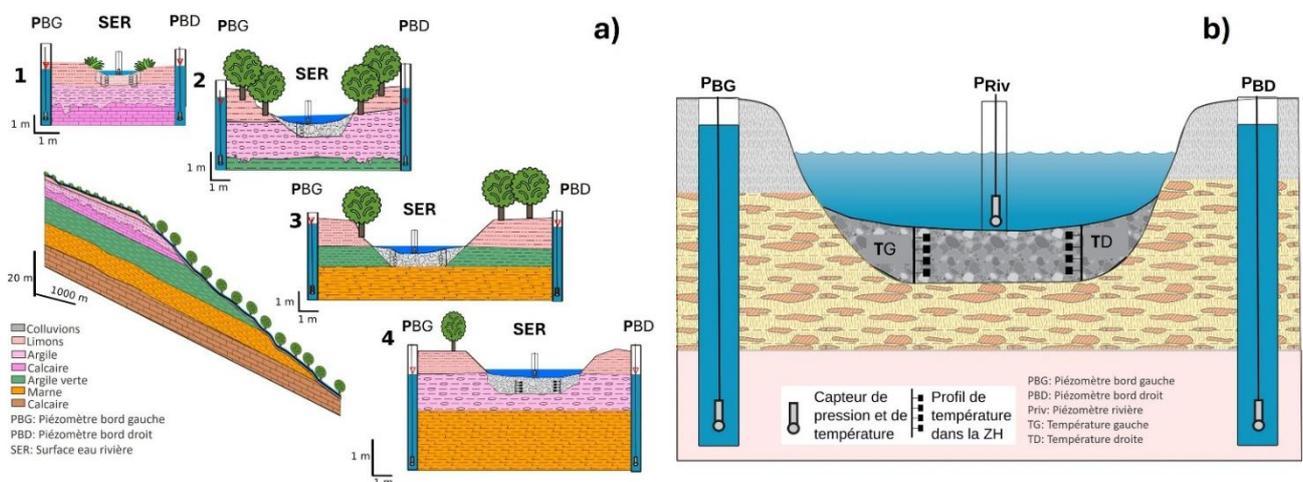


Fig. 2: Présentation des stations d'échange nappe-rivière : a) répartition sur l'observatoire et description des faciès et b) Description des stations de mesures : PBG piézomètre rive gauche, PBD piézomètre rive droite, SER : mesure en rivière, TG : profil de température gauche. TD profil de température droite.

Modélisation par inversion

Le modèle hydrothermique 'GINETTE' (Rivière, et al, 2014, 2019, 2020) est utilisé pour déterminer par inversion les propriétés hydrothermiques et pour quantifier les échanges entre le cours d'eau et l'aquifère à l'échelle locale. Les sections modélisées ont une largeur qui varie entre 4 et 13.2m et une profondeur qui varie entre 3 et 5m. La géométrie et les différents faciès ont été définis grâce à des logs de forage et aux mesures géophysiques réalisées lors de l'installation des stations (Mouhri et al., 2013). Le nombre de couches des modèles est de l'ordre de quatre couches par section. La résolution du maillage des modèles varie entre 5 et 20 cm pour les différentes couches géologiques avec une résolution plus fine du maillage dans le lit de la rivière qui varie entre 1 et 2 cm. Les conditions aux limites imposées pour chaque section sont :

- À la surface : la température mesurée en rivière, un flux nul en écoulement pour l'interface air-sol et la hauteur d'eau mesurée en rivière pour le lit de la rivière,
- Sur les bords latéraux : la température et la charge mesurée dans les piézomètres de bordures,
- À la limite inférieure : un flux nul en écoulement et en thermique.

Différents paramètres hydrothermiques ont été appliqués pour chaque couche. Une fois que les modèles sont calibrés, des simulations en régimes hydraulique et thermique transitoires pour toutes les sections pendant la période (2012-2025) seront réalisées afin de quantifier les flux d'eau et de chaleur locaux à l'interface nappe-rivière. Un script de grid search a été développé et couplé avec le modèle hydro-thermique afin de déterminer la combinaison des paramètres optimale permettant au modèle de reproduire les variations des profils de températures à différentes profondeurs dans le lit de la rivière. Les paramètres hydrothermiques à calibrer sont : la Conductivité hydraulique (k , $m.s^{-1}$), la porosité (ω) et la conductivité thermique du milieu poreux (λ , $J.m^{-3}.K^{-1}$).

RESULTATS PRELIMINAIRES

Analyse des régimes annuels des eaux souterraines et de surfaces sur 13 années

La température journalière de la rivière, au droit des 4 stations, indique des variabilités élevées (8°C en période estivale). Des variations saisonnières importantes sont également observées avec des maximums de 26°C en période chaude (juillet-août) et des minima de 1°C en période froide (janvier).

Modèle

Une première étape de calibration a été réalisée sur la station 2. Les résultats de la calibration ont permis de reproduire les profils de températures à différentes profondeurs de la zone hyporhéique avec des critères statistiques satisfaisants. Les RMSE globales varient entre 0.1 et 0.8°C, et les coefficients de corrélation entre 0.89 et 0.99. Les modèles ont été calibrés en périodes d'infiltration et validés en périodes d'exfiltration (Fig. 3).

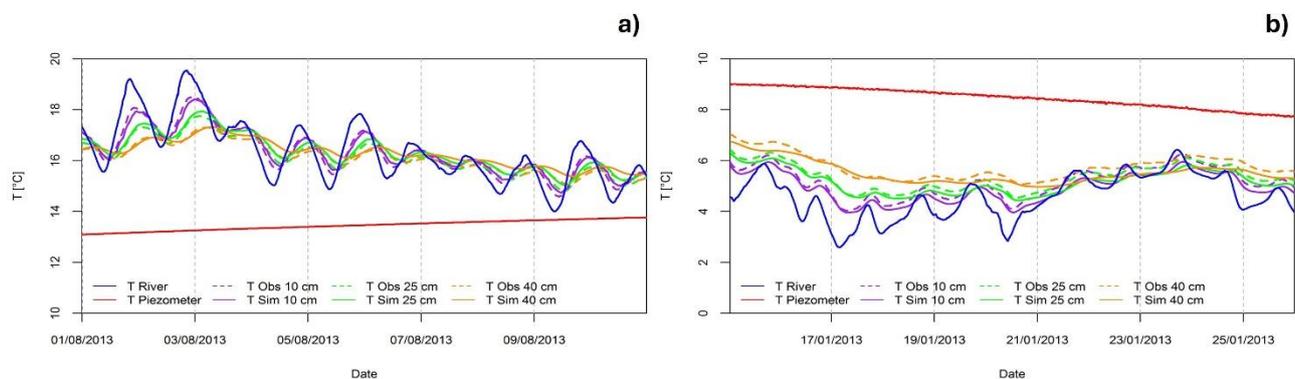


Fig. 3: Comparaison entre les températures simulées (trait continu) et les températures observées (trait pointillé) à différentes profondeurs de la section 2 : a) Calibration dans le cas d'une infiltration et b) Validation dans le cas d'une exfiltration

Les simulations reproduisent de manière satisfaisante les fluctuations journalières ainsi que les variabilités saisonnières des températures à différentes profondeur (Fig. 3).

PERSPECTIVES

La variabilité spatio-temporelle de la dynamique des échanges d'eau et de chaleur à l'interface nappe-rivière sera étudiée dans ce projet. Des stations déployées dans notre zone d'étude permettront de recueillir des données qui serviront à construire un modèle de transport d'eau et de chaleur 2D couplé à un script d'inversion afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques et thermiques. Le jeu de données fourni par les stations permettra de contraindre les modèles 2D au droit de chaque section étudiée afin de quantifier les flux d'eau et de chaleur pendant la période 2012-2025. La quantification des flux conductif et advectif fournira un nouvel éclairage des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines. La sensibilité des facteurs tels que le sens des écoulements nappe-rivière, la valeur des paramètres hydrothermiques et les conditions météorologiques seront quantifiées grâce à des tests de sobols.

L'analyse des données récoltées sur les stations entre 2012 et 2025 nous permet d'observer que le régime thermique des cours d'eau est influencé directement par la température de l'air. La variation de température des cours d'eau montre ainsi des fluctuations journalières et saisonnières avec des maximums au mois de juillet et des minima en janvier. La température des nappes est stable de l'ordre de 11°C avec des fluctuations de $\pm 0.3^\circ\text{C}$. Elle augmente légèrement de septembre à mars et diminue de mars à août suggérant une lente diffusion de la température de l'air jusqu'à la nappe et un taux d'infiltration faible.

Afin de renforcer la robustesse des modèles locaux, la calibration par inversion est réalisée en contexte d'infiltration et les modèles seront ensuite validés en contexte d'exfiltration. Les chroniques sur toute la période (2012-2025) permettront de valider la robustesse de notre méthodologie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- KRAUSE S., & BRONSTERT A., 2007** - The impact of groundwater–surface water interactions on the water balance of a mesoscale lowland river catchment in northeastern Germany. *Hydrological Processes*, 169 – 184.
- HARVEY J. W., J. K. BÖHLKE, M. A. VOYTEK, D. SCOTT, AND C. R. TOBIAS, 2013** - Hyporheic zone denitrification: Controls on effective reaction depth and contribution to whole-stream mass balance. *Water Resources Research*, (49), 6298–6316.
- NEWCOMER, M. E., HUBBARD, S. S., FLECKENSTEIN, J. H., MAIER, U., SCHMIDT, C., THULLNER, M., ET AL. 2018** - Influence of hydrological perturbations and riverbed sediment characteristics on hyporheic zone respiration of CO₂ and N₂. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, (123), 902–922.
- BRUNKE M., ET GONSER T., 1997** - The Ecological Significance of Exchange Processes Between Rivers and Groundwater. *Freshwater Biology* (37), 1-33.
- MARMONIER P., ARCHAMBAUD G., BELAIDI N., BOUGON N., BREIL P., CHAUVET E., CLARET C., CORNUT J., DATRY T., DOLE-OLIVIER M.-J., DUMONT B., FLIPO N., FOULQUIER A., GÉRINO M., GUILPART A., JULIEN F., & al., 2012** - The role of organisms in hyporheic processes: gaps in current knowledge, needs for future research and applications. *International Journal of Limnology* (48), 253-256.
- BENZ, S., IRVINE, J., RAU, G., BAYER, P., MENBERG, K., BLUM, P., JAMIESON, R., GRIEBLER, C., KURYLYK., 2024** - Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience.*, 17. 10.1038.
- TONINA, D. & BUFFINGTON, J., 2009**- Hyporheic Exchange in Mountain Rivers I: Mechanics and Environmental Effects. *Geography Compass* (3), 1063 – 1086.
- PERALTA-MARAVER I., REISS J., ROBERTSON A.L., 2018**- Interplay of hydrology, community ecology and pollutant attenuation in the hyporheic zone. *Science of The Total Environment*, (610-611), 267-275.
- LAPHAM, W., 1989** - Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. *U.S. Geological Survey* (2337).
- ANDERSON, M., 2005** - Heat as a Ground Water Tracer. *Ground water*, (43), 951-68.
- CONSTANTZ, J., 2008** - Heat as a Tracer to Determine Streambed Water Exchanges. *Water Resour*, (44), 0-10.
- KURYLYK, B.L. & IRVINE, D.J., 2019** - Heat: An Overlooked Tool in the Practicing Hydrogeologist's Toolbox. *Groundwater*, (57), 517-524.
- BOIS, P., BEISEL, J.N., CAIRAULT, A., FLIPO, N., LEPRINCE, C., RIVIÈRE, A., 2023** - Water temperature dynamics in a headwater forest stream: Contrasting climatic, anthropic and geological conditions create thermal mosaic of aquatic habitats. *PLoS One*, (2), 15-18.
- RIVIÈRE, A., GONÇALVÈS, J., JOST, A., 2020: GINETTE-2020-09 (VERSION 2020-09). ZENODO.**
[HTTP://DOI.ORG/10.5281/ZENODO.4058821](http://doi.org/10.5281/ZENODO.4058821)
- MOUHRI, A., FLIPO, N., VITALE, Q., BODET, L., TALLEC, G., ANSART, P., REJIBA, F., 2013** - Influence du contexte hydrogéologique sur la connectivité nappe-rivière au niveau de la vallée incisée des Avenelles.

CARTOGRAPHIE DU SUBSTRATUM DE L'AQUIFERE DU HAUT DELTA DU MEKONG PAR METHODE TDEM

LUN Sambo¹, MASSUEL, S.^{2,4}, DESCLOITRES, M.^{3,4}, BOUCHER, M.³, VAN HANJA J.^{2,4}, BALZAN, M.²

¹ Institut de Technologie du Cambodge / IRD, Phnom Penh, Cambodge, sambo.lun@ird.fr

² UMR G-EAU - IRD, Université de Montpellier, Montpellier, France

³ IGE - IRD, Grenoble, France

⁴ LMI « CARE », Ho Chi Minh City, Vietnam.

RESUME

L'aquifère transfrontalier du haut delta du Mékong peu connu au Cambodge (11 000km²) entre dans une phase d'exploitation massive. Les niveaux de la nappe baissent et les puits s'assèchent. Évaluer la ressource disponible pour préparer des plans de gestion nécessite de mieux connaître la géométrie de l'aquifère. Cette étude présente une cartographie préliminaire de la profondeur du substratum résistant (> 1000 Ω.m) sur lequel reposent les alluvions quaternaires conducteurs (5-150 Ω.m), obtenue grâce à l'interprétation de 108 sondages TDEM (électromagnétisme en domaine temporel).

Mots clés : sondage TDEM ; géométrie des aquifères ; Ressource en eau ; Haut Delta du Mékong

Substratum mapping of the Upper Mekong Delta aquifer using the TDEM method

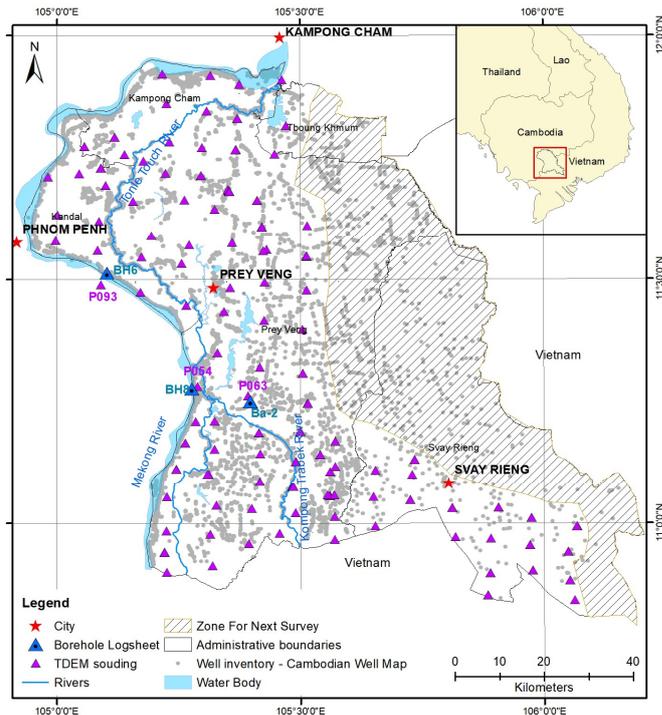
ABSTRACT

This little-known trans-boundary aquifer in Cambodia's upper Mekong delta (11,000km²) is entering a phase of massive exploitation. Groundwater levels are falling and wells are drying up. Assessing the available resource in order to prepare management plans requires a better understanding of the aquifer's geometry. This study presents a preliminary mapping of the depth of resistant bedrock (> 1000 Ω.m) underlain by conductive Quaternary alluvium (5-150 Ω.m), obtained by interpreting 108 TDEM (time-domain electromagnetic) boreholes.

Key words: TDEM survey; aquifer geometry; water resources; Upper Mekong Delta

INTRODUCTION

Le Cambodge est un pays agricole où environ 70% de la population sont des agriculteurs (NIS, 2021). Le recours à l'irrigation en saison sèche ou humide s'est développé de manière notable, passant de 5 % des surfaces de riz en 1997 à 20 % en 2015 (Thomas, 2018). Dans le delta du Mékong cambodgien, les agriculteurs dépendent des systèmes d'irrigation gouvernementaux qui extraient l'eau du Mékong et de ses affluents pour la saison des pluies et en partie pour un second cycle de riz. Ces systèmes d'irrigation puisent généralement leur eau dans les eaux de surface, mais les agriculteurs doivent aussi sécuriser leurs sources d'eau complémentaires. Ils ont ainsi foré des milliers de puits pour assurer le deuxième ou le troisième cycle de leurs cultures. Plus de 310 000 puits ont été recensés dans les provinces de Prey Veng et Svay Rieng en 2019 (WSP, 2019). Ces puits sont principalement exploités à des fins domestiques pour subvenir aux besoins de 2 millions de personnes (MRD, 2018) et pour irriguer partiellement les 420 000 ha de rizières (Fig. 1). Une étude menée par International Development Enterprises (IDE, 2009) a révélé que le niveau des eaux souterraines dans le delta du Mékong avait baissé de 0,14 m par an entre 1996 et 2008. En 2002, la JICA (Agence de Coopération Internationale Japonaise) a mené une étude détaillée sur l'évaluation des eaux souterraines dans la région. L'étude a révélé que les deux provinces avaient un potentiel d'exploitation des eaux souterraines de 500 et 800 m³/jour (JICA, 2002). Pour confirmer la disponibilité d'une telle ressource en vue d'une exploitation



durable, la réserve doit être mieux connue. Pour cela, les outils de modélisations hydrogéologiques doivent s'appuyer sur les propriétés hydrodynamiques mais aussi sur l'épaisseur de l'aquifère, dont le mur est ici constitué de roches granitiques. L'objectif de la présente étude géophysique est de reconnaître la profondeur du substratum. Nous avons évalué la méthode TDEM pour reconnaître l'épaisseur des sédiments conducteurs du haut delta. Nous évaluons ainsi la capacité de la méthode à déterminer la profondeur du substratum résistant, cible géophysique généralement réputée comme difficile pour cette méthode inductive.

Fig. 1 – Carte générale de la zone d'étude, position des sondages TDEM et des forages connus atteignant le substratum.

Matériel et méthode

Nous avons mis en œuvre la méthode électromagnétique en domaine temporel (TDEM), produisant des boucles de courants de Foucault pénétrant progressivement en profondeur en fonction du temps. Nous avons utilisé le « TEM-FAST 48 » d'AEMR technology (Pays-Bas) avec un dispositif de boucles coïncidentes carrées de 100x100 m² et 200x200 m². Le logiciel TEMRES a été utilisé, permettant l'élimination des données bruitées et la modélisation de l'effet de polarisation induite (IP) rencontré dans environ 25% des sites prospectés. Les sondages TDEM ont été effectués avec la stratégie de maintenir un intervalle d'environ 5 km entre les sondages, conformément à la variation attendue de la profondeur du substratum (Fig. 1). Chaque sondage a été interprété individuellement et ajusté avec un modèle à 3 ou 4 couches. Les inversions 1-D ont été réalisées sur la base d'un modèle de départ défini par l'utilisateur, imposant arbitrairement un substratum résistant à 2000 Ω.m comme couche ultime (Fig. 2). Lorsque qu'un effet IP est identifié (c'est-à-dire une série de 3 à 7 points négatifs à la fin de la courbe de sondage), nous avons mis en œuvre des boucles de 200x200 m² moins affectées par l'IP. Les données ont été interprétées avec et sans IP et la profondeur jusqu'au substratum n'a été validée que si la différence reste dans une fourchette de variation de 15-20%.

Résultats et discussion

De juin 2024 à Février 2025, 108 sondages TDEM ont été réalisés (Fig. 1). Pour 43 sondages, la réponse substratum n'était pas présente sur les données, et nous avons donc estimé la profondeur minimale d'un substratum résistant en modélisant un terrain fictif profond et en le rapprochant de la surface jusqu'à produire une courbe synthétique s'éloignant des données de terrain.

La figure 2 présente un exemple d'interprétation de 3 sondages TDEM proches de forages dont le log lithologique atteint le substratum. La profondeur du substratum estimée par TDEM est relativement proche de celle des forages (entre 5 et 7 m). La remontée des courbes de sondages TDEM marquant le substratum est très nette dans tous les cas. Les résistivités des sédiments varient entre 5 et 40 Ω.m, ce qui marque probablement des limons très fins et des proportions d'argile différente selon les sites. Notre étude n'évalue pas à ce stade ces différences possibles de lithologie.

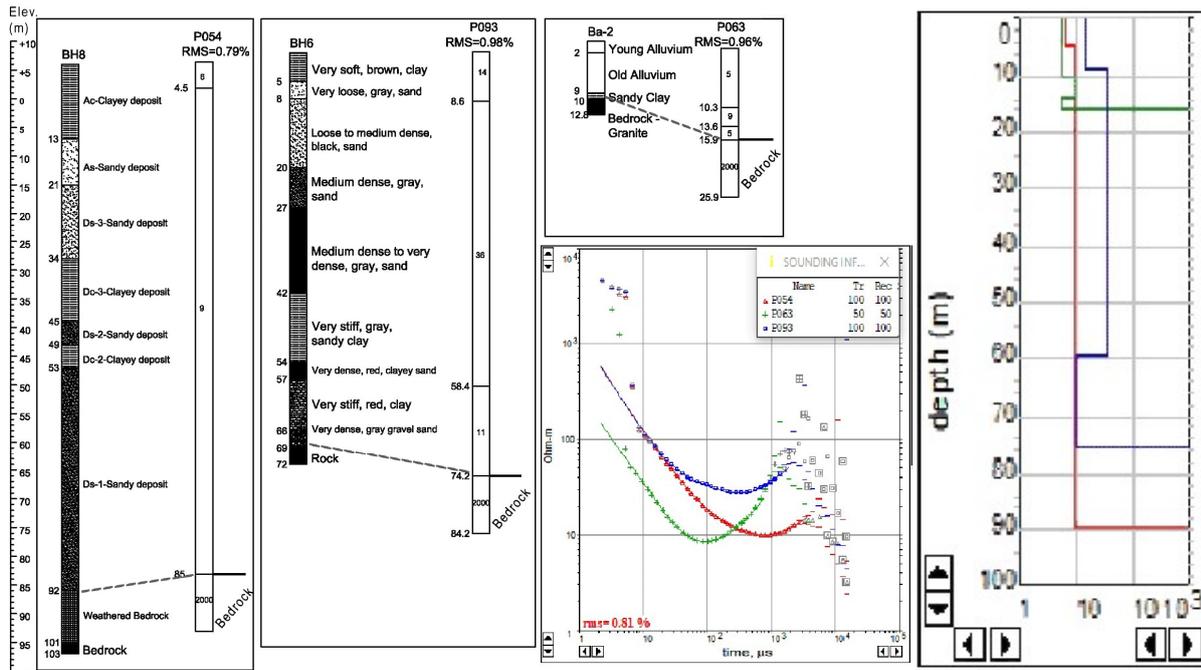


Fig. 2 – Exemple d’interprétation TDEM avec les informations de trois forages montrant le substratum.

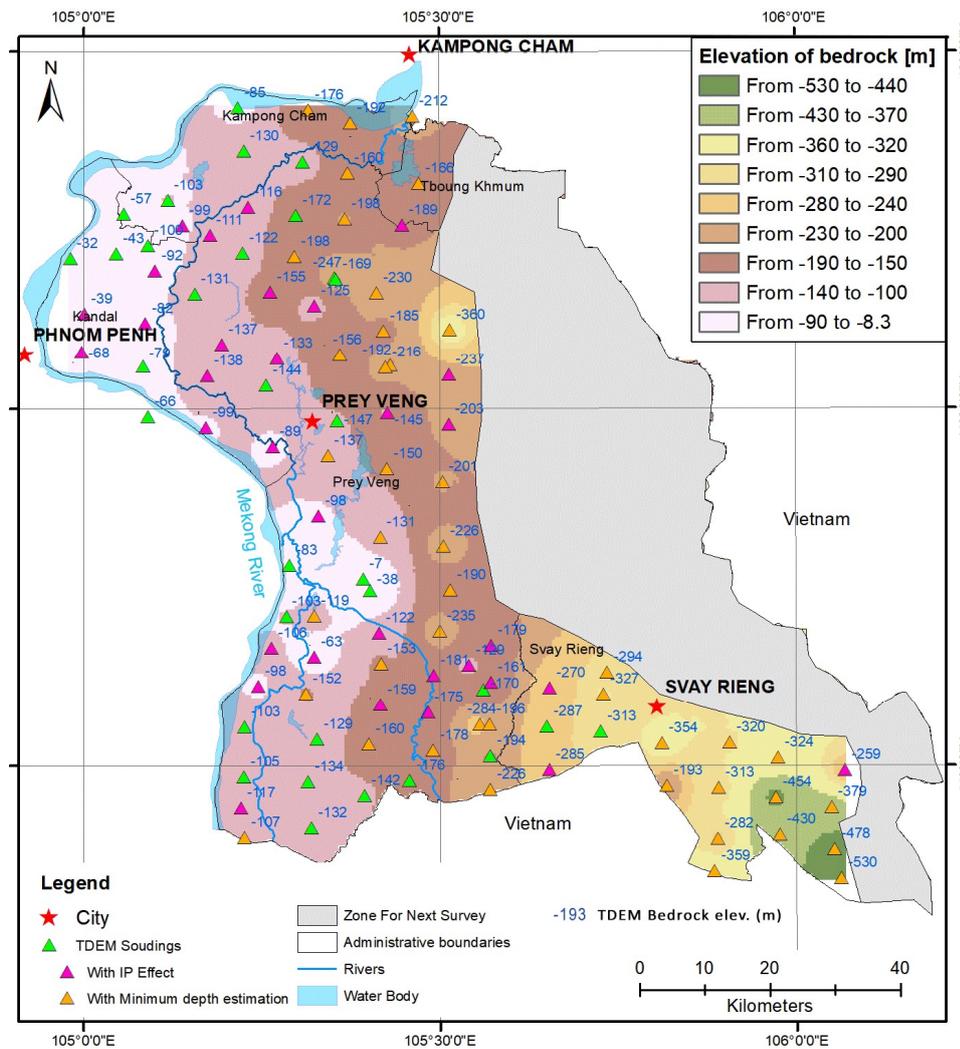


Fig. 3 – Carte préliminaire de l’altitude du substratum résistant interpolé entre les sondages TDEM. Les points TDEM où un effet IP a été reconnu sont indiqués (triangles roses). Sur ces points une incertitude de l’ordre de 20 % sur la valeur de la profondeur pourrait être observée. Les sondages TDEM pour lesquels seule une estimation de la profondeur minimale du substratum a été calculée sont aussi indiqués (triangles orange). C’est cette profondeur minimale qui est utilisée pour calculer les isoglines.

Sur la base des premières interprétations, nous proposons une carte préliminaire de la surface du substratum (Fig. 3) qui montre une certaine cohérence spatiale entre les valeurs interprétées. La distribution spatiale des profondeurs montre un approfondissement général du substratum vers l'est et le sud-est alors que nous nous attendions plutôt à un plongement vers le sud. Tenir compte de ces nouvelles données a un impact sur l'estimation des flux d'eau souterraine, avec des transmissivités potentiellement plus élevées lorsqu'on s'éloigne du lit du Mékong.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats préliminaires complètent les informations hydrogéologiques existantes. Le TDEM est bien adapté à la prospection des vastes étendues sans perturbation électromagnétiques et permet de détecter un socle jusqu'à plus de 300 m de profondeur dans des conditions favorables en utilisant de très grandes boucles coïncidentes de 200x200 m². Une incertitude sur l'estimation de la profondeur peut apparaître en cas d'effet IP, ou si les sédiments sont conducteurs (< 10 Ω.m) et le substratum profond (> 150m). L'utilisation de grandes boucles permet de réduire ces incertitudes.

Ces premiers résultats permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Il s'agira de réaliser un ou deux profils à maille de sondages plus serrée (1-2 km) pour contrôler si l'échantillonnage spatial actuel (5 km) est optimal ;
- Les données de résistivité des sédiments pourraient être utiles pour l'estimation des propriétés hydrodynamiques des aquifères et aquitards de la région ;
- L'utilisation de la Résonance Magnétique des Protons pourrait compléter ces données en vue d'une modélisation hydrogéologique ;
- L'utilisation de sondages audio-magnétotelluriques pourrait aussi être envisagée pour reconnaître le substratum résistant dans les zones où le TDEM a une profondeur d'investigation trop limitée.

Remerciements : Nous remercions les membres de la JEA 4C-Water, le Laboratoire Mixte International LMI CARE au Vietnam pour leur soutien pour les opérations de terrain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

International Development Enterprises (IDE), 2009 – Strategic study of groundwater resources in Prey Veng and Svay Rieng (phase 2), 23 pages.

Japan International Cooperation Agency (JICA), 2002 – The Study on Groundwater Development in Southern Cambodia – supporting report, Japan International Cooperation Agency, 703 pages.

Ministry of Rural Development (MRD), 2018 – Rural Development Strategy, Action Plan 2019 – 2023, 58 pages.

National Institute of Statistics (NIS), 2021 – General Population Census of the Kingdom of Cambodia 2019 – Final Results. Ministry of Planning, 304 pages.

RASMUSSEN C. et BRADFORD, G.M., 1977 – Ground-Water Resources of Cambodia, Geological Survey Water-Supply paper 1608-p, plate-3, 127 pages.

THOMAS, P., 2018 – Partnering for impact on sustainable development, Australian National University, Development bulletin 79.

Water and Sanitation Program (WSP), 2019 updated – Cambodian Well Map, <https://cambodiawellmap.com>

ETUDE DE LA DISPONIBILITE EN EAU D'UNE CHENAIE – HETRAIE PAR PROSPECTION ERT ET EMI DANS LA FORET DE HESSE (MOSELLE, FRANCE)

MONDON L.¹, CHAFFAUT Q.¹, JOUGNOT D.¹, PESSER M.², LOISEAU B.³, KEMPF J.⁴, DELPIERRE N.⁵, JOETZIER E.⁶, COURTOIS P.⁶, NAIKEN A.⁶, CUNTZ M.⁶, BERVEILLER D.⁵, MORFIN A.⁵, GIRARDIN C.⁵, GRASSET M.⁵, CARRIERE S.D.^{1,3}

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

² GEOPS, Université Paris-Saclay, CNRS, Orsay, 91400, France

³ HSM, IRD, 34000 Montpellier, France

⁴ CEFE, CNRS, 34000 Montpellier, France

⁵ ESE, Université Paris-Saclay, CNRS, 91190 Gif-sur-Yvette, 91400, France

⁵ UMR Silva, INRAe, 54280 Champenoux, France

RESUME

Entre juillet et décembre 2024, trois mesures de tomographie de résistivité électrique (ERT) ont été réalisées dans la forêt de Hesse en Moselle. Ces mesures ont permis de suivre l'assèchement estival puis la réhumectation du site. D'importantes différences latérales ont été observées dans ces dynamiques d'assèchement et ont pu être mises en relation avec les hétérogénéités texturales et les populations d'arbres présentes.

Mots clés : *Géophysique, écologie forestière, tomographie de résistivité électrique, zone racinaire*

ABSTRACT

Between July and December 2024, 3 electrical resistivity tomography (ERT) measurements have been carried out in the Hesse forest in Moselle. These measurements enabled the site to be followed through a period of general drying, followed by rehumidification. Significant lateral differences were observed in these drying dynamics and could be related to the textural heterogeneities and tree populations present.

Key words: *Geophysics, forest ecology, electrical resistivity tomography, root zone*

INTRODUCTION

La réserve en eau disponibles pour les arbres est un paramètre primordial dans le cycle de l'eau des forêts (Ruffault et al. 2022). Pourtant, son étude et sa détermination sont complexes, du fait de l'hétérogénéité des milieux souterrains et des profondeurs d'enracinement des arbres qui peut être atteindre plusieurs mètres. Dans le contexte du changement climatique actuel, la connaissance de la quantité et la dynamique de l'eau disponible deviendra d'autant plus importante pour appréhender la résilience de nos forêts (Hartmann et al. 2022). Le projet TAW-tree (*Total Available Water for Tree*) dans lequel s'inscrit cette étude a pour but de développer le concept de TAW en utilisant des méthodes hydro-géophysiques ayant déjà fait leurs preuves en milieu forestier, comme la tomographie de résistivité électrique (ERT) et l'induction électromagnétique (EMI) (Loiseau et al., 2023). Le projet se focalise sur 4 sites en France, les forêts de Font-Blanche (13), Puéchabon (34), Hesse (57), Barbeau (77). L'objectif de cet article est de présenter la méthodologie appliquée et les premiers résultats de prospections en suivi temporel obtenus dans la forêt de Hesse.

MATERIEL ET METHODE

Le site d'étude

Le site d'étude est situé dans la forêt de Hesse en Moselle, dans le nord-est de la France (07° 06' 46" E, 48° 67' 42" N et altitude 310 m). La forêt est un site de mesure de l'environnement terrestre du réseau ICOS (<https://www.icos-cp.eu/>). Le climat y est semi-continentale, caractérisé par des hivers froids et humides, et des étés chauds. Les précipitations sont importantes et bien réparties le long de l'année. Entre 2001 et 2022, la précipitation moyenne a été de 843 mm. Le sol est principalement un brunisol mais présentent par endroit une tendance rédoxique marquée. Le sol est constitué de matériaux fins, principalement des limons en surface et des couches argileuses à partir de 30 à 50 cm de profondeur. Cette disposition permet la constitution d'une réserve d'eau libre en proche surface une grande partie de l'année. La région est dominée par les formations du Muschelkalk inférieur, constitué de carbonates plus ou moins marneux et d'un grès sous-jacent. Ce grès est l'aquifère affleurant au niveau régional (Guillaume et Limasset 1968). Sur le site, le niveau piézométrique se situe à environ 2 m sous la surface. La végétation est principalement constituée d'un peuplement de hêtres (*Fagus sylvatica* L.) mais quelques individus remarquables de chênes sessiles (*Quercus petraea* Liebl) sont également présents.

Installation et mesures ERT

L'objectif est de suivre les dynamiques d'assèchement et de réhydratation dans les différents contextes texturaux existant sur le site. Les résultats de tomographie électrique seront donc mis en relation avec des mesures d'humidité sur le terrain afin de réaliser des profils de teneur en eau (Michot et al. 2003). Afin de visualiser les hétérogénéités du site, des premiers repérages par sondage électromagnétique (EMI) ont été réalisés en décembre 2023 et mai 2024 avec le *CMD Mini Explorer* de Gf Instrument. Cet appareil permet d'investiguer à 3 profondeurs de 0.5 à 2 m simultanément. Après filtrage, les données ont été interpolées par krigeage sous Surfer.

Deux profils ont été installés de manière à recouper les hétérogénéités du site selon les cartes EMI. Ils sont constitués de 96 électrodes, espacées de 0.75 m afin d'avoir une bonne résolution en surface. Les mesures ont été réalisées avec le *Syscal Pro* (IRIS Instrument). Le dispositif d'acquisition était le Wenner-Schlumberger et sa réciproque pour s'assurer de la qualité de la mesure. Les données sont filtrées à un seuil d'erreur réciproque de 5 %. Les résultats sont ensuite inversés grâce à ResIPy 3.6.2 (Blanchy et al. 2020) pour obtenir des profils de résistivité électrique.

Pour la suite du projet, 3 forages accueillant des sondes d'humidité ont été creusés le long des transects afin de pouvoir mettre en relation les résistivités avec les teneurs en eau dans les différents milieux investigués en suivi temporel. Cependant, cet article se focalisera sur l'interprétation du Pourcentage de Variation de Résistivité (PVR) entre 3 dates de mesure : 11/07/2024, 02/10/2024 et 02/12/2024 (cf. équation 1). Ces PVR seront considérés représentatifs des variations de stock.

$$PVR (\%) = \frac{\rho - \rho(\text{juillet})}{\rho(\text{juillet})} \times 100 \quad (1)$$

RESULTATS PRELIMINAIRES ET DISCUSSION

Caractérisation de l'hétérogénéité du site par EMI

La figure 1 permet de visualiser les résultats de la prospection EMI réalisée en mai 2024. Une différence très importante de conductivité électrique est observée entre la partie sud-ouest et nord-est du site. Cette hétérogénéité est observable dès la première profondeur d'investigation (Fig. 1.a). Ces observations concordent avec les prospections pédologiques effectuées précédemment qui décrivent le nord du site avec des tendances rédoxiques (et donc gorgé d'eau), à l'inverse de la partie sud. La population d'arbre est également différente, avec une majorité de hêtres dans la partie nord et une plus grande population de chênes dans la partie sud.

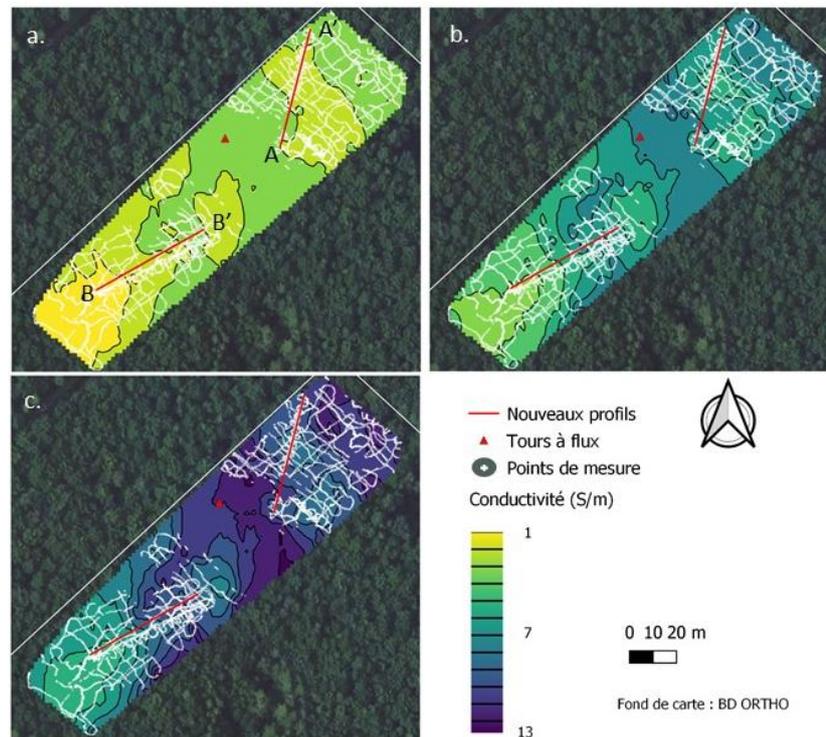


Fig. 1 – Résultats des prospections EMI de mai 2024 avec des profondeurs d'investigation de (a.) 5 m, (b.) 1m et (c.) 2 m.

Cette prospection a donc permis de déterminer la meilleure localisation pour l'implantation des profils ERT. En effet, les relations entre résistivité et teneur en eau étant spécifiques au substrat, les zones conductrices et résistantes devront toutes les deux être suivies par ERT et des sondes d'humidité. Deux transects ont donc été installés : un au nord dans la zone conductrice (A-A') et un au sud recoupant une zone résistante et une zone conductrice (B-B') (Fig. 1). C'est ce dernier profil qui sera étudié dans la suite de cet article.

Résultats du suivi temporel ERT

La figure 2 illustre les résultats des modèles inverses aux 3 dates de mesures (Fig.2.a), les profils PVR et les logs simplifiés des forages effectués le long du transect BB' (Fig 2.b). Les erreurs RMS (*Root Mean Square*) sont inférieures à 1 % et toutes les inversions ont été obtenues après 2 itérations. Il faut cependant garder à l'esprit que les conductivités n'ont pas encore été corrigées de la température. Les variations qui en découlent sont cependant de 2^{ème} ordre. La présence d'une zone plus résistante au sud-ouest s'observe également sur le profil de résistivité, avec une variation de 50 à 200 $\Omega.m$ latéralement à 3.5 m de profondeur (Fig. 2.a.). Les logs permettent de mettre en évidence des différences texturales le long du profil. En effet, la partie est du profil présente une plus grande profondeur argileuse qu'à l'ouest (et donc des humidités volumiques plus élevées). Ce contraste pourrait expliquer les différences de résistivité.

En termes d'assèchement, on observe une importante augmentation de résistivité entre juillet et octobre. La résistivité électrique est également plus faible en décembre qu'en juillet, mais les différences sont moindres (Fig. 2.b). Cela traduit une réhumectation entre octobre et décembre, mais sans atteindre le niveau de juillet. De manière générale, la zone plus densément peuplée présente des variations de résistivité électriques plus importantes sur les deux premiers mètres. En dessous, les variations latérales sont plus faibles.

Il existe tout de même une zone qui n'est que très peu impactée par les variations de résistivité (Fig. 2). Il s'agit d'un petit fossé qui a toujours été en eau lors des périodes de mesure. En proportion, la zone argileuse semble donc y subir un assèchement moins important.

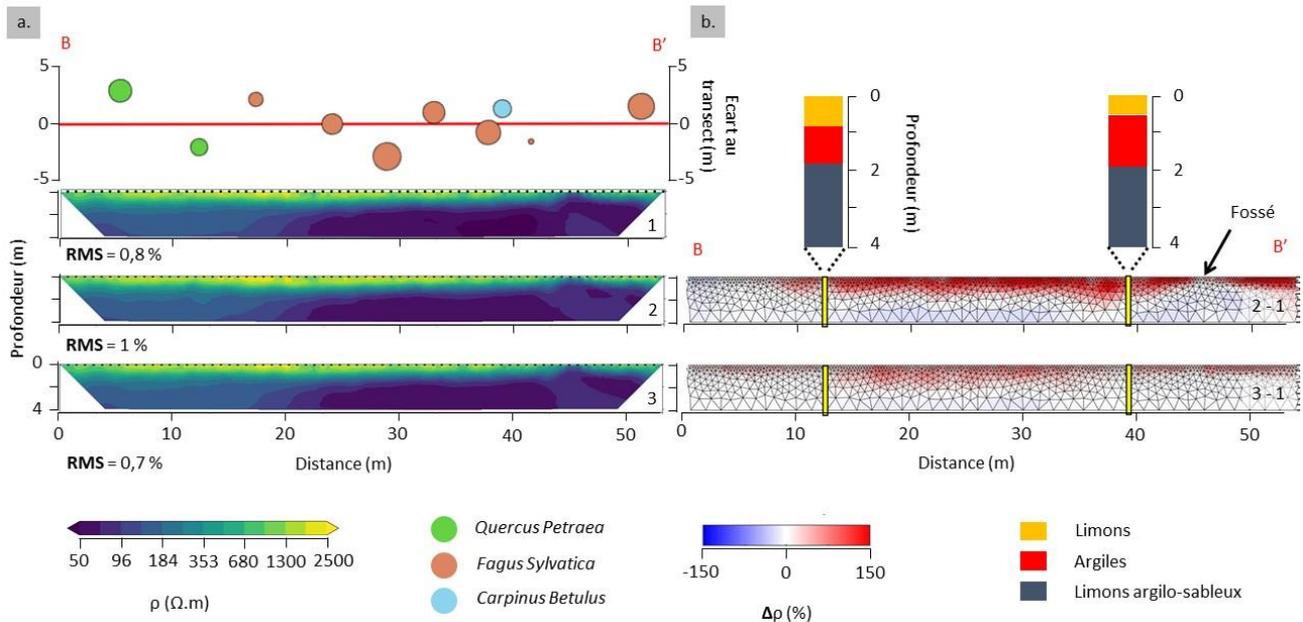


Fig. 2 – a) Localisations des arbres d'importance prochainement équipés de capteurs de flux de sève et résultats de l'inversion. b) PVR associés aux inversions et localisation des piézomètres et logs décrits. (1) : mesure au 11/07/2024, (2) : mesure au 02/10/2024, (3) : mesure au 02/12/2024.

CONCLUSIONS

Ces premiers résultats de suivi temporel permettent de mettre en évidence des variations latérales des résistivités électriques. Cela pourrait résulter de dynamiques d'assèchement et de réhumectation différentes. Entre juillet et octobre, on observe en surface une variation de résistivité électrique plus élevée dans la zone plus argileuse que dans la zone plus limoneuse. On observe ensuite une réhumectation entre octobre et décembre mais sans atteindre le niveau de juillet. Prochainement, des relations pétrophysiques seront établies à partir des suivis ERT et d'état hydrique du sol. Ces relations permettront d'imager la dynamique de la teneur en eau, afin de caractériser les réserves en eau des sites.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLANCHY, G., SANEIYAN, S., BOYD, J., MCLACHLAN, P., BINLEY, A., 2020** : ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Comput. Geosci.* 137, 104423. doi : 10.1016/j.cageo.2020.104423
- GUILLAUME, M., LIMASSET, J.-C., 1968** : Notice de la carte géologique de Sarrebourg au 1/50 000. *BRGM.*
- HARTMANN, H., BASTOS, A., DAS, A.J., ESQUIVEL-MUELBERT, A., HAMMOND, W.M., MARTINEZ-VILALTA, J., MCDOWELL, N.G., POWERS, J.S., PUGH, T.A.M., RUTHROF, K.X., ALLEN, C.D., 2022** : Climate Change Risks to Global Forest Health: Emergence of Unexpected Events of Elevated Tree Mortality Worldwide. *Annu. Rev. Plant Biol.* 73, 673–702. doi : 10.1146/102820-012804
- LOISEAU, B., CARRIERE, S.D., JOUGNOT, D., SINGHA, K., MARY, B., DELPIERRE, N., GUERIN, R., MARTIN-STPAUL, N.K., 2023** : The geophysical toolbox applied to forest ecosystems – A review. *Sci. Total Environ.* 899, 165503. doi : 10.1016/j.scitotenv.2023.165503
- MICHOT, D., BENDERITTER, Y., DORIGNY, A., NICOUILLAUD, B., KING, D., TABBAGH, A., 2003** : Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.* 39, 2002WR001581. doi : 10.1029/2002WR001581
- RUFFAULT, J., PIMONT, F., COCHARD, H., DUPUY, J.-L., MARTIN-STPAUL, N., 2022** : SurEau-Ecos v2.0: a trait-based plant hydraulics model for simulations of plant water status and drought-induced mortality at the ecosystem level. *Geosci. Model Dev.* 15, 5593–5626. doi : 10.5194/5593-2022

INTRUSION SALINE DANS UN AQUIFERE COTIER EN CONTEXTE D'URBANISATION RAPIDE ET DONNEES RARES: LE CAS DE SIHANOUKVILLE ETUDIE PAR TDEM (CAMBODGE)

VAN HANJA J.¹, CHORK V.², DESCLOITRES M.^{3,4}, MASSUEL S.^{1,4}, DOUNG R.², BAUDRON P.^{1,4}, LUN S.^{2,4}, SOK K.², EANG K.E.², CHHUON K.², UK S.²

¹ UMR G-EAU - IRD, Université de Montpellier, Montpellier, France

² Institut de Technologie du Cambodge, Phnom Penh, Cambodge

³ UMR IGE - IRD, Grenoble, France

⁴ LMI « CARE », Ho Chi Minh City, Vietnam.

RESUME

L'urbanisation rapide de Sihanoukville au Cambodge accroît la pression sur les ressources en eau, menacées par l'intrusion saline dans les aquifères côtiers. L'absence de données hydrogéologiques a conduit à l'utilisation de la méthode TDEM (Time Domain Electromagnetic) pour caractériser la salinité des eaux souterraines. Soixante-et-un sondages ont été réalisés et complétés par des enquêtes auprès des foreurs. Les résultats indiquent une grande variabilité spatiale et une intrusion d'eau salée.

Mots clés : TDEM, Aquifère côtier, Intrusion saline, Vulnérabilité, loi d'Archie

ABSTRACT

The rapid urbanization of Sihanoukville in Cambodia is increasing pressure on water resources, raising concerns about saline intrusion into coastal aquifers. The lack of hydrogeological data led to the use of TDEM method (Time Domain Electromagnetic) to characterize groundwater salinity. Sixty-one TDEM soundings were performed, supplemented by driller's knowledge. The results indicate high spatial variability and intrusion of seawater.

Key words: TDEM, Coastal aquifer, Saline intrusion, Vulnerability, Archie's law

INTRODUCTION

Sihanoukville est la principale ville côtière du Cambodge. Située sur la nouvelle route de la soie chinoise, la ville connaît un développement économique rapide, accompagnée d'une augmentation de la demande en eau. Or, les ressources en eau de surface sont limitées par un impluvium restreint, et les eaux souterraines deviennent une réserve de plus en plus convoitée.

Le contexte hydrogéologique de la zone a été peu étudié et il n'y a aucun réseau d'observation des eaux souterraines. Des rapports décrivent deux aquifères, un aquifère superficiel sédimentaire discontinu (max. 30m) reposant sur un aquifère de grès fracturés (Choup, 2014). La préoccupation majeure concerne le risque d'intrusion d'eau salée dans ces aquifères, un phénomène déjà observé ponctuellement dans la ville et dans d'autres zones littorales cambodgiennes soumises à une forte exploitation des ressources en eau souterraine (Choup, 2014).

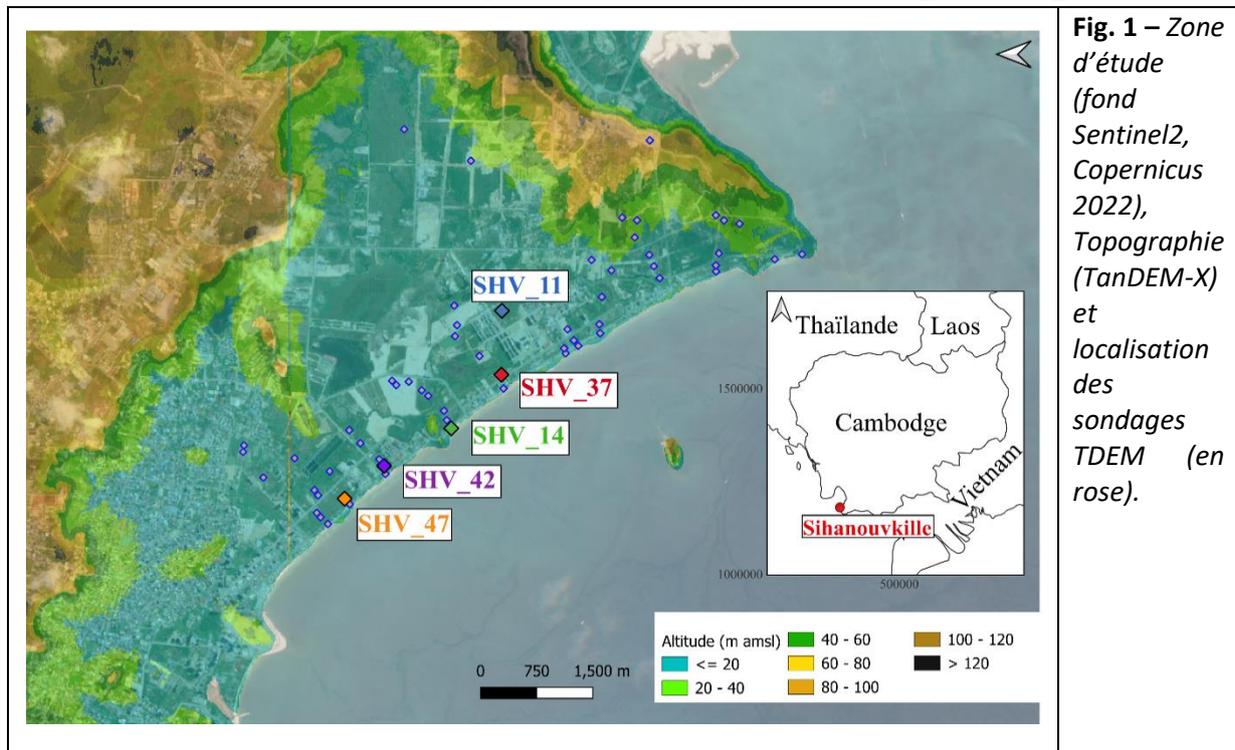
Pour caractériser la vulnérabilité des aquifères de la ville, et face à l'absence de données nous avons opté pour une caractérisation géophysique basée sur la méthode électromagnétique dans le domaine temporel (TDEM - Time Domain Electromagnetic). La mesure de la résistivité apparente des terrains par TDEM s'avère efficace pour évaluer l'intrusion saline (Nenna et al., 2013). Elle permet de discriminer une nappe d'eau douce dans des formations de résistivité intermédiaire d'un aquitard argileux ou d'une zone d'intrusion d'eau salée plus conductrices (Kafri & Goldman, 2005).

METHODOLOGIE

La méthode TDEM repose sur l'utilisation d'une boucle de câble émettrice (Tx) et d'une boucle réceptrice (Rx) disposées en surface. Nous avons utilisé des boucles Rx et Tx coïncidentes avec le TEMFAST

48 d'AEMR Technology. Un courant continu est injecté dans Tx, générant un champ magnétique primaire. Lorsque le courant est soudainement interrompu, une induction crée des courants de Foucault dans le sol, qui se diffusent de plus en plus profondément au fil du temps. Ces courants génèrent des champs magnétiques secondaires, qui induisent des courants dans Rx. L'appareillage mesure la décroissance de la tension au cours du temps, tension convertie en une courbe de résistivité apparente, interprétée par une inversion itérative pour obtenir un modèle tabulaire de couches de résistivité en fonction de la profondeur.

Dans la région de Sihanoukville, 61 sondages TDEM ont été réalisés (fig.1) ainsi que des entretiens avec des foreurs expérimentés. La description lithologique de 4 sites a été recueillie auprès des foreurs ainsi qu'une description de la qualité de l'eau (eau de mer, eau douce). Des sondages TDEM réalisés à proximité de ces sites de forage ont permis une comparaison avec les modèles de résistivité (fig. 2). Soit les sondages SHV_11, SHV_37 et SHV_14 pour les trois premiers sites. Le quatrième site n'étant pas directement accessible, deux sondages ont été réalisés à proximité (SHV_42 et SHV_47).



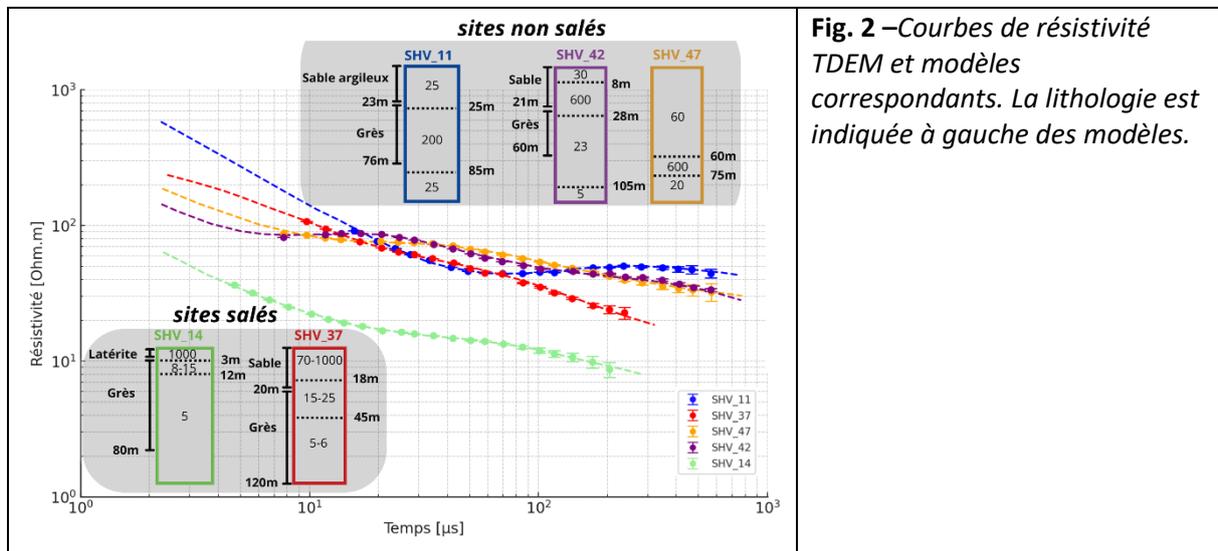
RESULTATS

Sites salés

Nous avons étudié les sondages SHV_37 et SHV_14 (fig.2) avec présence d'eau salée. Dans les deux cas la couche profonde a une résistivité de $5 \Omega.m$ et se situe dans du grès. Cette valeur est cohérente avec la littérature pour du grès saturé en eau salée avec une concentration proche de l'eau de mer (p.ex. Alhumimidi et al. (2020)).

Selon la loi d'Archie cette couche aurait une porosité de 15 %, avec plusieurs hypothèses : a) la fracturation des grès est assimilable en grand à un milieu poreux, b) les paramètres d'Archie sont ceux proposés par Keller (1982) pour des roches fortement cimentées, soit $a = 0,62$ et $m = 1,95$, c) la conductivité électrique de l'eau souterraine salée est supposée égale à celle de l'eau de mer, soit 36 mS/cm . Si l'on applique cette hypothèse de porosité de 15 % à la seconde couche de résistivité de $20 \Omega.m$ du

sondage SHV_37 (équivalence entre 15 et 25 Ω .m), la conductivité électrique de l'eau souterraine dérivée est d'environ 10 000 μ S/cm, ce qui correspondrait à une eau saumâtre. Cependant, cette valeur de porosité mérite d'être discutée à la lumière des observations faites sur les affleurements de la région. En effet, ces affleurements ne présentent pas de signes évidents de fracturation intense. À l'inverse, ils révèlent une grande hétérogénéité des roches, allant de matériaux sableux peu consolidés à des grès massifs. Ainsi, la porosité estimée de 15 % pourrait refléter une moyenne à l'échelle du sondage TDEM.



Sites non salés

Le sondage TDEM SHV_11 indique une première couche de sables argileux (25 Ω .m) contenant de l'eau douce, confirmée par les observations des foreurs. La seconde couche (200 Ω .m) correspond à l'aquifère gréseux. La troisième couche (25 Ω .m) pourrait indiquer soit une formation argileuse, soit un aquifère saumâtre (15 % de porosité) ou salinisé (8 % de porosité). L'absence de formations argileuses profondes dans les forages voisins (ex. forage proche de SHV_37 jusqu'à -120 m, fig.2) remet en question l'hypothèse d'un substrat argileux profond généralisé dans la région. Pour les sondages SHV_47 et SHV_42, la comparaison est faite avec un même forage situé à équidistance. SHV_47 montre une première couche sableuse (60 Ω .m), un aquifère gréseux (600 Ω .m) et une couche profonde (20 Ω .m), qui pourrait correspondre à un aquifère saumâtre ou salin. SHV_42 présente un profil similaire, avec une dernière couche (5 Ω .m à -105 m), suggérant un grès massif saturé en eau salée.

Cartes de résistivité

L'interpolation des modèles de résistivité par profondeur permet d'obtenir une carte des résistivités (fig.3). Dans le cas de la zone sédimentaire (jusqu'à 30m de profondeur) les valeurs de résistivité entre 5 et 35 Ω .m sont associées à de l'eau salée ou saumâtre. Les zones au Nord et au Sud avec des résistivités plus élevées correspondent à des zones de grès non saturés en eau salée. Plus profondément, lorsqu'on atteint le grès sur l'ensemble de notre zone d'étude (ici à -45m), les résistivités varient le long de la côte. Cette variabilité, mise en évidence par l'existence de sites salés et non salés dans la partie précédente, appuie l'idée d'une intrusion préférentielle selon le réseau de fractures.

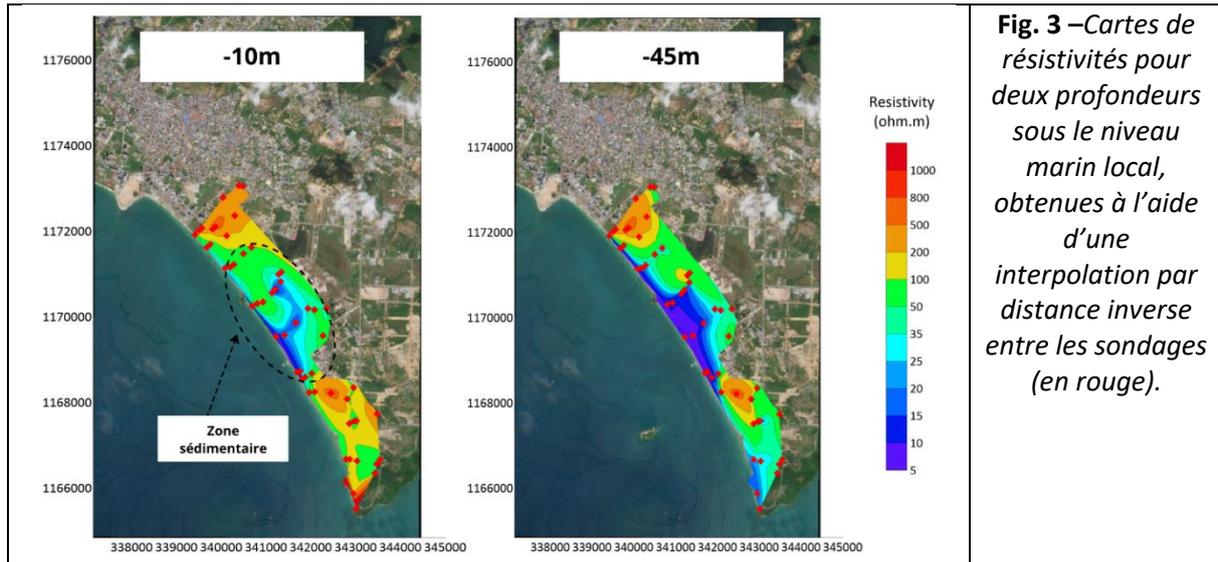


Fig. 3 –Cartes de résistivités pour deux profondeurs sous le niveau marin local, obtenues à l'aide d'une interpolation par distance inverse entre les sondages (en rouge).

CONCLUSION

Les informations collectées auprès des foreurs indiquent l'absence de formation argileuse épaisse régionale, par conséquent les résistivités TDEM comprises entre 5 et 25 $\Omega.m$ peuvent être raisonnablement attribuées à des grès saturés d'eau saumâtre ou d'eau de mer. Pour les grès saturés d'eau douce, les résistivités TDEM sont supérieures à 200 $\Omega.m$. La porosité de l'aquifère gréseux pourrait varier entre 8% et 15% selon une hypothèse fixant les paramètres de la loi d'Archie pour des formations fortement cimentées. Les données TDEM permettent d'interpréter une intrusion préférentielle d'eau salée dans l'aquifère gréseux, probablement à la faveur du réseau de fracture, ce qui explique que certains forages tapent des eaux salées malgré des distances équivalentes au littoral. La salinisation semble se propager à la nappe superficielle, au moins durant les basses eaux lorsque les charges sont équivalentes. Ces premières hypothèses de porosité de l'aquifère de grès dans la zone seront primordiales pour de futures modélisations hydrogéologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALHUMIMIDI S., 2020** – An integrated approach for identification of seawater intrusion in coastal region: A case study of northwestern Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, 32(7), 3187-3194.
- CHOUP S., 2014** – Seawater intrusion along coastal line in Krong Preah Sihanouk of Kingdom of Cambodia. *In: Project report on CCOP-GSI/AIST-GA Groundwater Phase II Project Final Meeting, 18-20 March 2014, Bandung, Indonesia. CCOP Technical Secretariat, Bangkok, Thailand, 1-15.*
- KAFRI U., GOLDMAN M., 2005** – The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity. *Journal of Applied Geophysics*, 57(3), 167-178.
- KELLER G.V., 1982** – Electrical properties of rocks and minerals. *In: Carmichael, R.S. (Ed.), Handbook of Physical Properties of Rocks, Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, FL, 217-293.*
- NENNA V., HERCKENRATH D., KNIGHT R., ODLUM N., MCPHEE D., 2013** – Application and evaluation of electromagnetic methods for imaging saltwater intrusion in coastal aquifers : Seaside Groundwater Basin, California. *Geophysics*, 78(2), B77-B88.

Remerciements

Nous remercions les membres de la JEA1 4C-Water et le laboratoire Mixte International CARE au Vietnam pour leur soutien lors des opérations de terrain.

LES SONDAGES ELECTROMAGNETIQUES EN DOMAINE TEMPOREL (TDEM) POUR L'IDENTIFICATION DU MUR D'UN AQUIFERE COTIER EN VUE D'UNE MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE

N'TCHA Tchantipé.^{1,2}, ELEGBEDE MANOU Bernadin.², LAWSON Messan Fabrice.³ YALO Nicaise³
GUIDAH CHABI Bio^{2,3} BOUKARI Moussa³ KOTCHONI Valerie³

¹ Laboratoire Science et Technique de l'Eau et de l'Environnement, Institut National de l'Eau (INE) Université d'Abomey-Calavi, Bénin, Email : c2ea.ine@gmail.com ; mkdaouda@yahoo.fr

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

³Laboratory of Applied Hydrology, National Water Institute, University of Abomey-Calavi, Benin (LHA/INE/UAC), 04BP 1178, Cotonou, Bénin

RESUME

Afin de connaître la géométrie de l'aquifère du Continental Terminal (CT) capté sur le plateau de Sakété, 13 sondages géophysique TDEM en dispositif coïncident 150 m de côté et 25 m en central ont été réalisés avec le TEMFAST 48 HPC. Les données ont été inversés avec le logiciel TEMRES. De l'analyse des résultats de sondage, sur le transect Est-Ouest en bordure Nord du Plateau, le substratum de l'aquifère CT est situé entre 80 m et 100 m de profondeur marqué par les argiles franche de résistivité d'environ 2 Ohm.m.

Mots clés : Continental Terminal (CT), Electromagnétique en Domaine Temporel (TDEM), modélisation hydrogéologique

ABSTRACT

In order to know the geometry of the Continental Terminal (CT) aquifer captured on the Sakété plateau, 13 TDEM geophysical surveys in a coincident device 150 m sideways and 25 m centrally were carried out with the TEMFAST 48 HPC. The data were inverted with TEMRES software. From the analysis of the geophysical survey results, on the East-West transect on the northern edge of the Plateau, the bedrock of the CT aquifer is located between 80 m and 100 m deep marked by loam clays with a resistivity of approximately 2 Ohm.m.

Keywords: Continental Terminal (CT), Time Domain Electro Magnetism (TDEM), hydrogeological modeling

INTRODUCTION

La vulnérabilité des aquifères côtiers n'est plus à démontrer de nos jours. Selon Creel, 2003, environ 3 milliards de personnes, soit environ la moitié de la population mondiale vivent à moins de 200 kilomètres d'un littoral et ces chiffres seraient doublés de nos jours avec diverses activités économiques. Cette forte concentration de la population en zones côtières a induit un pompage excessif des nappes souterraines afin de satisfaire les besoins en eau. L'intensification des prélèvements, souvent supérieurs aux seuils de recharge naturelle dans certaines régions, s'est traduite dans beaucoup de ces régions du globe par une baisse de niveaux des aquifères (Djellouadji et Thabet, 2012) ajoutée à l'équilibre fragile entre eau de mer et eau douce souterraine. C'est dans cette optique qu'un modèle hydrogéologique de compréhension du fonctionnement de l'aquifère le plus exploité (Continental Terminal) dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin (Alassane, 2004) est envisagé pour une gestion durable de la ressource. En effet, pour répondre à la question de l'épuisement et de la vulnérabilité de ces nappes, la modélisation hydrogéologique apparaît aujourd'hui comme un outil indispensable et efficace ; et en modélisation hydrogéologique, l'un des défis majeurs auxquels les modélisateurs sont confrontés en dehors de la disponibilité des données est la reconstitution du modèle géométrique de l'aquifère dans son ensemble

ainsi que l'affinement du mur. La géophysique est l'outil d'investigation complémentaire pour la géométrie du réservoir et la nature lithologique des terrains.

Zone d'étude et sites de sondage

Le plateau de Sakété est l'un des trois Plateaux Sud du Bassin Sédimentaire Côtier (BSC) du Bénin. Il est situé au Sud-Est du Bassin à la frontière nigériane en bordure de la plaine côtière avec une superficie de 1500 km². Il est limité au nord par une grande dépression appelée dépression de la Lama, puis à l'Ouest par une grande vallée du complexe fluvial Ouémé-So. Deux profils de sondages ont été définis en fonction de l'existence des logs de forage et des coupes hydrogéologiques. En effet, des études antérieures notamment (Alassane, 2004 et 2018) ont permis de connaître localement la géométrie de l'aquifère du CT à travers plusieurs coupes hydrogéologiques (voir orientation des traits de coupes en rouge sur la figure 1) réalisés à partir des logs de forage. Néanmoins, à l'Ouest et surtout au Nord du plateau, les forages sont rares limitant la réalisation des coupes hydrogéologiques. Les sondages ont donc été réalisés dans ces zones afin d'affiner la géométrie. Au total 10 sondages sur le transect Nord et 3 sondages au Sud à proximité des logs de forages ont été réalisés afin de comparer les courbes de résistivité des sondages TDEM à la lithostratigraphie des logs de forage. Dix sondages sont interprétés dans cet article.

Fig. 1 Carte de présentation de la zone d'étude et des sites de sondages TDEM

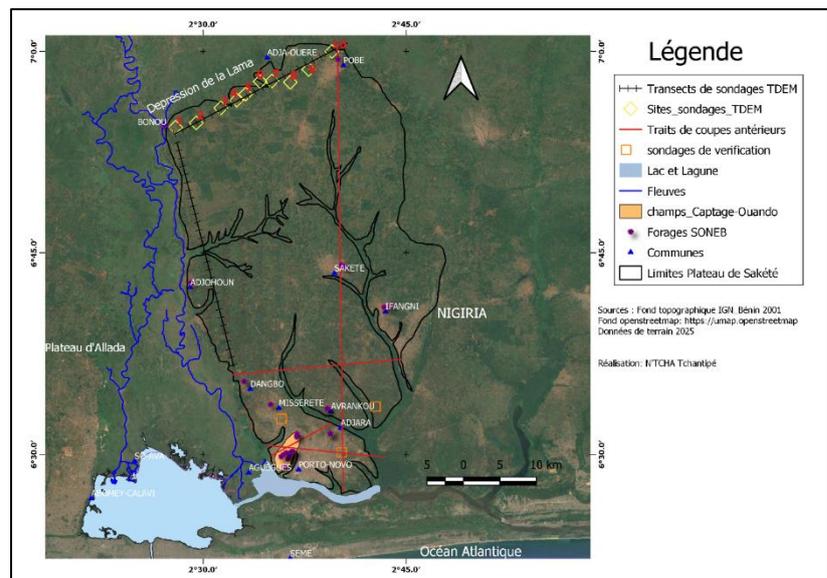
Matériel et Méthodologie

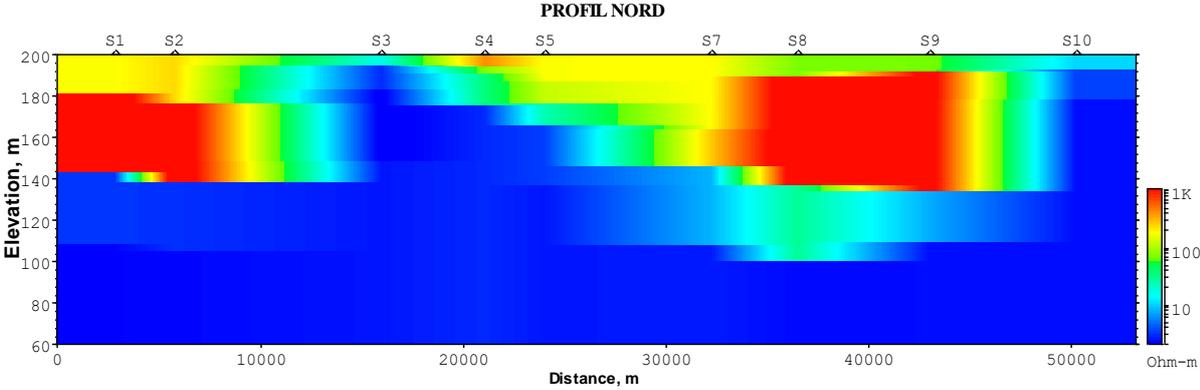
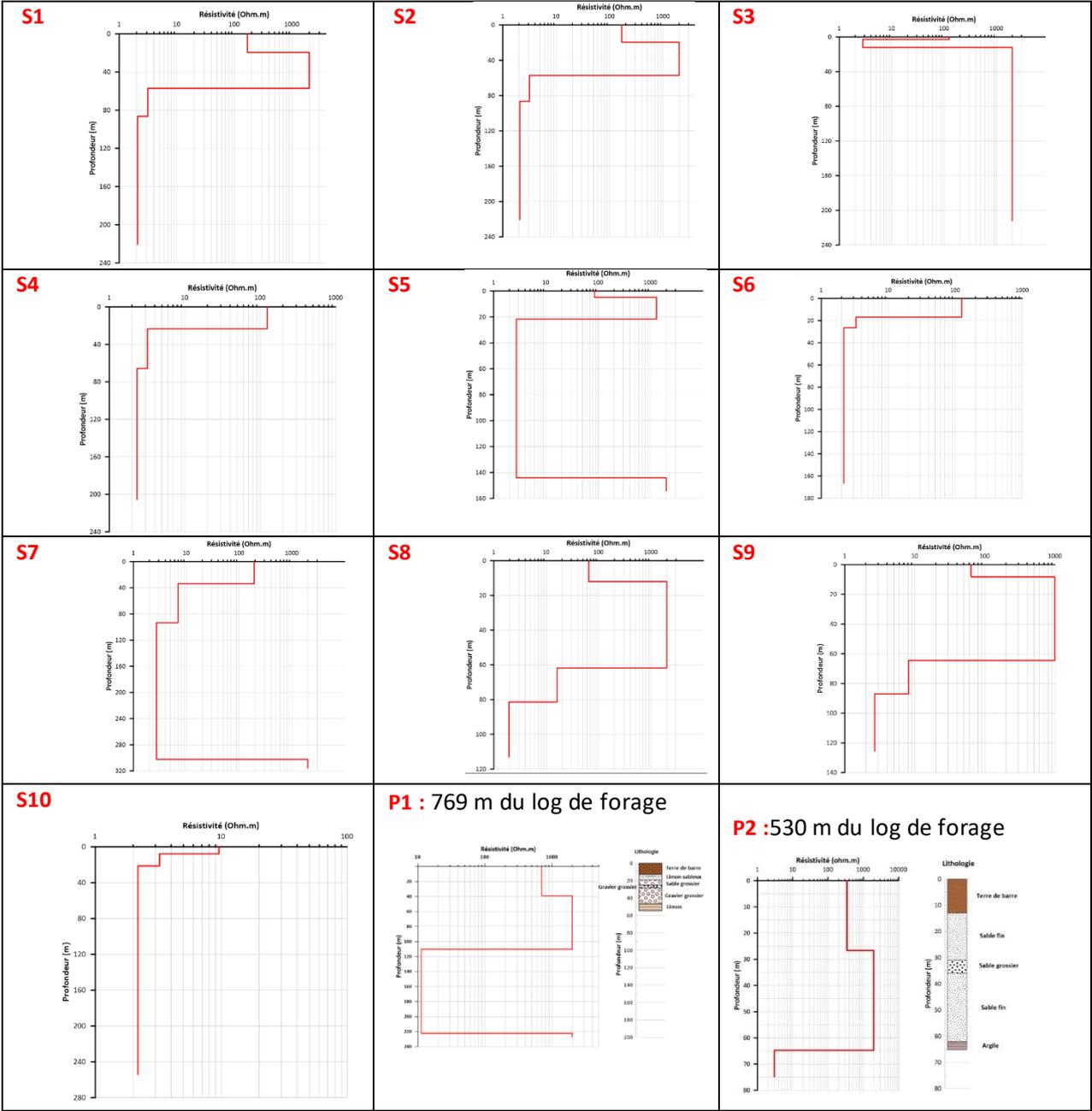
L'un des plus grands avantages de la méthode TDEM est sa sensibilité aux formations conductrices ce qui nous a incités à utiliser cette méthode pour estimer la position du mur argileux de l'aquifère du CT mis en évidence à l'échelle du bassin sédimentaire côtier (IRB., 1987) ; (Dray et al., 1988) et à l'échelle locale par Boukari., 2002 ; Alassane., 2004 et 2018.

Le matériel que nous avons utilisé pour cette méthode est le TEMFAST 48 HPC. Pour la mise en œuvre des sondages, les dispositifs ont été déployés. Il s'agit d'une boucle d'émission de 150 m de côté en coïncident et une boucle de réception de 25 m de côté en central.

Résultats et Discussions

Les sondages TDEM mettent en évidence une première couche de résistivité comprise entre 100 et 200 Ohm.m avec une épaisseur moyenne de 30m. Le deuxième niveau présente par endroit une couche plus résistive d'environ 2000 Ohm.m (**S1, S2, S5, S8, S9**) et d'épaisseur entre 20 m et 40 m. Sur certains sites la deuxième couche plutôt conductrice (entre 2 m et 10 Ohm.m) est aperçue à 20 m environ (**S6, S4, S7**). Une troisième plus conductrice située entre 80 m et 100 m de profondeur de résistivité d'environ 2 Ohm.m. D'après les travaux de Alassane 2004 et 2018, la première couche correspondrait à la terre de barre plus ou moins perméable permettant la recharge de la nappe sous-jacente constituée de sables avec par endroits des lentilles d'argile. Les argiles franches qui marquent le substratum de l'aquifère CT se situe à la bordure Nord du Plateau entre 80 m et 100 m de profondeur et les sondages **S3, S10** réalisés à la limite de la dépression de la Lama présentent un affleurement argileux d'environ 10 Ohm.m. Par ailleurs, deux sondages (**P1** et **P2**) réalisés à respectivement 769 m et 530 m de distance des logs de forages ont permis de reproduire un profil de résistivité correspondant à la lithologie ci-dessus décrite.





CONCLUSIONS

Une bonne modélisation hydrogéologique est basée non seulement sur les données d'entrées quantitatives et qualitatives fiables mais également sur une bonne représentation de la géométrie du réservoir. L'aquifère du continental Terminal du Bénin est assez bien connu localement en ce qui concerne sa géométrie, à travers les coupes hydrogéologiques réalisées dans les études antérieures. Des présents sondages géophysiques réalisés par TDEM ont été efficaces pour la reconstitution de la géométrie en bordure Nord du Plateau où les logs de forages sont quasi inexistantes. De ces travaux, les argiles franches qui marquent le substratum de cet aquifère se situent entre 80 m et 100 m de profondeur avec par endroit des affleurements argileux à la limite de la dépression de la Lama.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

ALASSANE A., -2018 Apports des outils géochimiques et isotopiques pour l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement du système aquifère du Continental Terminal dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. PhD thèse, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Benin, 147 pp.

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. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Univ. C. A. Diop de Dakar. 145p + annexes.

BOUKARI M., 2002 - Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse Doctorat ès-Science. Univ. C. A. Diop de Dakar. 278p + annexes.

CREEL L., 2003 -Ripple effects: population and coastal regions. 1875 Connecticut Ave., NW, Suite 520, Washington, DC 20009 USA.

DESCLOITRES M.,1998 -les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : Application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (cap vert) et du piton de la fournaise (la Reunion). Université de paris 6 ,242 pages.

DJELLOUADJI D. E. et THABET M.,2012 -Modélisation de l'écoulement dans les milieux poreux via FEFLOW – Cas d'étude : la nappe de Hamiz affectée par l'intrusion marine. Mémoire de Master. Ecole nationale polytechnique (ENP). Laboratoire de Recherches des Sciences de l'EAU (LRS-EAU). Algérie, 120 pages.

DRAY O., GIACHELLO L., AZZAROTO V., MANCINI M., ROMAN E., ET ZURPI G., (1988) - Etude isotopique de l'aquifère crétacé du bassin sédimentaire côtier Béninois. Actes du séminaire sur le développement des techniques isotopiques et nucléaires. Niamey, Niger, 11 Pages.

IRB., 1987 - Etude de cartographie géologique et prospection minérale de reconnaissance au sud du 9^e11^e parallèle. rap. istituto ricerca breda. fed-obemines. 80p. + annexes.

ANALYSE DE SENSIBILITÉ GLOBALE D'UN MODÈLE HYDROGÉOPHYSIQUE COUPLÉ : ÉCOULEMENT 1D ET RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE

GRU G.¹, GIRARD J.F.¹, ACKERER P.¹, LESPARRE N.¹

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

RESUME

Une expérience de suivi par résonance magnétique protonique (RMP) d'un phénomène d'infiltration dû à la fonte d'un manteau neigeux a été effectuée sur le bassin versant du Strengbach (Vosges) pendant l'hiver 2021. Nous présentons ici une étude préliminaire à l'utilisation de ce jeu de données pour la calibration d'un modèle hydrologique : l'analyse de sensibilité globale du modèle direct hydrogéophysique aux variations des paramètres hydrologiques. Nous définissons une expérience numérique placée dans le contexte d'étude de l'expérience de l'hiver 2021 et nous en déduisons des informations en termes d'identifiabilité des paramètres et des données utiles au développement d'expériences futures.

Mots clés : Résonance Magnétique Protonique, Analyse de sensibilité globale, Polynômes du chaos, Zone vadose

ABSTRACT

A Magnetic Resonance Sounding (MRS) time-lapse experiment has been conducted on the Strengbach catchment (Vosges) during winter 2021 with the aim to follow infiltration due to a snowmelt event. We present a preliminary study to the use of these data for hydrologic model calibration: a Global Sensitivity Analysis (GSA) of the hydrogeophysical direct model. We defined a numerical experiment based on the context of the 2021 time-lapse experiment and got insights on hydrologic parameters identifiability and access to useful information for the design of future field experiments.

Key words: Magnetic resonance sounding, Global sensitivity analysis, Polynomial chaos expansion, Vadose zone

INTRODUCTION

La ressource en eau en région montagneuse est d'une importance capitale à la fois pour les écosystèmes locaux et pour les activités anthropiques (Viviroli et al., 2011). Il est donc crucial de pouvoir surveiller la disponibilité de cette ressource et prédire avec précision son évolution dans le contexte du dérèglement climatique. La modélisation hydrologique est un outil nécessaire pour atteindre cet objectif. Pour cela, les propriétés hydrodynamiques du sous-sol doivent être correctement caractérisées. Ces paramètres peuvent être mesurés directement à partir d'échantillons de sol ou estimés en comparant les résultats de simulations avec des données hydrologiques telles que des hauteurs piézométriques, le débit d'un cours d'eau ou bien des mesures locales de teneur en eau. Ces types de données ont cependant des limites. En effet, les mesures directes sur échantillons peuvent ne pas révéler correctement les hétérogénéités spatiales des paramètres à l'échelle d'un bassin versant. Les données hydrologiques locales impliquent la mise en place de tranchées, de forages, ce qui peut être coûteux et difficile à mettre en place dans un contexte montagneux. Ensuite, des problèmes d'équifinalité sont liés à l'utilisation de données hydrologiques intégratives telles que le débit d'un cours d'eau. Dans ce contexte, les méthodes de sondage géophysiques apportent une information supplémentaire très pertinente pour la calibration des modèles. Ce travail se concentre sur la Résonance Magnétique Protonique (RMP). Cette méthode géophysique est basée sur le phénomène de résonance magnétique et a les avantages d'être non-destructive et directement sensible au contenu en eau souterraine (Legchenko & Valla, 2002). Un suivi RMP a été effectué sur le bassin versant du Strengbach dans les Vosges pendant l'hiver 2021 avec pour objectif de suivre un

événement d'infiltration dû à la fonte d'un manteau neigeux. Avant d'utiliser ce jeu de données pour la calibration d'un modèle hydrologique 1D, nous avons utilisé des outils d'analyse de sensibilité globale afin de déterminer quels paramètres hydrologiques sont les plus influents sur les signaux géophysiques. Cette étape préliminaire est utile pour l'estimation de l'identifiabilité des paramètres.

SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude choisi pour l'expérience de suivi RMP est le bassin versant expérimental du Strengbach. Il s'agit d'un petit bassin versant (0.8 km²) avec un couvert végétal forestier, localisé dans les Vosges (Fig. 1).

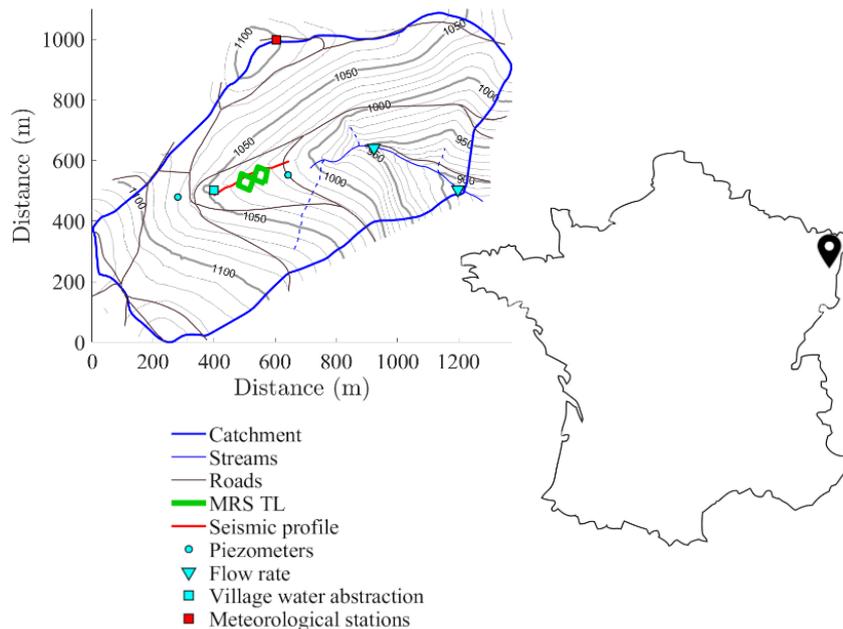


Fig. 1 – Position du bassin versant du Strengbach et carte du bassin versant, emplacement des stations expérimentales utilisées dans cette étude.

Ce bassin abrite l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE, <https://ohge.unistra.fr/>): un observatoire où des données météorologiques, hydrologiques et géochimiques ont été acquises depuis 1986. L'OHGE fait partie du réseau national d'observatoires de la zone critique OZCAR. L'objectif principal de cet observatoire est d'étudier les modifications à long-terme des écosystèmes sous pressions naturelles ou anthropiques (Pierret et al., 2018).

MÉTHODE RMP ET MODÈLE HYDROGÉOPHYSIQUE

La méthode géophysique RMP est basée sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire : un pulse électromagnétique est généré dans une boucle de câble à la surface. Ce pulse induit un champ électromagnétique qui excite les protons des atomes d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau du sol. Après que le champ électromagnétique perturbateur soit coupé, un champ électromagnétique de relaxation peut être mesuré. Celui-ci est créé par le retour à l'équilibre des protons. La tension induite par ce champ électromagnétique de relaxation dans une boucle de réception à la surface est directement proportionnelle au contenu en eau du sol.

L'écoulement souterrain est modélisé grâce à l'équation de Richards unidimensionnelle et aux modèles de Mualem et Van Genuchten. L'équation de Richards est résolue numériquement grâce à un schéma d'éléments finis. Nous utilisons le logiciel HYDRUS 1D pour la modélisation hydrologique. Les

conditions aux limites de ce modèle sont variables dans le temps et basées sur des données météorologiques et hydrologiques. La condition à la limite supérieure (de flux) est calculée à partir de mesures de précipitations provenant de la station météorologique au sommet du bassin versant, en prenant en compte les effets de la neige et des phénomènes d'évapotranspiration. La condition à la limite inférieure (de pression) est obtenue à partir d'une mesure locale du niveau piézométrique. En se donnant un jeu de paramètres hydrologiques, on peut calculer des distributions de teneur en eau $\theta(z)$ aux instants correspondants à l'acquisition de mesures RMP. Puis, ces distributions de teneur en eau peuvent être utilisées pour calculer les signaux géophysiques correspondant. La Fig. 2 présente un schéma de fonctionnement du modèle hydrogéophysique développé pour cette étude.

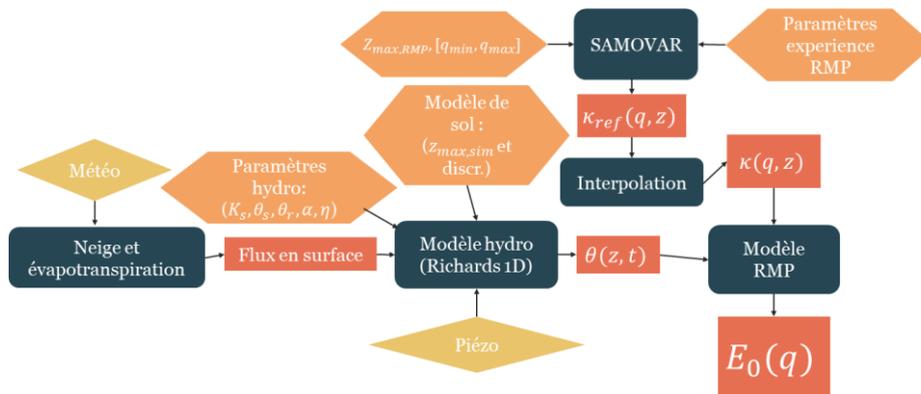


Fig. 2 – Schéma du modèle hydrogéophysique couplé.

ANALYSE DE SENSIBILITÉ GLOBALE

Nous avons utilisé un outil d'analyse de sensibilité globale basé sur la variance pour quantifier la sensibilité des signaux RMP aux variations des paramètres hydrologiques. Cette analyse utilise les indices de Sobol (Sobol, 2001) des paramètres hydrologiques qui sont calculés à l'aide de méta-modèles polynômes du chaos, grâce à la bibliothèque Python UQ[py]Lab (Lataniotis et al., 2021). La Fig. 3 montre un exemple de résultat d'analyse de sensibilité de signaux RMP aux paramètres du modèle hydrologique. La courbe noire représente la variance totale et les surfaces colorées correspondent aux fractions de variances associées à chacun des paramètres. Ces proportions de variance sont obtenues à partir des indices de Sobol. La variance et les indices de sensibilité évoluent dans le temps lors d'une simulation basée sur des forçages hydrologiques et météorologiques provenant de mesures fournies par l'OHGE. Le sol est divisé en deux zones : une zone dite simulée d'une profondeur maximale de 7 m où l'équation de Richards est résolue et une zone non simulée située durant toute l'expérience sous le plafond de la nappe et qui s'étend jusqu'à 50 m de profondeur. Les données du piézomètre indiquent en effet une profondeur de nappe toujours inférieure à 7 m, la teneur en eau dans la zone non simulée est donc constante et égale à la teneur en eau à saturation. La teneur en eau visible par RMP est également constante et nous la notons θ_{RMP} . La zone simulée est séparée en 3 couches d'épaisseurs variables (10cm, 90cm et 600cm) et la zone non simulée est répartie en 3 couches de même épaisseur (14m). Les portions de variances affichées sur la Fig. 3 sont associées à la valeur de pulse : 362 A.ms. Cette valeur de pulse influence fortement la contribution des paramètres au cours de l'expérience.

Les paramètres les plus influents sur les signaux RMP pour cette valeur de pulse sont la teneur en eau invisible par RMP ($\theta_{i,3}$), la teneur en eau à saturation $\theta_{s,3}$, le paramètre n_3 et la conductivité hydraulique à saturation de la troisième couche de la zone simulée. La sensibilité des signaux aux

paramètres varie de manière importante au cours de l'expérience et est fortement liée aux variations temporelles des conditions aux limites.

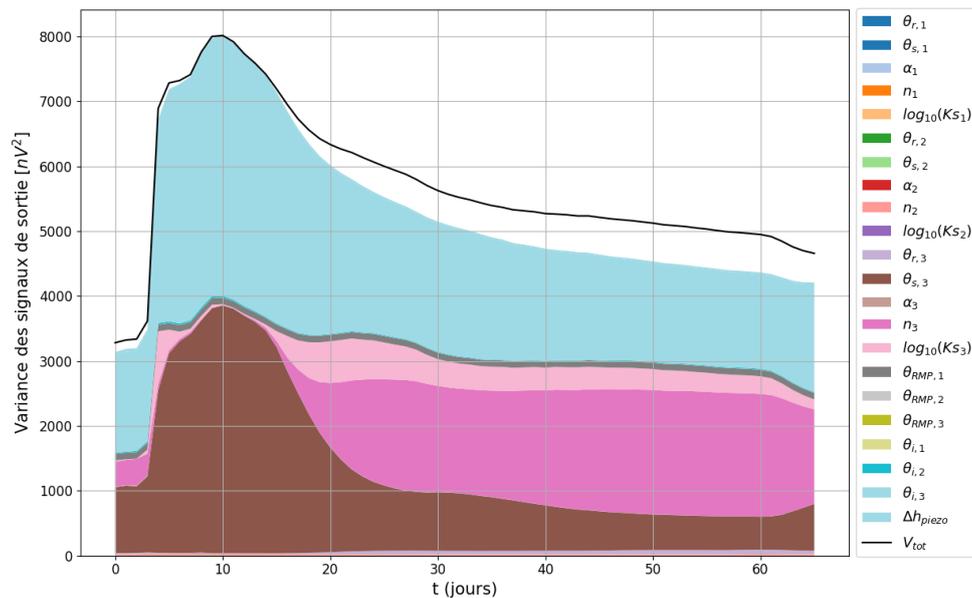


Fig. 3 – Exemple de résultat d'analyse de sensibilité globale des signaux RMP aux paramètres hydrologiques. La courbe noire représente la variance totale des signaux RMP et les surfaces colorées représentent la variance associée à chacun des paramètres. θ_r , teneur en eau résiduelle, θ_s , teneur en eau à saturation, α et n paramètres de Van Genuchten, K_s conductivité hydraulique à saturation, θ_{RMP} teneur en eau dans les zones non simulées, θ_i teneur en eau invisible par RMP, Δh_{piezo} erreur sur la mesure du piézomètre.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'université de Strasbourg pour le financement de la thèse de G. Gru, ainsi que l'IMPT, le programme Prime 80 de la MITI (CNRS) ainsi que l'ANR (ANR CASH : 24 CE56 3383 01) pour leur soutien financier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LATANIOTIS, C., MARELLI, S., & SUDRET, B., 2021 – Uncertainty quantification in the cloud with UQCloud. In *4th International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering (UNCECOMP 2021)* (pp. U-18990). ETH Zurich, Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification.

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.

PIERRET, M. C., COTEL, S., ACKERER, P., BEAULIEU, E., BENARIOUMLIL, S., BOUCHER, M., ... & PROBST, A., 2018 – The Strengbach catchment: A multidisciplinary environmental sentry for 30 years. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-17.

SOBOL, I. M., 2001 – Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and computers in simulation*, 55(1-3), 271-280.

VIVIROLI, D., ARCHER, D. R., BUYTAERT, W., FOWLER, H. J., GREENWOOD, G. B., HAMLET, A. F., ... & 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.

DEVELOPPEMENT D'UN GENERATEUR DE CHAMPS HERTEROGENES DE RESISTIVITE ELEC- TRIQUE ALEATOIRE EN VUE DE L'ENTRAINEMENT D'UN MODELE DE MACHINE LEARNING

GUILLEMET F.¹, CLEMENT R.², LASSABATERE L.¹

¹ ENTPE, UMR 5023 – LEHNA équipe IAPHY, Vaulx-en-Velin, 69518, France, florent.guillemet@entpe.fr

² INRAE, REVERSAAL Research Unit, Villeurbanne, 69626, France

RESUME

Les écoulements préférentiels dans le sol, causés par des hétérogénéités comme les macropores ou les variations de perméabilité, accélèrent l'infiltration de l'eau et le transport des solutés, pouvant réduire la capacité de filtration du sol. La tomographie de résistivité électrique (TRE), a fait ses preuves pour détecter l'infiltration de l'eau, bien que limitée pour la détection des petites hétérogénéités. L'utilisation de modèle de Machine Learning (ML), capables d'apprendre des modèles complexes à partir de données synthétiques, offre une méthode prometteuse pour améliorer l'inversion des données TRE.

Mots clés : *Écoulements préférentiels, tomographie de résistivité électrique, réseaux de neurones*

ABSTRACT

Preferential flow in the soil, caused by heterogeneities such as macropores or variations in permeability, accelerates water infiltration and the transport of solutes, which can reduce the filtration capacity of the soil. Electrical resistivity tomography (ERT) has proven effective in detecting water infiltration, although it is limited in the detection of small heterogeneities. The use of machine learning (ML) models, capable of learning complex models from synthetic data, offers a promising method for improving the inversion of ERT data.

Key words : *Preferential flow, electrical resistivity tomography, neural networks*

INTRODUCTION

Les écoulements préférentiels sont caractérisés par un mouvement rapide et localisé de l'eau et des solutés à travers des zones restreintes du sol et se distinguent ainsi des écoulements matriciels s'opérant au sein de la matrice du sol. Ces écoulements rapides se produisent en présence d'un certain nombre d'hétérogénéités présentes dans le sol. Parmi ces hétérogénéités, les macropores peuvent être des fissures, des galeries de macrofaune telle que les vers de terre, des canaux racinaires, et d'autres vides structurels (Vereecken et al., 2019). D'autres écoulements préférentiels de type entonnoir peuvent se produire autour d'inclusions de matériaux plus grossiers, de capillarité moindre ou de zones de plus faible perméabilité (Di Prima et al., 2020). La présence de chemins préférentiels peut modifier considérablement le temps de séjour de l'eau dans le profil du sol, accélérant ainsi le déplacement de l'eau et des solutés vers les couches plus profondes. Ces phénomènes peuvent, ainsi, diminuer la capacité de filtration du sol et poser un risque pour la qualité des nappes sous-jacentes. La détection des chemins préférentiels de l'eau est donc fondamentale pour comprendre les processus hydrologiques. Dans ce contexte d'infiltration de l'eau dans le sol et de nécessité de détecter les chemins de l'eau, la méthode géophysique de tomographie de résistivité électrique (TRE) a fait preuve de son efficacité (Lu et al., 2022). En effet, cette méthode consiste à mesurer la distribution de la résistivité électrique du sous-sol or la résistivité est, entre autres, sensible aux changements de teneur en eau ou à la structure. Cependant, les mesures de résistivité électrique acquises sur le terrain doivent ensuite être traitées et inversées pour estimer la distribution de la résistivité électrique interprétable. Lors de ce processus d'inversion des effets de lissages ne permettent pas de distinguer les hétérogénéités fines. C'est dans ce contexte que les modèles de Machine Learning (ML) offrent une perspective encourageante (Jamil et al., 2024). Néanmoins, pour leur entraînement, ces modèles ont besoin d'une grande quantité de données. Pour pallier ce problème nous proposons une méthode de génération de champs de résistivité électrique 2D. A notre connaissance il n'existe pas de générateur de champ de résistivité capable de prendre en compte la diversité des hétérogénéités et des chemins préférentiels

présents dans le sol. Notre étude, débouchera sur la création d'un tel générateur, codé en Python, et mis à la disposition de chacun dans une démarche open-source.

MATERIELS ET METHODES

Dans notre générateur, la première source d'hétérogénéité intégrée correspond aux différents horizons de sol possibles, une inclinaison aléatoire de ces couches est également prise en compte. Ensuite, nous intégrons les résistivités induites par des systèmes racinaires de plantes. La base de données des architectures de racines a été générée en amont sur une machine Linux à l'aide du logiciel CPlantBox (Zhou et al., 2019), un logiciel open-source capable de simuler l'architecture de système racinaire de plantes. Une fois cette base de données créée, les autres sources d'hétérogénéité sont rajoutées. Elles comprennent des galeries verticales de vers de terre et des inclusions de matériaux (Tab.1).

Le domaine numérique d'étude est une représentation 2D d'un sol d'une longueur de 3,6 m et d'une profondeur de 1 m. Ce genre de domaine correspond aux dimensions usuelles des acquisitions faites sur le terrain pour le suivi des flux d'eau dans les sols. Le domaine est complété par un dispositif TRE qui se compose de 72 électrodes espacées de 5 cm. Le domaine est quadrillé avec des cellules carrées de 1,25 cm*1,25 cm. Cette résolution nous semble un bon compromis, en première approche, entre finesse du maillage et ressources de calcul nécessaire. Notre démarche consiste à générer de façon aléatoire un très grand nombre de distributions 2D de résistivités électriques mettant en jeu les hétérogénéités susceptibles d'engendrer des écoulements préférentiels (Fig. 1).

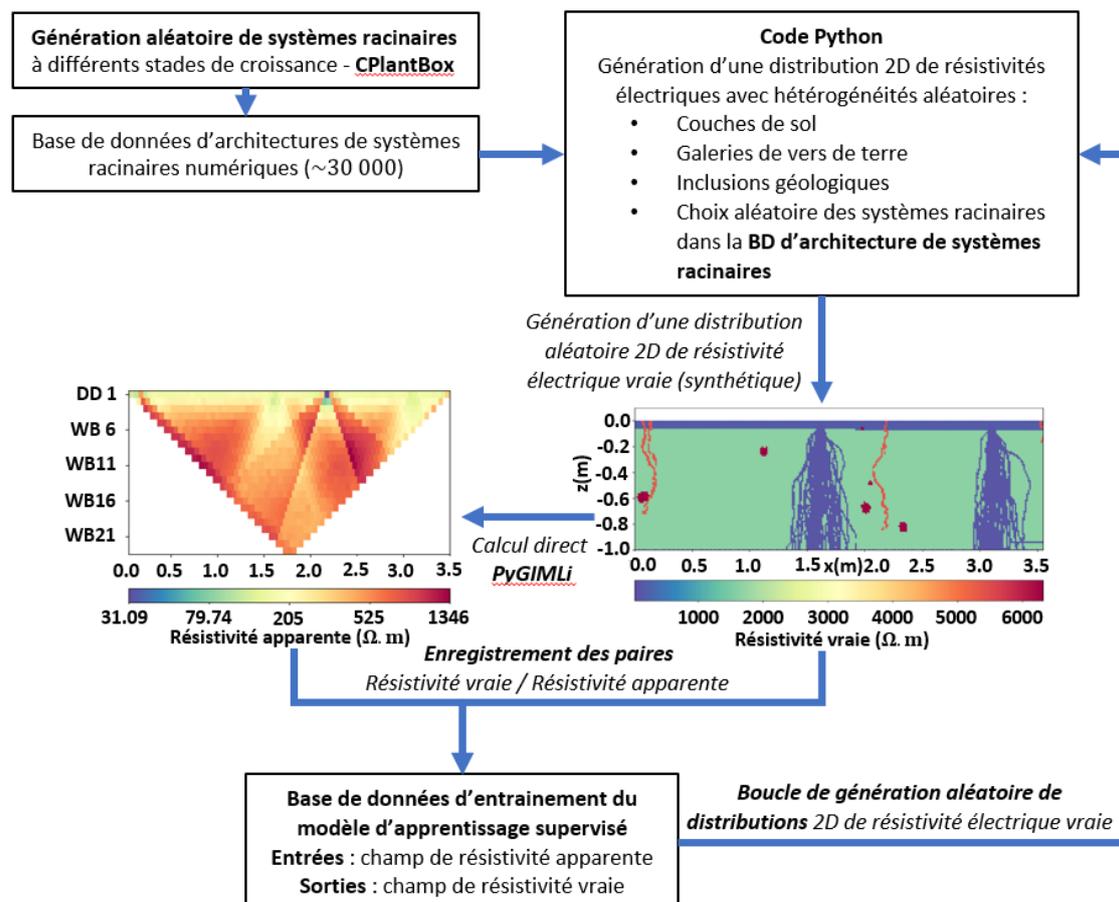


Fig. 1 –Schéma de principe de la procédure de génération des paires Entrée/Sortie pour construire la base d'entraînement du modèle d'apprentissage.

Notre code Python, couplé à la librairie PyGIMLi (Rücker et al., 2017), permet de générer des distributions 2D aléatoires de résistivité électrique faisant apparaître des hétérogénéités telles que des couches de sol différentes, des galeries de vers de terre, des inclusions géologiques et des systèmes racinaires. Chaque type d'hétérogénéité précédemment cité est affecté d'une résistivité électrique vraie, aléatoire (loi uniforme), comprise dans une certaine plage de valeurs (Tab.1). La plage de valeur est définie en fonction du matériau. En outre, notre code permet la parallélisation des processus de génération de chaque champ de résistivité électrique. Le code est exécuté sur une machine virtuelle de 16 cœurs Intel(R) Xeon (R) Gold (3.60 Ghz). La librairie Python, PyGIMLi permet d'obtenir les résistivités apparentes obtenue à l'aide des 72 électrodes pour une séquence Wenner- α .

Hétérogénéités	Tailles caractéristiques	Matériau	Résistivités (Ohm. m)	Nombre généré aléatoirement dans les modèles 2D
Couche de sol Horizon O	0.05 m – 0.4 m (épaisseur)	Couche arable	150 – 250	2 à 4
Couche de sol Horizon A	0.1 m – 1 m (épaisseur)	Argile	1 – 100	
	0.2 (épaisseur)	Sable ou Gravier	1 000 – 5 000	
Couche de sol Horizon B	0.1 m – 1 m (épaisseur)	Argile	1 – 100	
		Sable ou Gravier	1 000 – 5 000	
Couche de sol Horizon R	0 m – 5 m (épaisseur)	Granite ou Basalte ou Grès ou Gabbro	200 – 10 000	
Galerias de vers de terre (sans eau)	9 mm - 20 mm (diam.)	Air	4500 - 5500	0 à 15
Systèmes racinaires	0.24 mm – 20 mm (diam.)	Racine végétale	30 - 150	0 à 4
Inclusions	Rayon entre 5 mm et 5 cm	Granite	200 – 10 000	0 à 10
		Sable	1 000 – 10 000	

Tab. 1 – Tailles caractéristiques et plage de résistivité électrique appliquée pour chaque type d'hétérogénéité.

RESULTATS

Grâce à la parallélisation des processus de génération des modèles 2D, nous avons pu produire 18000 modèles de résistivité vraie aléatoire et leur résistivité apparente en environ 8 jours. La Figure 2 donne quelques exemples de champs de résistivité électrique obtenus et les résistivités apparentes correspondantes. On identifie les anomalies de résistivité apparente liées à la présence des hétérogénéités.

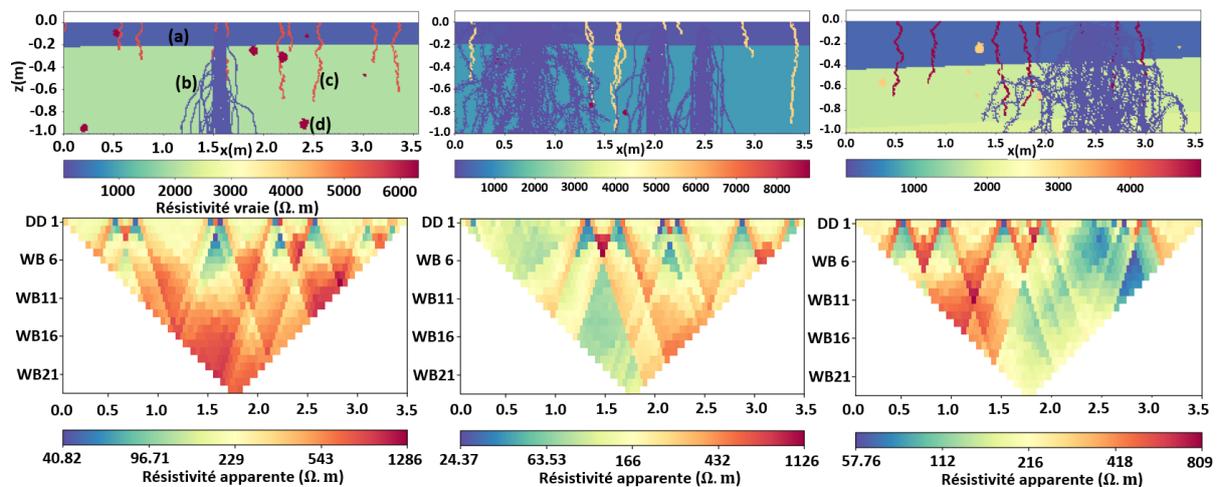


Fig. 2 – Exemples de résultats du générateur. En haut, les résistivités vraies. En bas, les résistivités apparentes. Exemples d'hétérogénéités : (a) Horizon de sol, (b) système racinaire, (c) galerie de ver de terre, (d) inclusion.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La prochaine étape de notre étude sera d'utiliser la base de données générée (paires valeurs de résistivité apparente/résistivité vraie) pour l'apprentissage d'un réseau de neurones et pour tester son efficacité pour la résolution du problème inverse des données de résistivité électrique obtenues à l'aide de notre générateur. Nous envisageons de tester les performances d'un réseau de neurones par convolution (CNN). L'hypothèse est que les réseaux de neurones par convolution, avec leur capacité à apprendre des modèles complexes, sont bien adaptés pour gérer la complexité de l'inversion des données de résistivité 2D en présence de fortes hétérogénéités.

D'un côté, si le CNN donne des inversions satisfaisantes, nous envisageons d'abord d'améliorer les corrélations qui peuvent exister entre les résistivités électriques des différentes hétérogénéités, couches de sol, inclusions et autres. Nous voulons également rajouter des éléments tels que des fissures (e.g., fissures de dessiccation). Ensuite, nous générerons les résistivités électriques par couplage d'un modèle hydrodynamique et de lois pétrophysiques afin de simuler des écoulements préférentiels et leurs impacts sur la résistivité électrique. Cette étape fera la correspondance entre la banque de données générées par le générateur proposé et les situations hydrologiques réelles. Il restera ensuite à démontrer l'efficacité du réseau entraîné à inverser des données réelles de terrain nécessairement bruitées, de sorte à caractériser l'effet du bruit sur la qualité de l'inversion. Enfin, les hétérogénéités ont, en réalité, des géométries 3D, comme les galeries de vers de terre ou les systèmes racinaires, la question se posera alors de la nécessité de passer à des modèles 3D.

D'un autre côté, si les résultats ne sont pas probants nous envisageons plusieurs stratégies : changer la séquence TRE utilisée, réduire le nombre d'hétérogénéités, réduire la résolution des données de sortie du modèle ML, changer les données de sortie pour en réduire la taille en choisissant d'autres valeurs de paramètres d'intérêts tels que la densité de racine ou de galeries de vers de terre, ou encore les positions des hétérogénéités par exemple.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DI PRIMA, S., WINIARSKI, T., ANGULO-JARAMILLO, R., STEWART, R.D., CASTELLINI, M., ABOU NAJM, M.R., VENTRELLA, D., PIRASTRU, M., GIADROSSICH, F., CAPELLO, G., BIDDOCCU, M., LASSABATERE, L., 2020 – Detecting infiltrated water and preferential flow pathways through time-lapse ground-penetrating radar surveys. *Sci. Total Environ.* 726, 138511.
- JAMIL, A., RUCKER, D.F., LU, D., BROOKS, S.C., TARTAKOVSKY, A.M., CAO, H., CARROLL, K.C., 2024 – Comparison of machine learning and electrical resistivity arrays to inverse modeling for locating and characterizing subsurface targets. *J. Appl. Geophys.* 229, 105493.
- LU, D., WANG, H., GENG, N., XIA, Y., XU, C., HUA, E., 2022 – Imaging and characterization of the preferential flow process in agricultural land by using electrical resistivity tomography and dual-porosity model. *Ecol. Indic.* 134, 108498.
- RÜCKER, C., GÜNTHER, T., WAGNER, F.M., 2017 – pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Comput. Geosci.* 109, 106–123.
- VERECKEN, H., WEIHERMÜLLER, L., ASSOULINE, S., ŠIMŮNEK, J., VERHOEF, A., HERBST, M., ARCHER, N., MOHANTY, B., MONTZKA, C., VANDERBORGHT, J., BALSAMO, G., BECHTOLD, M., BOONE, A., CHADBURN, S., CUNTZ, M., DECHARME, B., DUCHARNE, A., EK, M., GARRIGUES, S., GOERGEN, K., INGWERSEN, J., KOLLET, S., LAWRENCE, D.M., LI, Q., OR, D., SWENSON, S., DE VRESE, P., WALKO, R., WU, Y., XUE, Y., 2019 – Infiltration from the Pedon to Global Grid Scales: An Overview and Outlook for Land Surface Modeling. *Vadose Zone J.* 18, 1–53.
- ZHOU, X.-R., SCHNEPF, A., VANDERBORGHT, J., LEITNER, D., LACOINTE, A., VERECKEN, H., LOBET, G., 2019 – CPlantBox, a whole plant modelling framework for the simulation of water and carbon related processes.

MISE EN ŒUVRE ET TRAITEMENT TEMPS-FRÉQUENCE DE MESURES AUDIO-MAGNETO-TELLURIQUE UTILISANT DEUX DIPOLES MAGNETIQUES POUR SOURCES

HARROUET T.¹, SAILHAC P.¹, LEGER E.¹

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

RESUME

Nous avons mené une étude magnéto-tellurique aux fréquences audio avec source contrôlée (CSAMT). Contrairement aux dispositifs CSAMT les plus couramment mis en œuvre, avec une source produite par l'injection d'un courant alternatif via deux électrodes dans le sol, nous avons utilisé une source facilement transportable formée de deux dipôles magnétiques horizontaux. Outre son diagramme de rayonnement et son traitement par analyse temps-fréquence, nous montrons un test in situ d'étude du substratum d'une zone humide du bassin de l'Essonne (Ile-de-France).

Mots clés : audio-magnéto-tellurique avec source magnétique, diagramme de rayonnement, temps-fréquence, substratum, zone humide

ABSTRACT

We conducted a controlled source audio frequency magnetotelluric (CSAMT) study. Unlike the most commonly used CSAMT devices, with a source produced by injecting an alternating current between two electrodes into the ground, we used an easily transportable source formed by two horizontal magnetic dipoles. In addition to its radiation pattern and processing by time-frequency analysis, we show an in situ test to study the bedrock of a wetland in the Essonne Basin (Ile-de-France).

Key words: audio-magneto-telluric with magnetic source, radiation pattern, time-frequency, bedrock, wetland

INTRODUCTION

Dans les études hydrogéologiques de différents contextes géologiques et topographiques, la structure générale de la subsurface nécessite une caractérisation à plusieurs échelles spatiales et à des profondeurs parfois importantes (pouvant aller jusqu'à quelques centaines de mètres). Dans de nombreux cas, ces écoulements s'effectuent le long de chemins préférentiels formés par un réseau de discontinuités (failles, fissures) et sont limités à la base par le substratum qui présente aussi des irrégularités.

Plusieurs méthodes géophysiques permettent une sensibilité à la présence d'eau et aux structures contrôlant l'hydrogéologie dans la subsurface. Parmi celles-ci, les méthodes audio-magnéto-telluriques (AMT) sont des méthodes électromagnétiques en domaine fréquentiel qui permettent une investigation à plus grande profondeur que des méthodes plus courantes telles que la tomographie de résistivité électrique (ERT) : plusieurs centaines de mètres en AMT contre quelques dizaines en ERT. La mise en œuvre d'une acquisition AMT en utilisant aussi une source contrôlée (CS-AMT) permet de raccourcir la durée d'une campagne de mesures, mais nécessite une plus lourde logistique liée à l'installation et la maintenance d'un émetteur.

Nous présentons une application à l'étude hydrogéologique de la zone humide de Jarcy dans le bassin de l'Essonne (Ile-de-France), dont une étude précédente a fourni une première section électrique présentant des incertitudes sur le substratum. Nous présentons nos premiers résultats HSAMT (HS pour « Hybrid-Source ») avec le traitement spécifique lié à la source formée de deux dipôles magnétiques horizontaux.

METHODE

Principe des méthodes CSAMT

Les méthodes AMT sont, comme les méthodes magnéto-telluriques (MT), basées sur la réponse de la subsurface aux variations basses fréquences du champ magnétique, réponse liée aux propriétés électriques du sous-sol. On utilise le tenseur d'impédance MT du milieu, qui est défini par le rapport entre l'amplitude des champs électrique et magnétique mesurés en un même point : $Z_{xy} = E_x/H_y$, où les indices indiquent la direction des composantes des champs. À partir de l'impédance, on détermine la résistivité apparente (Cagniard, 1953) qui dépend de la fréquence du signal f (via pulsation $\omega = 2\pi f$) et de la perméabilité magnétique du vide ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$) : $\rho_a = \frac{|Z|^2}{\omega\mu}$.

En pratique, on mesure des séries temporelles des composantes horizontales des champs électriques et magnétiques, puis on obtient par transformée de Fourier les valeurs de E_x , E_y et H_x , H_y qui seront utilisées par inversion pour déterminer le tenseur d'impédance conduisant entre autres aux valeurs de résistivité apparente. Les signaux électromagnétiques naturels sont intermittents, aussi leur utilisation en AMT peut nécessiter de longs enregistrements et des traitements complexes, en particulier pour détecter et utiliser des signaux issus d'orages lointains et dont le contenu spectral est dans la bande spectrale de faible activité aux environs de 1-10 kHz (Larnier et al., 2018).

L'utilisation d'une source artificielle (CSAMT) permet d'augmenter l'amplitude des signaux en contrôlant les fréquences, durées, et polarisations d'émission (Zonge and Hughes, 1991). Les dispositifs classiques de CSAMT utilisent une source électrique par injection d'un courant alternatif entre paires d'électrodes dans le sol ; outre la longueur, l'orientation, et l'éloignement des dipôles émetteurs, il faut aussi les placer dans un sol suffisamment conducteur pour permettre l'injection du courant (Lajaunie et al. 2024). De manière alternative aux dipôles électriques enterrés, on peut utiliser une source composée de dipôles magnétiques, l'émetteur EH4 de Geometrics.

Emission par des dipôles magnétiques horizontaux

L'émetteur EH4 (Geometrics, 2000) est une source composée de deux dipôles magnétiques de $400 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ fonctionnant avec 14 fréquences dans la bande audio (800 Hz – 64 kHz). L'émission est alternativement sur un dipôle magnétique puis sur un autre dans une direction perpendiculaire (Fig. 1), permettant un rayonnement alternativement dans deux polarisations (avec plusieurs composantes d'émission H_x puis H_y). Ainsi, on apporte suffisamment d'information pour déterminer les différences composantes du tenseur d'impédance.

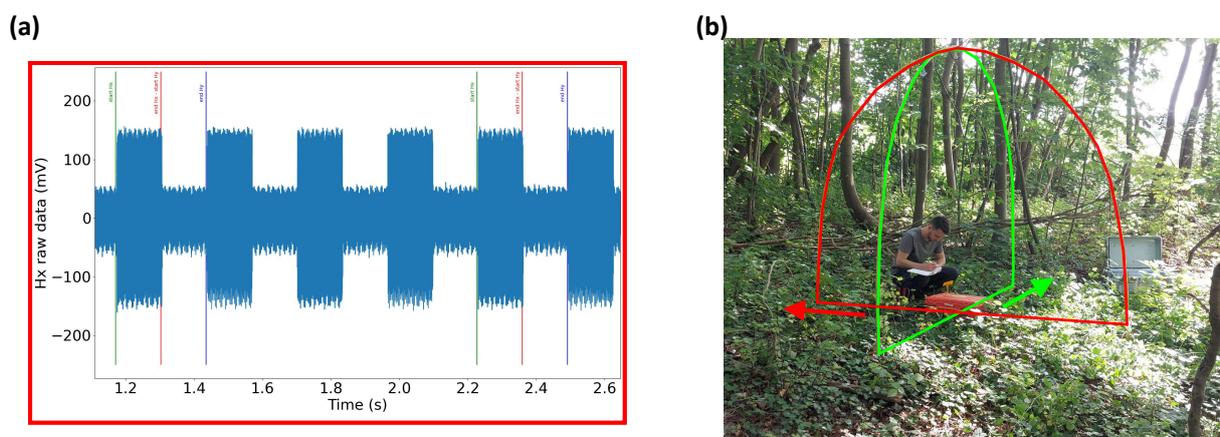


Fig. 1 – Une source composée de deux dipôles magnétiques : (a) extrait d'une séquence de mesures ; (b) photo de l'émetteur EH4 sur le terrain.

Site test

La zone humide de Jarcy dans le bassin de l'Essonne (Ile-de-France) a d'abord été étudiée dans le cadre d'une recherche pour comprendre le rôle des échanges nappe-rivière et nappe-végétation dans l'évolution du niveau de nappe au cours des saisons (Renaud, 2023). Dans le cadre de ce travail, un profil ERT a conduit à une section de résistivité électrique sur laquelle on est en limite de sensibilité pour imaginer le toit de la zone résistive des calcaires de Champigny située sous le marais (Fig. 2). Une première campagne CSAMT a été conduite proche de ce profil, avec un émetteur EH4 (Geometrics) placé à l'Est et des systèmes de mesure ADU avec sonde magnétique SHFT02 (Metronix) placées à différentes distances (Fig. 2).

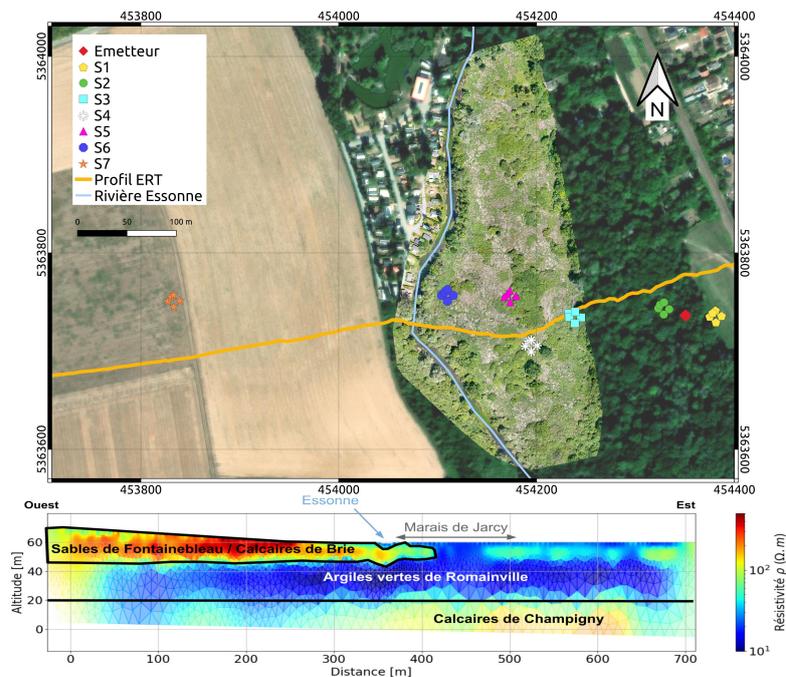


Fig. 2 – Zone humide de Jarcy : photo aérienne et positionnement des stations de mesures AMT et de l'émetteur EH4 proches d'un profil ERT issu de la thèse d'Adrien Renaud (2023).

Traitement

L'analyse des séries temporelles du site le plus proche de l'émetteur a permis d'identifier les séquences d'émission (fréquences, polarisation, dates de début et fin de chaque cycle) à partir d'une analyse temps-fréquence (Fig. 3). Cette identification des séquences a permis la sélection des données utilisées pour l'estimation des composantes du tenseur d'impédance pour chaque fréquence.

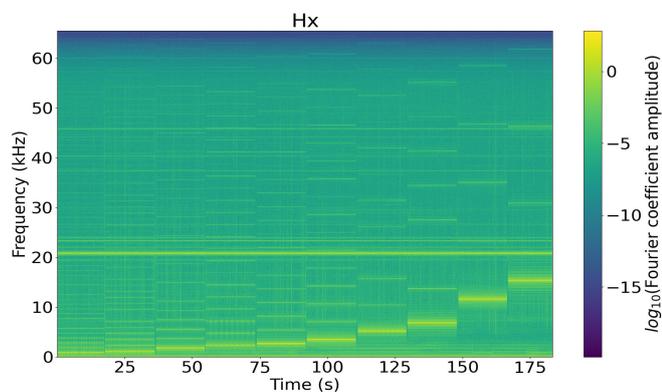


Fig. 3 – Analyse temps-fréquence du champ magnétique rayonné : mise en évidence des fréquences des ondes incidentes à utiliser pour le calcul des impédances AMT.

Résultats

Parmi les premières stations de mesures, quatre d'entre elles (sites 3, 4, 5 et 6) ont permis d'estimer des résistivités apparentes CSAMT, comprises entre 10 et 250 $\Omega.m$ pour des fréquences entre 1 et 50 kHz. Il s'agit de celles qui se situent à une distance d'environ 100 à 250 m de l'émetteur comme on peut le voir sur un diagramme de rayonnement donnant le champ magnétique incident calculé par une formulation analytique considérant un demi-espace de résistivité constante (Fig. 4).

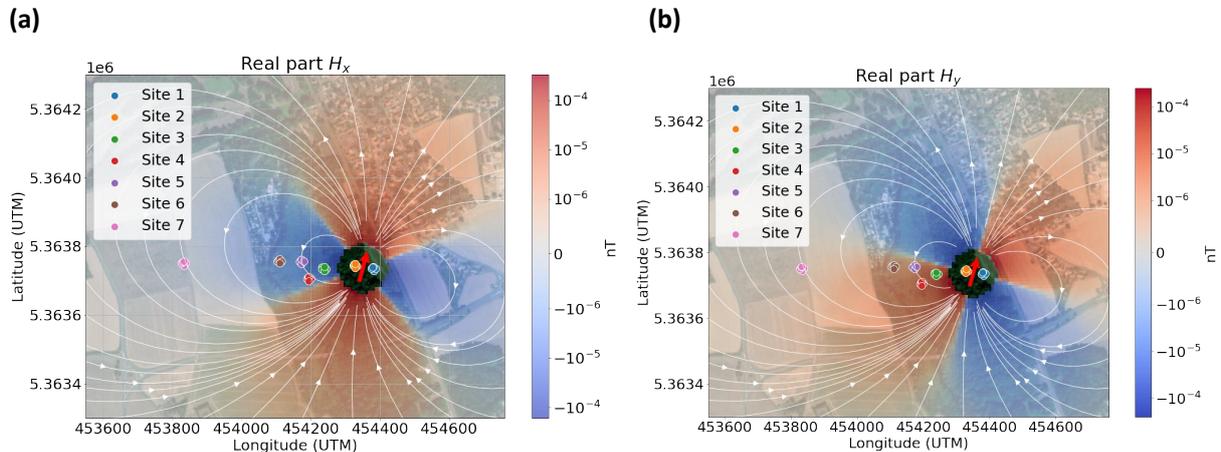


Fig. 4 – Diagramme de rayonnement avec le positionnement des stations de mesures AMT et de l'émetteur EH4 pour la polarisation dans la direction du Nord ; (a) partie réelle de la composante H_x , (b) partie réelle de la composante H_y .

CONCLUSIONS

Les premiers sondages de résistivité apparente CSAMT peuvent être comparés à des sondages synthétiques basés sur un modèle tabulaire simplifié ressemblant à celui de la section ERT. Néanmoins il reste encore des étapes d'amélioration de l'estimation des impédances et des tests à faire aussi des stations réparties dans d'autres zones du diagramme de rayonnement. Enfin seule l'antenne composée de dipôles magnétiques de 400 A.m² a été utilisée, une autre antenne plus puissante doit pouvoir étendre la portée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAGNIARD L., 1953 – Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18 (3), 605-635.

GEOMETRICS, 2000 – Operation manual for Stratagem systems running IMAGEM. Ver 2.16

LAJAUNIE M., GANCE J., SAILHAC P., MALET J.P., WARDEN S., LARNIER H., 2024 – Hydrogeological structure of a granitic mountain catchment inferred from multi-method electrical resistivity datasets. *Near Surface Geophysics* 22, 26-41.

LARNIER H., SAILHAC P., CHAMBODUT A., 2018 – Detection and characterization of lightning-based sources using continuous wavelet transform: application to audio-magnetotellurics. *Geophysical Journal International* 212 (1), 103-118.

RENAUD A., 2023 – Compréhension du fonctionnement hydrologique et géochimique d'une zone humide riparienne : cas du marais de Jarcy (Essonne, France), Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, soutenue le 21/02/2023.

ZONGE K.L., HUGHES L.J., 1991 – Controlled source audio-frequency magnetotellurics. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 2, Application, Parts A and B., 713-810. Society of Exploration Geophysicists

LE LABORATOIRE SOUTERRAIN A BAS BRUIT (LSBB) : UN CENTRE DE RECHERCHE UNIQUE AU SERVICE DE LA GEOPHYSIQUE.

LÁZARO ROCHE, I.^{1*,2}, BOYER, G.^{1,3}, DECITRE, J.B.^{1,2}, GOUT, S.^{1,4}, PINON, J.^{1,2}, RISSO, C.^{1,2}, MICOLAU, G.^{1,4}

¹ Laboratoire Souterrain à Bas Bruit CNRS-AU UAR3538, Rustrel, France, *ignacio.lazaro@lsbb.eu

² Centre National de la Recherche Scientifique, France

³ Université Côte d'Azur, Nice, France

⁴ Avignon Université, Avignon, France

RESUME

Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) est un centre de recherche interdisciplinaire situé dans le Parc du Luberon. Ancien site militaire, il offre des conditions idéales pour l'étude géophysique et hydrogéologique. Son environnement unique permet l'analyse des réservoirs karstiques et le développement d'instruments scientifiques ultra-sensibles. Son isolement électromagnétique et sismique facilite la recherche en gravimétrie et sismologie. Grâce à ses équipements modernes et à son expertise, il accueille des projets d'envergure évolutive.

Mots clés : *laboratoire ; souterrain ; bas bruit ; interdisciplinaire*

ABSTRACT

The Low-Noise Underground Laboratory (LSBB) is an interdisciplinary research center located in the Luberon Natural Park. Originally a military site, it offers ideal conditions for geophysical and hydrogeological studies. Its unique environment enables the analysis of karstic reservoirs and fosters the development of ultra-sensitive scientific instruments. Its electromagnetic and seismic isolation facilitates research in gravimetry and seismology. Thanks to its modern equipment and know-how, it can host scalable and evolving projects.

Key words: *laboratory, underground, low-noise, interdisciplinary*

INTRODUCTION

Situé sur la commune de Rustrel dans le Vaucluse, le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) associe un ensemble antiatomique en souterrain et en surface à visée offensive, fruit du système de dissuasion nucléaire française pendant la guerre froide, à un environnement géologique, électromagnétique et hydrogéologique à l'écart des activités humaines permettant l'ouverture de nouveaux champs fructueux d'investigation. La synergie résultante entre infrastructure physique et environnement fait du LSBB un laboratoire recherche aux capacités scientifiques uniques au monde.

Cette communication a pour objectifs (i) de présenter les caractéristiques et spécificités du LSBB qui justifient son haut potentiel pour la recherche interdisciplinaire, multi-échelle, haute-sensibilité en termes d'équipement, localisation, infrastructure et (ii) de donner un aperçu de ses activités en lien avec la géophysique des sols et des formations superficielles.

1. Un positionnement unique

Les laboratoires souterrains européens sont généralement associés à des infrastructures industrielles qui favorisent une coactivité économique à leur proximité (e.g., tunnels ferroviaires et routiers, stockage souterrain, mines). Une présentation des principaux centres européens est disponible en annexe 1.

Créé en 1997, le LSBB est implanté au cœur du parc naturel régional du Luberon. D'abord destiné à un usage militaire, ses infrastructures souterraines aux caractéristiques hors-norme ont progressivement été transformées en un laboratoire de recherche dont les travaux, menés depuis plus de 25 ans, ont enrichi les connaissances et les compétences dans de nombreux domaines scientifiques. Ce site remarquable, aux propriétés physiques exceptionnelles, est inscrit depuis 2012 au patrimoine architectural du XX^e siècle. Le LSBB est une Unité d'Appui et de Recherche (UAR3538) depuis 2024 sous la tutelle d'Avignon Université et du CNRS.

Situé au sein du plus grand aquifère karstique d'Europe (la Fontaine de Vaucluse), le LSBB permet d'étudier *in situ* les impacts des changements globaux, tels que le changement climatique, sur les ressources en eau souterraines. Par ailleurs, l'analyse des propriétés du réservoir géologique, depuis sa formation jusqu'à son évolution actuelle, contribue à améliorer l'exploitation de réservoirs pétroliers analogues au Moyen-Orient. Grâce à son environnement physique à très faible bruit anthropique – une particularité du LSBB par rapport aux autres laboratoires souterrains – il offre des conditions idéales pour des mesures et observations de haute précision ainsi que pour le développement de capteurs d'une sensibilité extrême.

Cette introduction met en avant deux axes structurants du LSBB :

- Les réservoirs géologiques carbonatés et les ressources hydriques karstiques : le LSBB permet des recherches majeures ayant des implications directes sur la gestion durable des ressources en eau souterraines des pays périméditerranéens, la modélisation des dynamiques des réservoirs carbonatés et la compréhension des processus physiques multi-échelles de la zone critique.

- L'environnement à bas bruit du LSBB, en surface et en profondeur : ce cadre unique offre des conditions exceptionnelles pour l'étude de processus physiques et la détection de signaux de très faible amplitude. Il constitue également un site privilégié pour le développement de capteurs, de protocoles de mesure et de technologies d'imagerie visant des sensibilités et résolutions extrêmes.

2. Caractéristiques

Le LSBB repose sur trois caractéristiques physiques qui en font un site adapté pour la recherche en environnement, technologies et sciences sociétales :

- Une infrastructure souterraine et de surface avec un accès subhorizontal de ≈ 4.3 km et des configurations expérimentales tridimensionnelles multi-échelles, sous une couverture rocheuse variant de quelques mètres à plus de 500 m.

- Un environnement géologique et hydrogéologique représentatif des aquifères méditerranéens, où le karst joue un rôle clé dans l'alimentation en eau des plaines environnantes.

- Un environnement à très faible bruit anthropique, préservé des pollutions mécaniques, acoustiques et électromagnétiques, entre les parcs naturels régionaux du Luberon et Mont-Ventoux, à plus de 20 km des zones urbanisées et industrialisées.

Le LSBB offre des conditions d'accueil pour la R&D, grâce à son infrastructure comprenant des galeries souterraines rectilignes quasi-kilométriques, de nombreux puits de forage, ainsi que des salles avec une stabilité thermique et sismique extraordinaire, espaces isolés ou blindés électromagnétiquement, allant de 50 m³ à plus de 1250 m³, jusqu'à 518 m de profondeur. L'exploitation et l'évolution du LSBB sont assurées par une équipe spécialisée, garantissant une modernisation continue et un suivi optimal des activités. Cette organisation favorise une recherche multidisciplinaire, depuis les études fondamentales jusqu'à leurs applications industrielles et sociétales.

3. Thématiques de recherche.

Ce cadre unique permet la conduite de projets de recherche de pointe, le développement d'instruments de haute sensibilité et de protocoles de mesure, ainsi que l'observation multi-physique à haute résolution, tout en favorisant la mise en place de plateformes R&D dédiées aux caractérisations avancées. Le LSBB a rendu possible ou contribué à plus de 400 publications scientifiques interdisciplinaires [1].

Réservoirs géologiques carbonatés et ressources hydriques karstiques

L'étude et la gestion optimale des ressources en eau constituent un enjeu majeur, en particulier pour la Fontaine de Vaucluse, un site emblématique des aquifères karstiques méditerranéens. Comprendre le fonctionnement de cette ressource essentielle, tant à court qu'à long terme, est crucial pour la biosphère, la société et l'humanité.

Le LSBB joue un rôle central dans ces recherches, qui s'appuient sur des expérimentations, des instruments de mesure et des observations multi-échelles *in situ* au sein de la zone critique. L'objectif est de développer des outils et des approches transdisciplinaires permettant d'accroître les connaissances et les compétences dans plusieurs domaines :

- L'analyse de la dynamique des transferts dans la zone critique et l'impact du changement climatique,
- L'étude des propriétés mécaniques, hydromécaniques et de porosité-perméabilité du réservoir,
- La compréhension de l'architecture multi-échelles du réservoir depuis sa formation,
- L'analyse des processus couplés impliquant des interactions thermo-hydro-biologiques, mécaniques et chimiques.

Environnement bas bruit multiphysique en surface et en profondeur

L'identification et la caractérisation de signaux de faible amplitude nécessitent un environnement à faible bruit et des instruments d'une sensibilité extrême, un défi technologique majeur. De plus, une approche multiphysique est indispensable pour distinguer les signaux d'intérêt des interférences et artefacts liés aux capteurs et à leur couplage avec leur milieu.

Grâce à des mesures complexes, le LSBB explore des couplages et phénomènes variés, tels que :

- Les interactions sismo-hydro-magnétiques et sismo-ionosphériques,
- Les processus thermo-hydro-mécaniques,
- Les phénomènes électromagnétiques transitoires de haute énergie dans l'atmosphère,
- Les fluctuations multi-échelles de la Terre (gravitation, déformation, vibration, rotation),
- L'étude des signaux électromagnétiques dans la bande gamma du cerveau, en lien avec la recherche sur les maladies neurodégénératives.

Ce cadre de recherche permet d'accueillir des plateformes de référence dédiées :

- À la caractérisation du bruit intrinsèque des capteurs,
- À l'étalonnage des mesures issues de technologies variées,
- À l'intégration de plateformes de caractérisation avancée, notamment optique et électromagnétique,
- Au développement de méthodologies de mesure haute sensibilité adaptées aux environnements bas bruit,
- À la maîtrise du monitoring multi-physique des environnements de mesure sensibles.

CONCLUSIONS

Le LSBB est un laboratoire de recherche unique offrant des conditions idéales pour l'étude des réservoirs hydrogéologiques, le développement d'instruments ultra-sensibles et l'observation de signaux de très faible amplitude. Son environnement exceptionnel et son expertise reconnue en font un site privilégié pour des collaborations scientifiques interdisciplinaires de toutes dimensions et ouvert à de nouveaux projets et partenariats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. COLLECTION D'ARTICLES DU LSBB

<https://cnrs.hal.science/LSBB>

ANNEXE 1

Laboratoires sans coactivité ou activité économique à proximité

Laboratoire dédié aux études sur le stockage des déchets radioactifs en souterrain

Tournemire Clayey Toarcian formation; IRSN, FR (-250 m)

www.irsn.fr/dechets/recherche/outils/tournemire

Laboratoire souterrain à bas bruit

LSBB Urgonian (carbonate); CNRS, FR (0 to -500 m)

lsbb.cnrs.fr

Laboratoires avec coactivité ou activité économique à proximité

Laboratoires dédiés à la physique des particules haute énergie et/ou à la recherche de la matière noire

LSM Sed. cover, piedmontese area of the alpin arc schistes lustrés, highway Modane-Bardonnèche; CNRS, FR (-1700 m)

www-lsm.in2p3.fr

Canfranc Carbonate limestone, Somport tunnel highway Pau-Canfranc-Saragosse; Univ. Saragosse, SP (-850 m)

www.lsc-canfranc.es/en/index.html

Gran Sasso Limestones, saturated zone of aquifers, tunnel highway Roma-l'Aquila-Teramo; INFN, IT (-1400 m)

www.lngs.infn.it

Boulby Potash, polyhalite and rock-salt mine; STFC, UK (-1100 m)

stfc.ukri.org/about-us/where-we-work/boulby-underground-laboratory

Pyhäsalmi Zinc, copper and pyrites mine; CUPP, FI (-1440 m)

www.cupp.fi

CERN Molasses and carried molasses; CERN, CH (-100 m)

home.cern

Laboratoires dédiés à l'énergie géothermale

BULG Granite, former ventilation arm of Furka railway tunnel; Matterhorn-Gotthard-Bahn/ETH Zurich, CH (-1500 m)

www.bedrettolab.ethz.ch/about/scope

Laboratoires dédiés aux études sur le stockage des déchets radioactifs en souterrain

Bure Calovo-Oxfordian indurated clays, descenderies verticales surface-fond; ANDRA, FR (-450 to -500 m)

meusehautemarne.andra.fr

Onkalo Granite (tonalite) – Olkiluoto Research Tunnel; Posiva, Finland (-500 m)

www.posiva.fi/en/final_disposal/onkalo

Aspö Granite, include former iron mine – HRL, Hard Rock Laboratory; SKB, SW (-200 to -460 m)

www.skb.com

HADES (Mol) Boom Clay (plastic clay) – High-Activity Disposal Experiment Site URL; GIE EURDICE, BE (-230 m)

science.sckcen.be/en/Facilities/HADES

Asse Permian rock salt anticline; GSF, GE (mining levels -490 to -800 m, cavern -950 m)

www.endlager-asse.de/cln_135/EN/1_Home/home_node.html

Gorleben Salt dome; BFS, DBE, GE (below -900 m)

www.bfs.de/en/endlager/erkundungsbergwerk_gorleben

Konrad Limestone, former Fe mine; BFS, DBE, GE (-800 to -1300 m)

www.endlager-konrad.de/cln_117/DE/Home/home_node.html_nnn=true

Morsleben (ERAM) Salt dome, K/salt mine; BFS, DBE, GE (below -525 m)

www.bfs.de/en/endlager/endlager_morsleben

Grimsel (GTS) Granite; Nagra, CH (-450 m)

www.grimsel.com

Mont Terri Opalinus Clay; SWISSTOPO, CH (-400 m)

www.mont-terri.ch

INVERSION TRANSDIMENSIONNELLE DE RÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES APPLIQUÉE AUX MILIEUX FRACTURÉS

LELIMOUZIN L.¹, CHAMPOLLION C.², ROUBINET D.³

¹ Géosciences Montpellier, Montpellier, France, lea.jelimouzin@umontpellier.fr

² Géosciences Montpellier, Montpellier, France, cedric.champollion@umontpellier.fr

³ Géosciences Montpellier, Montpellier, France, delphine.roubinet@umontpellier.fr

RESUME

La caractérisation des fractures présentes dans les sous-sols est essentielle pour comprendre la circulation des fluides. Ces structures peuvent être identifiées par contraste de résistivités électriques avec la matrice. L'inversion des données nécessitant le développement de stratégies adaptées, nous proposons de définir la géométrie des réseaux fracturés par une approche stochastique transdimensionnelle basée sur une représentation discrète des fractures.

Mots clés : inversion, rj-McMC, ERT, fracture

ABSTRACT

Characterizing underground fractures is essential to understand fluid circulations. These structures can be identified by electrical contrast with the host matrix. As data inversion required the development of appropriate strategies, we propose to define the geometry of fracture networks using a transdimensional stochastic approach, based on a discrete representation of the fractures.

Key words: inversion, rj-McMC, ERT, fracture

INTRODUCTION

La présence de fractures, ou chemins préférentiels, contrôle la circulation des fluides dans le sous-sol. Leurs localisation et caractérisation sont donc déterminantes pour de nombreux domaines en Géosciences (sites et sols pollués, géothermie, stockages géologiques, etc.).

Pour les imager, la méthode géophysique de tomographie de résistivité électrique (ERT) est particulièrement adaptée dans le cas de sites présentant un fort contraste en résistivité entre la fracture, i.e. le fluide circulant dans la fracture, et la matrice. Bien que de nombreux modèles d'inversion soient disponibles, la détection de fines géométries est limitée par l'échelle des mesures et les contraintes de lissage qui les homogénéisent (Parsekian et al., 2015). Une possibilité pour y remédier est d'adapter la manière d'inverser aux structures observées. Plutôt que l'utilisation traditionnelle de pixels, la méthode de double porosité discrète (DDP) permet la représentation explicite des

fractures par des segments (Roubinet & Irving, 2014). L'inversion DDP récemment développée se base sur un algorithme d'optimisation de recherche globale qui localise une fracture après l'autre (Lelimouzin et al., 2024). Le caractère non réversible de la procédure entraîne un biais des premières fractures sur le modèle DFN final (discrete fracture network). Nous proposons d'améliorer ce schéma en utilisant un algorithme stochastique de transdimension, aussi appelé reversible-jump Markov chain Monte Carlo (rj-McMC), afin de garantir la réversibilité du réseau.

La transdimension est une méthode d'inversion bayésienne dont le nombre d'inconnus varie au cours du processus. Son utilisation en géosciences a déjà fait l'objet de nombreuses applications, notamment en tomographie sismique (e.g., Bodin & Sambridge, 2009). Elle est cependant relativement récente dans le cas de l'ERT (Galetti & Curtis, 2018). Quelques études se basent sur des données de tomographie sismiques (e.g., Feng & Nasser, 2024) ou hydrauliques (e.g., Somogyvari et al., 2017) pour optimiser la géométrie de réseaux DFN. Néanmoins, l'application de la transdimension à l'identification de fractures reste peu répandue et non appliquée aux données ERT.

MÉTHODOLOGIE

Principe général

L'algorithme rj-McMC développé par Green (1995) est dérivé de l'algorithme McMC (Markov chain Monte Carlo) qui consiste à échantillonner une fonction de densité de probabilité (PDF), i.e. une variable aléatoire, « a posteriori » représentant le modèle final visé, et par définition inconnu. Elle est reliée à une PDF représentant les informations connues a priori (i.e., tout ce qui est connu sur le modèle avant de réaliser l'inversion) via la vraisemblance (ou likelihood, comparant modèle a posteriori et données mesurées) selon le théorème de Bayes.

Les PDFs ne peuvent pas être exprimées sous forme analytique nécessitant des outils numériques pour estimer la fonction en différentes positions de l'espace des paramètres du modèle. Le modèle direct est résolu pour chacune de ces positions. Afin de réduire les temps de calculs, la méthode McMC propose une alternative pour échantillonner la PDF a posteriori. Au lieu de tester toutes les positions, un ensemble de positions (d'échantillons) est généré de façon itérative. Chaque échantillon est relié au précédent par une perturbation formant ainsi une chaîne de Markov. En d'autres termes, le réseau DFN proposé à chaque itération est une actualisation de la géométrie du réseau retenue à l'itération précédente.

Procédure d'inversion DFN

Le processus d'inversion se divise en deux grandes étapes (i) proposer un nouveau modèle, (ii) accepter ou rejeter la proposition selon un critère d'acceptation (ratio d'acceptation). Contrairement à l'algorithme McMC traditionnel, le rj-McMC a la particularité d'autoriser le changement de dimension du problème en *sautant* d'une dimension de l'espace des paramètres à une autre lors de l'ajout ou la suppression d'une fracture. Ainsi, cinq types de perturbations peuvent être appliquées de façon aléatoire au modèle DFN initial : « *death* »

supprime une fractures, « *birth* » ajoute une fracture, « *move* » déplace une fracture, « *length* » modifie la longueur d'une fracture, et « *noise* » modifie l'incertitude associée aux données observées. La perturbation est acceptée selon la valeur du ratio d'acceptation qui fait intervenir la différence entre données observées et données simulées (misfit), ainsi que la vraisemblance associée à la perturbation (likelihood). La **Figure 1** schématise les principales étapes de l'inversion.

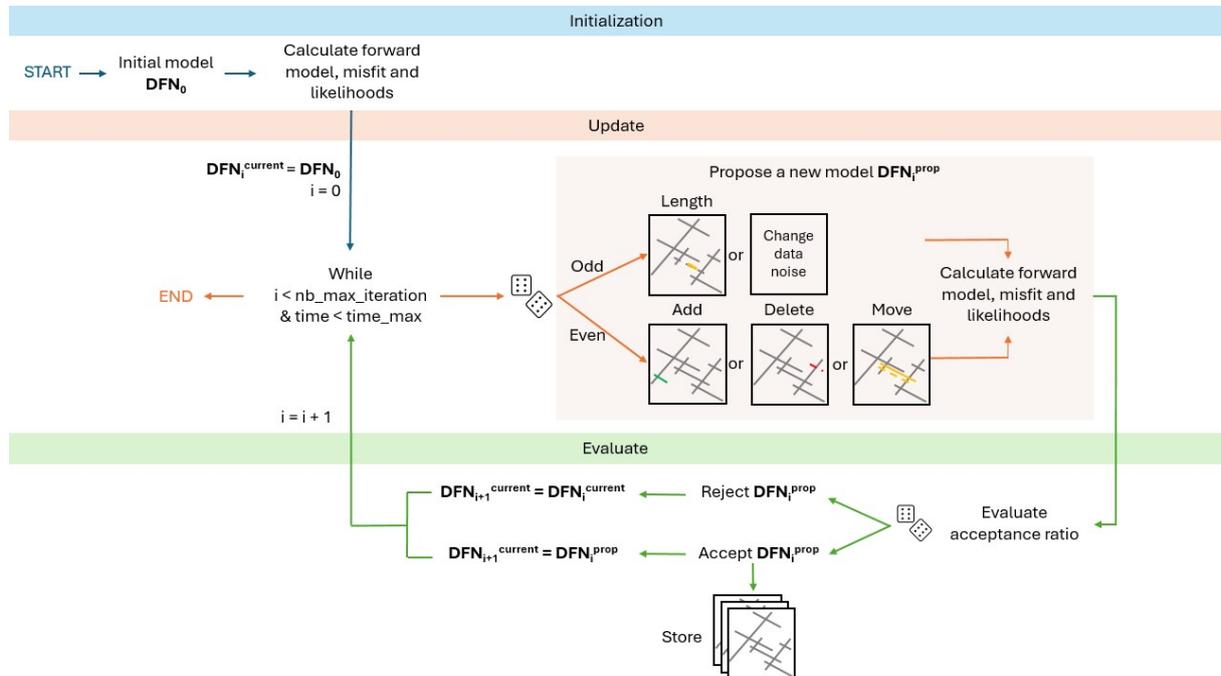


Fig. 1 -Schéma synthétique de l'inversion transdimensionnelle pour une seule chaîne de Markov.

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

L'algorithme rj-McMC a été appliqué à un jeu de données provenant d'un aquifère contaminé. Afin de dépolluer l'aquifère, un agent chimique de remédiation in-situ a été injecté. Un dispositif d'ERT entre forages a permis le suivi de la propagation du dépolluant. L'agent chimique ayant la caractéristique d'être peu résistant par rapport à la matrice environnante, des chemins préférentiels horizontaux ont pu être identifiés (Lelimouzin et al., 2024). Les résultats préliminaires de l'inversion transdimensionnelle de ces données sont présentés en **Figure 2**. On observe une variation du nombre de fractures et de leurs caractéristiques entre le modèle initiale et le modèle à l'itération 475 (par exemple) pour les 6 chaînes de Markov lancées en parallèle. Une zone densément fracturée commune à toutes les chaînes semblent se maintenir au fil des itérations entre 16 m et 17 m de profondeur au niveau des puits E7 à E9.

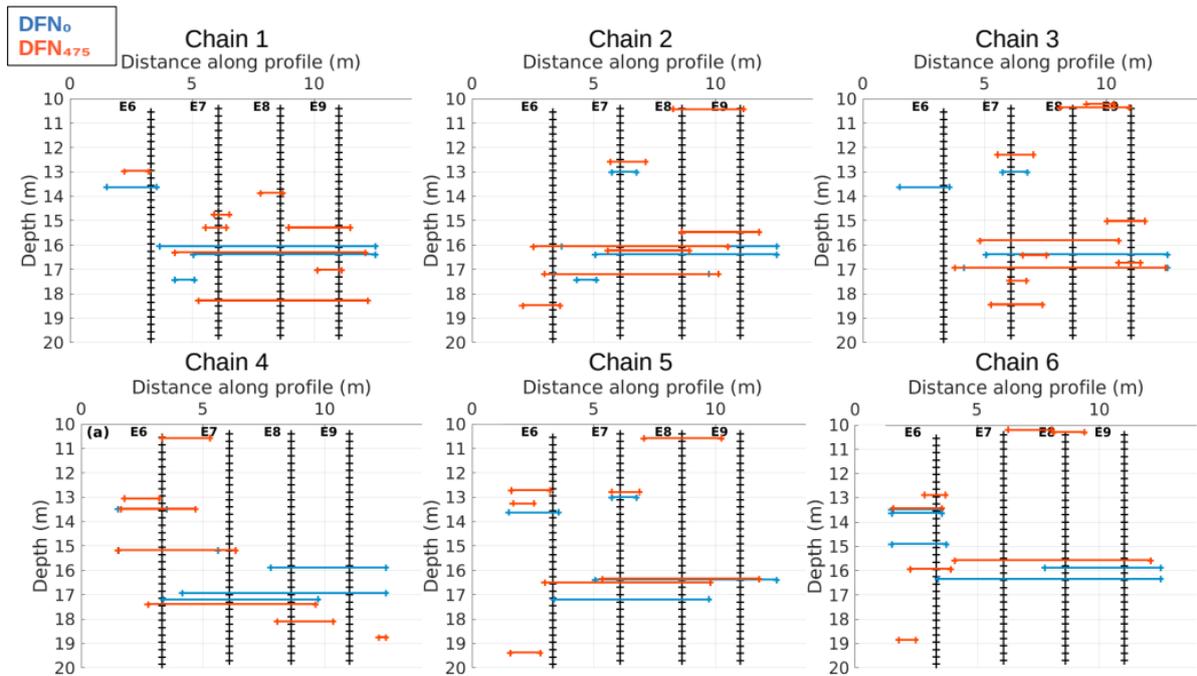


Fig. 2 - Coupes superposant le modèle DFN initial (DFN_0) et le modèle accepté à l'itération 475 (DFN_{475}) pour 6 chaînes de Markov. Les croix noires indiquent la position des électrodes de mesures le long de 4 puits référencés E6, E7, E8 et E9.

CONCLUSIONS

L'inversion transdimensionnelle en développement est prometteuse pour l'identification et la caractérisation des réseaux de fractures. Un travail sur le taux d'acceptation, le choix du modèle initial et des paramètres à inverser est en cours. Cette méthode a l'avantage de proposer un nombre minimal de fractures expliquant les données, et d'évaluer l'incertitude associée aux modèles proposés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BODIN T., SAMBRIDGE M., 2009** - Seismic tomography with the reversible jump algorithm. *Geophysical Journal International*, 178, 1411-1436.
- FENG R., NASSER S., 2024** - Stochastic inversion of fracture networks using the reversible jump Markov chain Monte Carlo algorithm. *Energy*, 301.
- GALETTI E., CURTIS A., 2018** - Transdimensional Electrical Resistivity Tomography. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 6347-6377.
- GREEN P. J., 1995** - Reversible jump Markov chain Monte Carlo computation and Bayesian model determination. *Biometrik*, 82 (4), 711-732.
- LELIMOZIN L., CHAMPOLLION C., LEVY L., ROUBINET D., 2024** - Preferential pathways inversion from cross-borehole electrical data. *Geophysical Research Letters*, 51.
- ROUBINET D., IRVING J., 2014** - Discrete-dual-porosity model for electric current flow in fractured rock. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119.
- SOMOGYVARI M., JALALI M., PARRAS S. J., BAYER P., 2017** - Synthetic fracture network characterization with transdimensional inversion. *Water Resour. Res.*, 53, 5104-5123.

DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UN NOUVEL ALGORITHME D'INVERSION PROBABILISTE DE DONNEES GEOMAGNETIQUES ACQUISES EN 3D

LIU Y.¹, LEVEQUE F.¹

¹ Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs) - UMR 7266, CNRS, La Rochelle Université, La Rochelle, France, yu.liu1@univ-lr.fr

RESUME

Afin de résoudre l'incertitude liée à l'évaluation de la profondeur des sources dans les études géomagnétiques, un nouvel algorithme d'inversion probabiliste 3D est proposé, fondé sur la variation verticale du champ géomagnétique. Basé sur le recuit simulé avec raffinement hiérarchique, il permet une reconstruction efficace de la géométrie des sources souterraines. Des tests sont conduits sur des données synthétiques auxquelles est rajouté un bruit gaussien. Les résultats de l'études montrent la robustesse de l'algorithme en matière de localisation et de caractérisation de la source.

Mots clés : *Inversion probabiliste, modélisation 3D, prospection géomagnétique, analyse spatiale, apprentissage automatique*

ABSTRACT

To resolve the uncertainty associated with the evaluation of source depths in geomagnetic surveys, we've proposed a new probabilistic 3D inversion algorithm utilizing the vertical variation of geomagnetic field. Based on simulated annealing with hierarchical refinement, this technique reconstructs effectively subsurface anomaly geometry. Synthetic tests enhanced by Gaussian noise are carried out, demonstrating the robustness of the algorithm in terms of locating and characterizing the underground object.

Key words: *Probabilistic inversion, 3D modelling, geomagnetic prospecting, spatial analysis, machine learning*

INTRODUCTION

La prospection géomagnétique est traditionnellement effectuée en deux dimensions (2D) à la surface du sol pour localiser soit des vestiges archéologiques, soit des munitions non explosées (UXO), soit des déchets industriels, soit etc... Bien que cette méthode soit efficace pour localiser les sources des anomalies, elle ne permet pas de déterminer précisément leur profondeur ni leur géométrie. Pour résoudre cette incertitude, il est nécessaire d'apporter des informations supplémentaires. L'approche méthodologique proposée consiste à intégrer la variation verticale du champ géomagnétique, ce qui permet de contraindre l'estimation de la profondeur et la géométrie des sources.

La méthode probabiliste est largement utilisée dans les problèmes d'inversion géophysique depuis son apparition dans les années 1960 (Wojciech Debski, 2010). Diverses méthodes d'inversion probabiliste, comme le Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC), le recuit simulé (SA), l'optimisation par essaims de particules (PSO) et les algorithmes génétiques (GA), ont été largement employées pour interpréter les données géomagnétiques. En particulier, le SA s'est avéré très efficace pour résoudre les problèmes d'inversion non linéaires pour les corps géométriquement simples (Biswas & Acharya, 2016).

Basée sur le protocole d'une prospection géomagnétique tri-dimensionnelle (Lévêque et Mathé, 2015), nous proposons une technique d'inversion probabiliste fondée sur du recuit simulé, choisie pour sa capacité d'optimisation globale et de gestion des problèmes multidimensionnelles. Une stratégie de raffinement hiérarchique a été introduite dans l'algorithme. La géométrie de l'anomalie est progressivement modifiée au cours des d'itérations. Dans le contexte de cet article, nous présenterons un exemple de cas synthétique permettant d'illustrer la performance de notre algorithme.

Méthodologie

Modélisation directe

Dans le cadre de notre étude, nous avons sélectionné les données d'anomalies magnétiques du champ total générées par des corps en forme de prisme avec une aimantation uniforme. Cette approche a été retenue pour la facilité avec laquelle il est possible de combiner différents corps pour simuler un champ magnétique complexe.

L'intensité du flux magnétique anormal est donnée par l'équation suivante (Guo et al,2004) :

$$\Delta T(x, y, z) = MF \left\{ \begin{array}{l} k_1 \ln[r + (\xi - x)] + k_2 \ln[r + (\eta - y)] + k_3 \ln[r + (\zeta - z)] \\ + k_4 \tan^{-1} \frac{(\xi - x)(\eta - y)}{(\xi - x)^2 + (\zeta - z)^2 + r(\zeta - z)} \\ + k_5 \tan^{-1} \frac{(\xi - x)(\eta - y)}{(\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2 + r(\zeta - z)} \\ + k_6 \tan^{-1} \frac{(\xi - x)(\eta - y)}{+r(\zeta - z)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} |x_0 + \alpha/2 | y_0 + \alpha/2 | z_0 + \alpha/2 \\ |x_0 - \alpha/2 | y_0 - \alpha/2 | z_0 - \alpha/2 \end{array} \quad (1)$$

Où $k_1 = m \cdot N + n \cdot M$, $k_2 = l \cdot N + n \cdot L$, $k_3 = l \cdot M + m \cdot L$, $k_4 = l \cdot L$, $k_5 = m \cdot M$, $k_6 = -n \cdot N$, dont $l = \cos(BI) \cdot \cos(BD)$, $m = \cos(BI) \cdot \sin(BD)$, $n = \sin(BI)$, $L = \cos(M) \cdot \cos(MD)$, $M = \cos(MI) \cdot \sin(MD)$, $N = \sin(MI)$.

BI, BD représentent relativement l'inclinaison et la déclinaison (dont le nord soit par rapport à l'axe X) du champ géomagnétique et MI, MD correspondent aux celles de l'aimantation de la source. MF est l'intensité de l'aimantation de la source.

Recuit simulé

L'inversion concernant l'Eq.1 est un problème non-linéaire. Afin de pallier la complexité inhérente au problème d'inversion non-linéaire, il est recouru à des méthodologies d'optimisation, à l'instar du recuit simulé. Le recuit simulé (Kirkpatrick et al., 1983), autrement dit SA, est un algorithme d'optimisation globale qui simule originellement le processus de refroidissement dans le domaine de métallurgie. Il accepte ou rejette de manière probabiliste les changements de paramètres sur la base d'un critère dépendant de la température, paramètre qui contrôle le nombre d'itérations et la probabilité d'acceptation d'une nouvelle solution. Cet algorithme peut être résumé comme suit :

1. Initialisation : Définir une température initiale T_0 élevée et une solution initiale S_1 .
2. Itération (jusqu'à T critique) :
 - a. Générer une nouvelle solution S_2 en perturbant S_1 .
 - b. Calculer la variation d'énergie $\Delta f = f(S_2) - f(S_1)$.
 - c. Si $\Delta f < 0$, accepter S_2 . Sinon, l'accepter avec une probabilité $e^{-\Delta f/T}$.
3. Refroidissement : Réduire T selon une loi de décroissance.
4. Arrêt : Lorsque S_2 n'est plus accepté après plusieurs itérations ou si T atteint un seuil bas, retourner S_1 comme solution optimale.

Stratégie de raffinement hiérarchique

Cependant, les inversions paramétriques classiques se concentrent sur la localisation des anomalies de forme simple (les ellipsoïdes, les prismes, les escaliers etc.), ce qui ne correspond pas à la réalité où la majorité des objets d'étude souterrains possède une géométrie irrégulière. Une géométrie éloignée de la réalité peut conduire à des résultats d'inversion erronés. Pour décrire plus précisément la géométrie des anomalies, basée sur l'hypothèse que l'objet à rechercher dans la zone d'étude soit homogène, une stratégie de raffinement hiérarchique a été introduite à l'algorithme. La démarche de cette stratégie est expliquée comme suit:

Initialement, l'algorithme cherche à identifier et à localiser l'anomalie de manière aléatoire dans les limites spécifiées (Fig.1.a). Lorsqu'il est constaté que les paramètres convergent vers un certain niveau et que le champ résiduel devient stable, il s'ensuit que l'algorithme ne peut pas trouver de

meilleure solution, même si le signal du champ résiduel reste à un certain niveau. En réponse à cette situation, l'algorithme procède à une division de la cible en huit parties égales, (Fig.1.b). Par la suite, chaque face de ces parties est dotée d'un degré de liberté pour ajuster sa taille et sa position (Fig.1.c). Ces sous-parties du résultat primaire de l'inversion sont désignées sous le terme de « 2e génération ». Une fois que la forme de toutes les sous-parties est ajustée, l'algorithme procédera à la correction de la direction et de l'intensité de l'aimantation. La nouvelle forme de la cible, qui est plus proche de la forme correcte, devrait permettre à l'algorithme de trouver une meilleure solution pour l'inclinaison, la déclinaison et l'intensité de l'aimantation de la cible.

Dans le cadre de l'évaluation des résultats de l'inversion, nous introduisons le terme « énergie » qui représente la moyenne de la valeur absolue de la différence entre le champ théorique généré par le modèle d'inversion et les données observées. Chaque génération est soumise à une vérification de la condition d'arrêt par l'algorithme (Fig.1.d&e), et le programme conserve sa continuité même si la condition d'arrêt est satisfaite au cours d'une inversion régionale. Cette condition d'arrêt est fixée par défaut à 1% de l'énergie des données d'observation. Dans le cas des applications archéologiques, les objets d'études présentent fréquemment une faible aimantation, avec des signaux qui dépassent rarement quelques nT à dizaines de nT. Par conséquent, cette condition d'arrêt, fixée à 1% d'énergie des données d'observation, abouti à un signal du champ résiduel de quelques dixièmes de nanotesla. Cette valeur est assimilable à la limite de répétabilité des mesure.

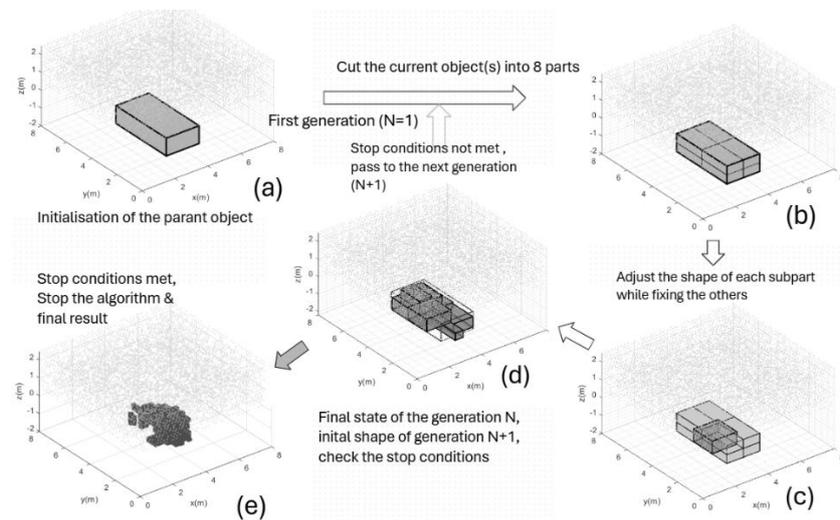


Figure 1 Illustration de la stratégie de raffinement hiérarchique

Test d'algorithme

Pour évaluer la capacité de l'algorithme proposé, nous présentons un modèle théorique visant à simuler un scénario de prospection magnétique tridimensionnelle. Ce modèle s'articule autour de l'implantation d'une anomalie homogène avec une intensité d'aimantation de 0,5 A/m, une inclinaison de 60° et une déclinaison de 10°. L'anomalie présente une forme évoquant une banane, et se situe à une profondeur d'un mètre, en son centre, au sein de la zone de travail (Fig. 2.a). La méthodologie d'observation s'articule autour d'un protocole de prospection qui définit cinq strates de points d'observation, chacune d'entre elles étant stratégiquement située à une hauteur spécifique. Les points sont disposés à une distance horizontale de cinq centimètres les uns des autres. Afin de minimiser la charge de calcul, un sous-échantillon, sélectionné de manière aléatoire, est effectué. En outre, un bruit gaussien avec un écart type de 0,5 nT, correspondant à un rapport signal-sur bruit (STR) de 14.49 dB a été inséré dans le signal magnétique simulé qui permet d'évaluer la robustesse de l'algorithme.

Le temps de calcul augmente rapidement avec le nombre de générations demandées. Dans le cadre de la mise à l'épreuve et de l'amélioration de la pertinence de l'algorithme, une condition d'arrêt a été intégrée à celui-ci. Ladite condition s'exprime comme suit : lorsque l'algorithme itère jusqu'à la quatrième génération, soit lorsqu'il y a 512 sous-parties dans le système, il s'arrête et fournit les résultats de l'inversion.

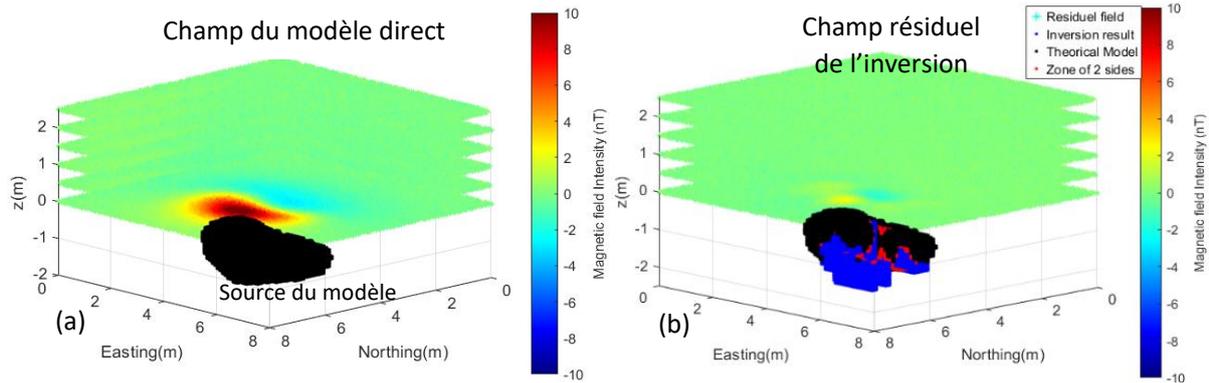


Figure 2 Illustration du modèle directe(a) et des résultats d'inversion(b)

La figure 2b illustre les résultats de l'inversion du champ du modèle direct, montrant le champ résiduel, obtenu par la différence entre le champ de l'inversion et le champ originel. Les informations d'aimantation ont été autorisées à évoluer librement. Les résultats obtenus révèlent une inclinaison de $58,5^\circ$, une déclinaison de 4° et une intensité de $0,78 \text{ A/m}$ comme valeurs finales. Au-dessous des points observation, nous indiquons également les positions relatives du modèle direct et des résultats de l'inversion. La partie en noir représente la partie du modèle direct non-représentée par le modèle inverse (73% du modèle direct). A l'inverse, la partie en bleue représente des parties externes au modèle direct, et la partie en rouge constitue les parties communes (80% du modèle inverse). La géométrie générale du modèle apparaît être correctement représentée. Il est à noter que les parties erronées du modèle inverse se situent principalement au-dessous du modèle direct. La contribution de cette partie erronée est négligeable puisque le signal du champ magnétique s'atténue rapidement avec la distance. Ainsi, l'algorithme est apte à identifier la géométrie de la source avec un degré de confiance significatif à l'exception de la partie inférieure.

CONCLUSIONS

Dans le cadre de cette étude, nous proposons un algorithme d'inversion probabiliste fondé sur le principe de prospection géomagnétique tridimensionnelle. En associant la technique du recuit simulé au concept de raffinement hiérarchique, notre approche permet de reconstruire avec précision les caractéristiques d'objets enfouis dans un cadre relativement simple. La validation de l'algorithme est effectuée à l'aide de données synthétiques bruitées modélisées à partir d'une anomalie homogène de forme irrégulière. Les résultats de l'inversion fournissent une représentation complète de l'emplacement, de la taille, de la forme et des caractéristiques d'aimantation de la cible. Ainsi, lorsque la localisation précise d'une source est requise, l'acquisition de données géomagnétiques dans l'espace au-dessus de celle-ci permet, par l'inversion des données avec l'algorithme proposé, de diminuer l'incertitude sur la géométrie et la profondeur de la source, en précisant ses propriétés magnétiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Biswas A., Acharya T, 2016** – A very fast simulated annealing method for inversion of magnetic anomaly over semi-infinite vertical rod-type structure. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 1–10 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0256-x>
- Guo Z., Guan Z., Xiong S., 2004** – Cuboid ΔT and Its Gradient Forward Theoretical Expressions Without Analytic Odd Points. *Chinese J. Geophys.*, 47: 1277-1285. <https://doi.org/10.1002/cjg2.615>
- Lévêque F., Mathé V., 2015** – Prospection magnétique 3D à haute résolution. *Les nouvelles de l'archéologie*, 138 | 2015, 19-23.
- S. Kirkpatrick et al., 1983** – Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220, 671-680 (1983). DOI:10.1126/science.220.4598.671
- Wojciech Debski, 2010**. *Advances in Geophysics*. ISBN 9780123749109, [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(10\)52001-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(10)52001-6).

COUPLAGE THERMO-GÉOPHYSIQUE POUR LA MODELISATION 3D DU MASSIF ROCHEUX DE LA GROTTÉ DE LASCAUX

LHARTI H^{(1) (2)}, SIRIEIX C⁽¹⁾, SALMON F⁽³⁾, RISS J⁽¹⁾, MARACHE A⁽¹⁾, VERDET C⁽¹⁾ & LACANETTE D⁽¹⁾

¹ Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, 351 cours de la Libération F-33405 Talence, France

² LMGC, Université de Montpellier, IMT Mines Ales, CNRS, 30100 Ales, France

³ Inria, Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMB, UMR 5251, 200 Avenue de la Vieille Tour, 33405 Talence cedex, France

RESUME

La conservation des œuvres pariétales de la grotte de Lascaux dépend des échanges thermiques entre la paroi et le massif rocheux. Cette étude propose un modèle thermique 3D intégrant l'hétérogénéité du massif. Trois méthodes, la Tomographie de Résistivité Électrique (TRE), la classification hiérarchique ascendante (CHA) et l'interpolation par krigeage ont permis d'identifier sept domaines dont les diffusivités thermiques ont été ensuite estimées par méthode inverse. La simulation de la propagation de la chaleur montre que l'hétérogénéité géologique influence le champ de température.

Mots clés: Grotte de Lascaux, conservation, transfert thermique, tomographie de résistivité électrique, Machine Learning, méthode inverse

ABSTRACT

The conservation of the wall paintings in the Lascaux cave depends on heat exchange between the wall and the rock mass. This study proposes a 3D thermal model incorporating the heterogeneity of the rock mass. Three methods - Electrical Resistivity Tomography (ERT), hierarchical classification (HAC) and kriging interpolation - were used to identify seven domains whose thermal diffusivities were then estimated using the inverse method. Simulation of heat propagation shows that geological heterogeneity influences the temperature field.

Key words: Lascaux Cave, conservation, heat transfer, Electrical Resistivity Tomography, 3D model, inverse method

INTRODUCTION

Préserver l'art rupestre de la grotte de Lascaux, est un important enjeu culturel. La dégradation des parois résulte des cycles de condensation et d'évaporation, eux-mêmes dépendants de la température. Les modèles thermiques actuels considèrent le massif rocheux comme homogène, ce qui limite la compréhension des échanges thermiques. L'étude présentée ici a visé à élaborer un modèle thermique 3D intégrant l'hétérogénéité géologique du massif. Pour cela, l'acquisition de données de TRE en 2D suivie d'une interpolation par krigeage, a conduit par classification hiérarchique ascendante (CHA) à la segmentation du massif en 7 domaines considérés comme homogènes. Les diffusivités thermiques de chacun des domaines sont estimées par méthode inverse. Ce modèle servira à simuler les phénomènes thermo-aérauliques au sein de la grotte, afin d'anticiper les zones sujettes à la condensation.

Matériels et méthodes

Située en Dordogne, la grotte de Lascaux est un site emblématique classé au patrimoine mondial de l'UNESCO pour ses peintures préhistoriques. Afin de comprendre son environnement, plus de 150 capteurs y enregistrent en continu divers paramètres : à l'extérieur, les précipitations, la température, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire et, à l'intérieur, la température de l'air et de la roche, les

flux d'eau, le CO₂ et l'humidité. On s'intéresse ici, à l'analyse des températures extérieures et intérieures (Fig.1). La modélisation 3D du massif a été réalisée à partir de 57 760 valeurs de résistivité, obtenues grâce à 20 profils de mesures (96 électrodes espacées de 1,5 m sur une longueur de 144 m). Ces données ont été traitées avec la version v.4.05.38 du logiciel RES2DInv, en utilisant la norme L1 et un raffinement de la grille.

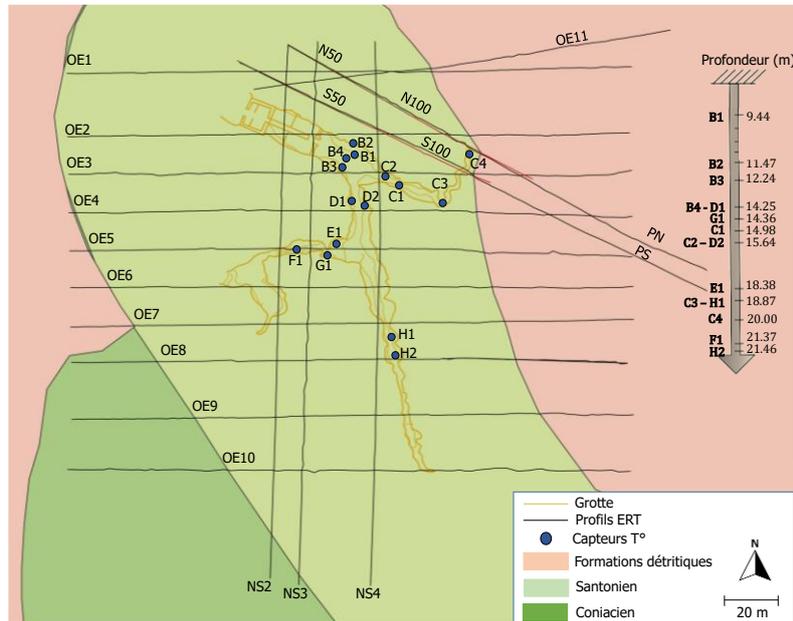


Fig. 1 – Vue en plan de la grotte de Lascaux et de la géologie environnante (d'après Verdet *et al.* 2020). avec la représentation des profils ERT et l'emplacement des capteurs à l'intérieur de la grotte.

RESULTATS ET DISCUSSION

Cette section expose les résultats issus des mesures géophysiques et des capteurs installés à l'intérieur de la grotte avec, dans un premier temps, le partitionnement du massif rocheux, puis la construction 3D du massif et, enfin, la modélisation thermique obtenue par l'application d'une méthode inverse.

Classification des données

Le comportement thermique de cette grotte fermée résultant principalement des transferts thermiques dans la partie supérieure du massif, la CHA a été appliquée aux valeurs de résistivité, de sa partie centrale (Santonien) et aux formations détritiques de l'est et de l'ouest (Fig.1) soit, aux valeurs inférieures à Le 210 Ω·m, seuil choisi sur la base des valeurs typiques observées pour les formations altérées ou détritiques, tandis que la limite altimétrique de 182 m NGF correspond au sommet du Coniacien, repéré dans la grotte par des fossiles caractéristiques et une texture de roche distincte, comme décrit par Verdet *et al.* (2020). La partie coniacienne et profonde du massif considéré comme homogène constitue la classe numéro 6 (sur un total de 7).

Les résultats obtenus (Lharti *et al.*, 2023 et Fig.2) sont cohérents avec ce qui est connu de la géologie du site (Platel, 1987; Xu *et al.*, 2016; Verdet *et al.*, 2020). La partie centrale du massif, dominée par le Santonien, est subdivisée en deux classes (4 et 5) associées à différentes formes d'altération du calcaire. Les formations détritiques de l'ouest et de l'est, caractérisées par une faible résistivité sont regroupées dans les classes 1, 2 et 3. Un domaine très résistif en surface, attribué aux sables, a été identifié.

Modélisation 3D par Krigeage

A l'issue du krigeage et de la CHA les résistivités associées à chacune des 7 classes mettent en évidence l'hétérogénéité du massif. Le nombre de classes (7) a été retenu après avoir comparé plusieurs

segmentations (entre 5 et 7), le choix final étant guidé par une cohérence avec les unités géologiques connues du site. À l'est, la classe 7 (magenta, Fig. 2) affiche des résistivités élevées (410 à 7979 $\Omega\cdot\text{m}$), caractéristiques des sables. Dans la partie centrale, les classes 4 et 5 (jaune et orange) correspondent au calcaire santonien, intégrant des zones altérées et fracturées, avec des résistivités comprises entre 113 et 410 $\Omega\cdot\text{m}$. À l'ouest, les classes 1, 2 et 3 (bleu et vert) regroupent des formations détritiques argilo-sableuses, avec quelques occurrences dans le calcaire santonien, suggérant l'existence de conduits karstiques sablonneux pouvant temporairement contenir de l'eau. Ces formations jouent un rôle important dans le transfert thermique au sein de l'épikarst. La classe 6, en profondeur, correspond au calcaire du Coniacien.

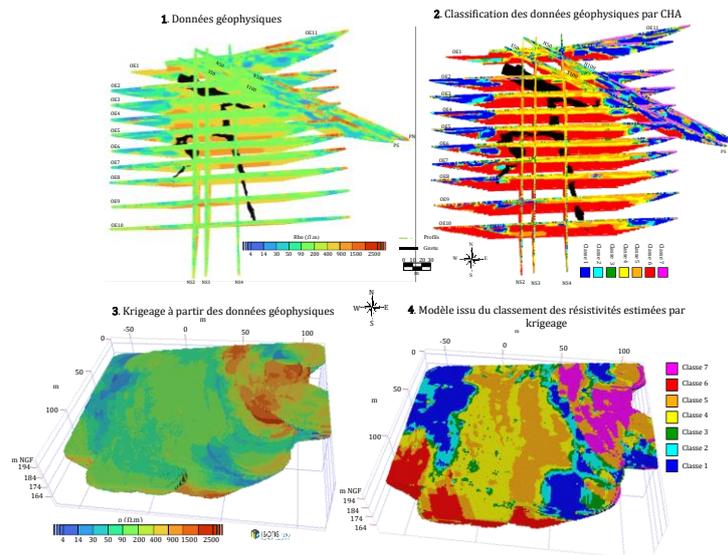


Fig. 2 – Classification et krigeage des données de résistivité électrique. (1) Données géophysiques. (2) Classification de données géophysiques en 7 classes par CHA. (3) Krigeage appliqué sur les données logarithmes de résistivité électrique. (4) Application de la classification aux données krigées.

Modélisation thermique

Afin de simuler une représentation fidèle des transferts de chaleur dans le massif, une diffusivité thermique doit être attribuée à chacune des 7 classes. Pour ce faire, la conduction thermique est simulée avec le logiciel *Notus CFD*, qui résout l'équation de la chaleur. La détermination des valeurs optimales repose sur un problème inverse non linéaire, résolu via l'algorithme de Nelder-Mead, utilisé en modélisation thermique. L'algorithme suit un processus itératif combinant initialisation, simulation et ajustement progressif des diffusivités jusqu'à convergence. L'analyse repose sur la minimisation de la fonction objectif dépendant du déphasage ($\delta\phi$) et de l'amplitude (ΔT) de l'onde thermique.

$$\sum_{i=1}^N \frac{|\delta\phi_{exp}^i - \delta\phi_{sim}^i|^2}{|\delta\phi_{exp}^i|^2} + \frac{|\Delta T_{exp}^i - \Delta T_{sim}^i|^2}{|\Delta T_{exp}^i|^2}$$

Avec exp et sim désignant respectivement les mesures expérimentales et les résultats de la simulation).

Les résultats montrent une diffusivité thermique variant, selon les classes, entre 3×10^{-7} et 2×10^{-6} m^2/s , soulignant l'hétérogénéité du massif. Les températures estimées en mai 2020 (Fig.3) montrent des valeurs élevées en surface ($>14^\circ\text{C}$), tandis que les couches profondes restent froides sous l'influence de l'hiver précédent. À l'ouest, près de l'entrée (Fig.3-2), la diffusion thermique est plus rapide en raison de la faible épaisseur du calcaire santonien (classe 4). L'onde thermique atteint rapidement le Coniacien (classe 6), dont la diffusivité thermique plus élevée favorise une transition progressive des températures en profondeur. À l'est (Fig.3-2), en revanche, la propagation de la chaleur est plus lente

et stratifiée. Les zones chaudes en surface diffusent graduellement vers les couches profondes plus froides (Fig.3-2), qui se réchauffent progressivement. Cette stratification résulte de la présence dominante du Santonien, la formation dont la diffusivité thermique est plus faible que celle du Coniacien, influençant ainsi la dynamique du transfert de chaleur.

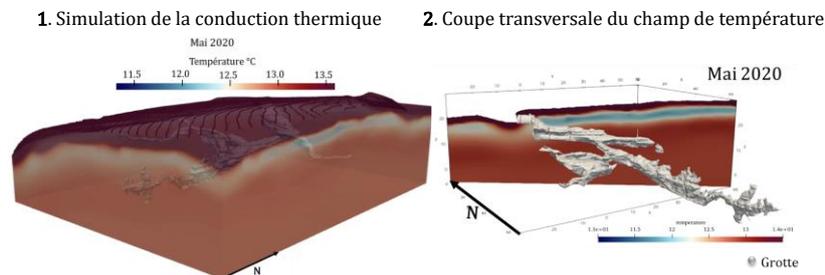


Fig. 3 – (1) Champ de température simulé dans le massif et (2) coupe transversale du champ de température pendant le mois de mai 2020. La cavité est représentée en gris.

CONCLUSION

La préservation de la grotte de Lascaux repose sur une compréhension approfondie des échanges thermiques entre ses parois et le massif rocheux environnant. Cette étude propose une méthodologie permettant de prendre en compte les hétérogénéités thermiques du massif en combinant des approches géophysiques et thermiques. La campagne de tomographie de résistivité électrique a été suivie de la classification hiérarchique des résistivités en sept classes qui appliquées au modèle 3D issu du krigeage a permis de préciser l'hétérogénéité du massif. L'estimation des diffusivités thermiques distinctes pour chaque classe a été obtenue par application d'une méthode inverse, prenant en compte le déphasage et l'amplitude des ondes thermiques dans le massif. Les ordres de grandeurs trouvés sont cohérents avec la nature des formations identifiées par TRE, offrant ainsi un outil essentiel pour mieux simuler la propagation de la chaleur dans le massif et affiner les stratégies de conservation du site.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GUILLOT P-L., FEYS R., LEFAVRAIS-RAYMOND A., PLATEL J-P., LEFAVRAIS-HENRY M. 1977.** « Notice de la carte géologique de la France à 1/50000 - Terrasson ». Editions du BRGM.
- LACANETTE D., MALAURENT P. 2014.** « Prévision climatique 3D dans la grotte de Lascaux » 63: 49-57.
- 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*, février, ggad081. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad081>.
- PLATEL JP 1987.** « Le Crétacé supérieur de la plateforme septentrionale du Bassin d'Aquitaine. Stratigraphie et évolution géodynamique ». Document B.R.G.M, no 164: 581.
- VERDET C., SIRIEIX C., MARACHE A., RISS J., PORTAIS JC. 2020.** « Detection of Undercover Karst Features by Geophysics (ERT) Lascaux Cave Hill ». *Geomorphology* 360 (juillet): 107177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107177>.
- XU S., SIRIEIX C., MARACHE A., RISS J., MALAURENT P. 2016.** « 3D Geostatistical Modeling of Lascaux Hill from ERT Data ». *Engineering Geology* 213 (novembre): 169-78. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.009>.

INVERSION PETROPHYSIQUE CONJOINTE POUR LA QUANTIFICATION DE LA TENEUR EN GLACE DANS LES GLACIERS ROCHEUX

MOLLARET C.¹, MATHYS T. ¹, WEE J. ¹, HILBICH C.¹, HAUCK C.¹

¹ Université de Fribourg, Fribourg, Suisse, coline.mollaret@unifr.ch

RESUME

Les glaciers rocheux sont une forme géomorphologique particulière du pergélisol alpin, sensible au changement climatique. La teneur en glace est une variable clé mais rarement quantifiée dans les études sur le pergélisol. L'inversion pétrophysique conjointe (PJI) permet de quantifier les teneurs en glace, eau, air et roche. L'approche basée sur la moyenne géométrique (PJI-GM) offre des résultats plus fiables et réalistes que la loi d'Archie (PJI-AR), dans le cas d'une porosité importante et notamment dans le cas des glaciers rocheux.

Mots clés : pétrophysique, inversion conjointe, pergélisol, glace, eau

ABSTRACT

Rock glaciers are a particular geomorphological form of alpine permafrost, sensitive to climate change. Ice content is a key but difficult and therefore rarely quantified variable in permafrost studies. Joint petrophysical inversion (JPI) enables ice, water, air and rock contents to be quantified. The geometric mean approach (PJI-GM) offers more reliable and realistic results than Archie's law (PJI-AR), particularly in the case of high porosity terrains like rock glaciers.

Key words: petrophysics, joint inversion, permafrost, ice, water

INTRODUCTION

Caractérisant l'état thermique du sol, le pergélisol alpin est un indicateur particulièrement sensible du changement climatique. L'augmentation de la température du sol proche du point de fusion de la glace entraîne le dégel du pergélisol et peut affecter la stabilité des pentes de montagnes. Le monitoring standard du pergélisol est la mesure continue des températures en forage. Cependant, le nombre de forage est limité et les températures seules ne donnent pas d'information sur la teneur en glace. La teneur en glace souterraine peut varier significativement en fonction notamment de la porosité et de la morphologie du terrain, de pauvre en glace pour un substrat rocheux à de la glace massive présente dans certains glaciers rocheux.

La teneur en glace est un facteur clé mais généralement inconnu car particulièrement difficile à évaluer de manière quantitative. Les exceptions sont les études analysant des échantillons de forages non destructifs dans le but d'obtenir directement la teneur en glace en fonction de la profondeur. L'analyse des données d'un seul forage ne donne cependant pas d'informations sur la variabilité spatiale.

Pour obtenir une information spatiale, des mesures géophysiques sont généralement réalisées en complément des forages. Les méthodes géophysiques sont utilisées depuis des décennies pour caractériser le pergélisol qualitativement en 2 ou 3 dimensions. Souvent plusieurs méthodes géophysiques indépendantes sont adoptées pour réduire les ambiguïtés inhérentes à tout méthode géophysique.

Dans cette contribution, nous nous intéressons à la combinaison de tomographies de résistivité électrique et de sismique réfraction. Nous employons une approche d'inversion pétrophysique conjointe (PJI) de ces deux méthodes et discutons l'utilisation de deux relations pétrophysiques reliant les résistivités électriques aux paramètres d'inversion (les teneurs en glace, eau, air et matrice rocheuse), en particulier pour l'étude des glaciers rocheux.

METHODE

Relations pétrophysiques

Les résistivités électriques et les vitesses des ondes P sont reliées aux 4 paramètres d'inversion qui sont les teneurs en glace, eau, air et matrice rocheuse par différentes équations pétrophysiques. Les vitesses de ondes P sont reliées aux paramètres par à une équation des moyennes temporelles, alors que 2 relations sont comparées pour les résistivités électriques : la loi d'Archie (AR) et le modèle de la moyenne géométrique des résistivités électriques (GM).

La loi d'Archie (AR) est une loi empirique considérée comme valable lorsque la conduction électrique est exclusivement assurée par les ions dissous dans la phase aqueuse liquide contenue dans les pores. AR devrait être donc être appliquée seulement lorsque la conduction électrolytique est dominante, c'est-à-dire lorsque la conduction de surface et/ou la conduction dans les grains de roche ne sont pas négligeable, comme par exemple lors de la présence d'argile.

Le modèle de la moyenne géométrique (GM) suppose une distribution aléatoire des 4 phases (glace, eau, air, roche) dans le sous-sol. GM a l'avantage de mieux contraindre les 4 inconnues que AR.

Inversion jointe pétrophysique

L'approche d'inversion pétrophysique conjointe (PJI-AR) a été développée par Wagner et al. (2019) pour quantifier la teneur des 4 phases (glace, eau, air et matrice rocheuse). Mollaret et al. (2020) ont étendu l'approche à d'autres relations pétrophysiques (e.g. PJI-GM) et les ont comparés à la loi d'Archie (PJI-AR). PJI-AR a été appliquée à d'autres glaciers rocheux (De Pasquale et al. 2022, Pavoni et al. 2023), tout comme PJI-GM (e.g. Wee et al. 2024). Plus récemment Mathys et al. (2025) ont comparé ces 2 approches PJI-AR et PJI-GM de manière extensive et systématique à plus de 20 profils sur des types de sol variables, incluant des glaciers rocheux.

DONNEES SYNTHETIQUES ET CAS D'ETUDE DE GLACIERS ROCHEUX

Les 2 approches d'inversion conjointe (PJI-AR et PJI-GM) sont appliquées à des modèles synthétiques dont tous les paramètres sont définis et qui représentent différents types de sol avec d'importantes variations spatiales de la porosité et de la teneur en glace. Une évaluation systématique des résultats est réalisée.

Puis les cas d'étude de plusieurs glaciers rocheux sont investigués, en faisant notamment varier certains paramètres clés de l'inversion conjointe, comme la valeur de porosité initiale par exemple (cf. Fig.1). Lorsque cela est possible, les résultats sont comparés à d'autres données indépendantes de validation comme les informations géomorphologiques ou les températures en forage.

RESULTATS

Influence de la porosité initiale

La comparaison des approches PJI-AR et PJI-GM montrent une dépendance à la porosité initiale des estimations de teneurs en glace et en eau significativement plus importante dans le cas PJI-AR, à la fois dans les cas des données synthétiques et des données de terrain.

Par exemple, dans le cas du glacier rocheux abra02, la teneur en glace moyenne varie de moins de 10 % à 50 % pour des valeurs croissantes de porosité initiale dans le cas PJI-AR, alors qu'elle dépend très peu de la porosité initiale dans le cas PJI-GM (cf. Fig. 1, Mathys et al. 2025). Les estimations des teneurs en glace et en roche apparaissent donc plus robustes et moins dépendantes des paramètres initiaux de l'inversion dans le cas PJI-GM.

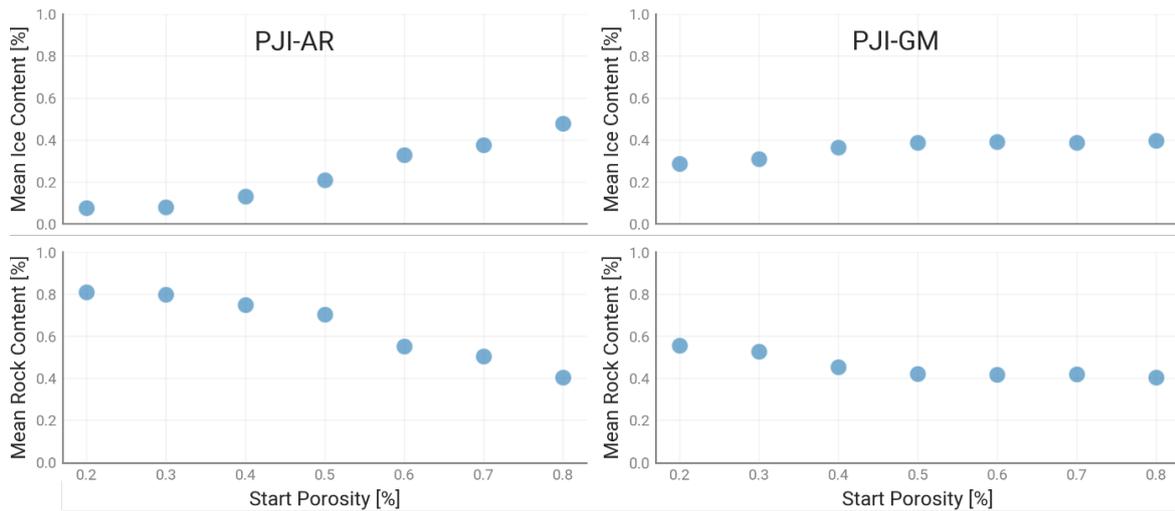


Fig. 1 – Influence de la porosité initiale (start porosity) sur la moyenne du contenu en glace et en roche estimé par le PJI-AR et PJI-GM pour un glacier rocheux (abra02), Kyrgyzstan. Modifié de Mathys et al. 2025.

Comparaison des 2 relations pétrophysiques

Une porosité initiale de 0.6 a été fixée lors des inversion conjointes (PJI-AR et PJI-GM) dont les résultats sont présentés en Fig. 2. L'ambiguïté roche-glace est marquante lorsque la loi d'Archie (PJI-AR) est utilisée (Fig. 2a). En effet le modèle n'arrive pas à modéliser de la glace massive et le contenu en roche reste élevé au sein du glacier rocheux (ce qui n'est vraisemblablement pas le cas dans la réalité). De la glace massive est par contre modélisée de manière réaliste (pas dans la couche active mais dans le corps du pergélisol, comme cela est attendu) lorsque le modèle de moyenne géométrique est choisi (PJI-GM, Fig. 2b).

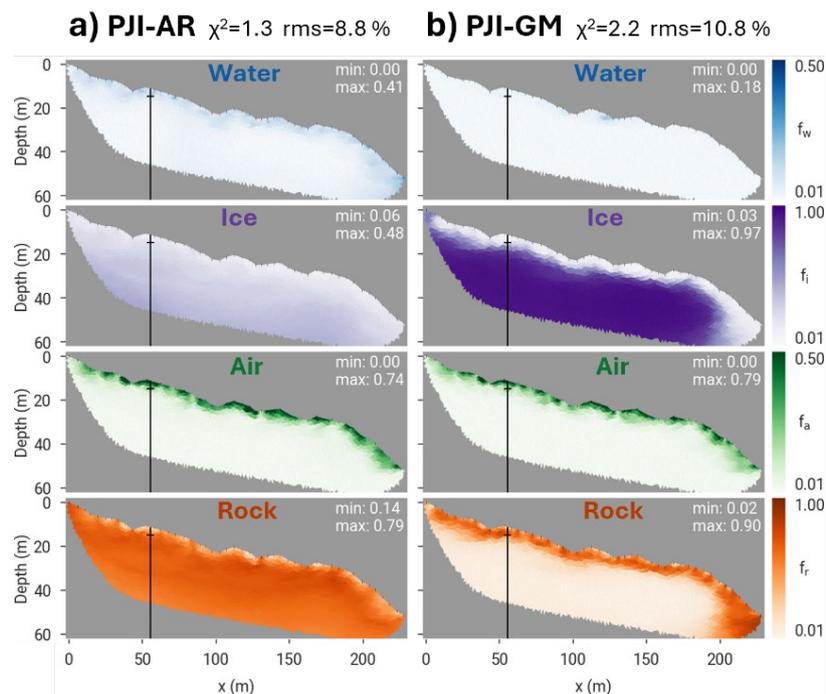


Fig. 2 – Estimation de la teneur des 4 phases en utilisant a) la loi d'Archie (PJI-AR) et b) le modèle de moyenne géométrique (PJI-GM) comme relation pétrophysique reliant les résistivités aux paramètres d'inversion lors de l'inversion pétrophysique conjointe des données du glacier rocheux Murtèl (MCO juillet 2007), Suisse. Modifié de Mollaret et al. 2020.

CONCLUSIONS

La quantification de la porosité et de la teneur en glace dans le pergélisol est possible grâce à l'approche d'inversion pétrophysique conjointe. Le modèle de moyenne géométrique (PJI-GM) permet d'estimer la porosité et la teneur en glace de manière plus réaliste (à la fois sur des données synthétiques et les données de terrain) qu'avec la loi d'Archie (PJI-AR) dans le cas de glaciers rocheux. L'ambiguïté glace-roche est donc une spécificité de la loi d'Archie (PJI-AR). PJI-GM est également moins influencé par les paramètres initiaux d'inversion tels que la porosité initiale. Les résultats de PJI-GM reflètent donc mieux les données. Cela peut s'expliquer par le fait que les résistivités de la glace et de la matrice rocheuse – qui sont d'ordre de grandeur différentes – apparaissent explicitement dans GM mais pas AR.

Lorsque la conduction électrolytique n'est pas dominante, par exemple dans le cas de glaciers rocheux caractérisés par une porosité importante, la loi d'Archie n'est pas valable. En conséquence le modèle de moyenne géométrique (PJI-GM) - plus réaliste - devrait être favorisé dans ces cas spécifiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DE PASQUALE, G., VALOIS, R., SCHAFFER, N., AND MACDONELL, S., 2022 – Contrasting geophysical signatures of a relict and an intact Andean rock glacier. *The Cryosphere*, 16, 1579–1596.

MATHYS T., HILBICH C., MOLLARET C., HAUCK C., SAKS T., USUBALIEV R., MOLDOBEKOV B., BEKTURSUNOV Z., AZIMSHOEV M., NAVRUZSHOEV H., HOELZLE, M., 2025 – Quantifying Ground Ice in Tien Shan and Pamir Permafrost: A Comprehensive Petrophysical Joint Inversion Study Applying the electrical Geometric Mean Model. *The Cryosphere Discussion*, in review.

MOLLARET C., WAGNER F. M., HILBICH C., SCAPOZZA C., HAUCK C., 2020 – Petrophysical joint inversion applied to alpine permafrost field sites to image subsurface ice, water, air and rock contents. *Frontiers in Earth Science*, 8:85.

PAVONI M., BOAGA J., WAGNER F.M., BAST A., PHILLIPS M., 2023 – Characterization of rock glaciers environments combining structurally-coupled and petrophysically-coupled joint inversions of electrical resistivity and seismic refraction datasets. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 215.

WEE J., VIVERO S., MATHYS T., MOLLARET C., HAUCK C., LAMBIEL C., BEUTEL J., HAEBERLI W., 2024 – Characterizing ground ice content and origin to better understand the seasonal surface dynamics of the Gruben rock glacier and the adjacent Gruben debris-covered glacier (southern Swiss Alps). *The Cryosphere*, 18, 5939–5963.

WAGNER F. M., MOLLARET C., GUNTHER T., KEMNA A., HAUCK C., 2019 – Quantitative imaging of water, ice, and air in permafrost systems through petrophysical joint inversion of seismic refraction and electrical resistivity data. *Geophysical Journal International*, Volume 219, Pages 1866–1875.

INTERFÉROMÉTRIE DE BRUIT DE FOND SISMIQUE ET TOMOGRAPHIE D'ÉQUATION D'ONDES : IMAGERIE TRIDIMENSIONNELLE DU GLISSEMENT D'HARMALIÈRE, FRANCE

PROVENZANO G.¹, BIÈVRE G.¹, BROSSIER R.¹, GARAMBOIS S.¹, MÉTIVIER L.^{1,2}

¹ Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, LJK, Grenoble, France

RESUME

Le glissement d'Harmalière (Isère, France) présente des réactivations soudaines, sous forme de coulée dans sa partie aval, à la différence de glissements voisins qui évoluent lentement (quelques mm à cm/an). Dans le but de détecter un éventuel contrôle structural de cette transition glissement-coulée, un réseau dense de bruit de fond sismique a été déployé pendant un mois en juin 2021. Des tomographies 3D ont été construites à partir de sources actives et de bruit de fond sismique. Les résultats permettent de mieux comprendre ce qui contrôle la transition glissement-coulée.

Mots clés : tomographie, interférométrie, bruit de fond sismique, glissement argileux

ABSTRACT

The Harmalière landslide (Isère, France) exhibits sudden reactivations, in the form of flow in its lower part, unlike neighboring landslides which evolve slowly (a few mm to cm/year). In order to detect a possible structural control of this slide-to-flow transition, a dense seismic ambient noise array was deployed for one month in June 2021. 3D tomographic models were built from both active sources and seismic ambient noise. The results provide a better understanding of the factors controlling the slide-to-flow transition.

Key words: tomography, interferometry, seismic noise, clayey landslide

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet RESOLVE, un réseau dense de 100 géophones 3 composantes et large bande a été déployé afin d'enregistrer en continu la sismicité naturelle pendant un mois, en juin 2021, au sein du glissement-coulée d'Harmalière, Isère (Fig. 1a). Ce dispositif a été complété par des acquisitions sismiques actives. L'objectif était d'imager la zone centrale du glissement et de comprendre ce qui contrôle la transition observée entre glissement et coulée, et de mettre en évidence un éventuel contrôle structural (Fig. 1b). Ici, nous utilisons à la fois les enregistrements issus des sources actives (20-40 Hz) et ceux du bruit sismique ambiant (1-6 Hz), afin d'estimer la distribution tridimensionnelle des vitesses des ondes P (V_p) et S (V_s) au sein du corps du glissement de terrain, et potentiellement dans le substratum rocheux sous-jacent. Les résultats présentés par la suite sont comparés aux connaissances géologiques disponibles à ce jour.

SITE D'ÉTUDE

Le glissement de terrain d'Harmalière (HAR), situé dans les Alpes occidentales françaises à environ 30 km au sud de Grenoble, à l'est du village de Sinard, est un glissement lent qui affecte une surface d'environ 3 km². Le versant instable est constitué de formations quaternaires, d'une épaisseur variant entre 0 et 250 m, et saturées à partir de quelques mètres de profondeur. Cette unité est composée d'alternances de 1) limons et argiles glacio-lacustres laminés, et, 2) de sédiments lacustres non laminés mélangés à des moraines (Fig. 1b). L'ensemble de cette unité, appelée argiles du Trièves, repose sur un substratum rocheux de forme irrégulière, constitué de calcaires marneux jurassiques, et est surmontée par des moraines. Ce glissement connaît des réactivations soudaines, les plus importantes ayant eu lieu en mars 1981 et juin 2016. Lors de ce dernier épisode, des déplacements atteignant environ 40 m en un mois ont été mesurés (Lacroix *et al.* 2018). En outre, la partie centrale

montre une transition entre un glissement à l'amont et une coulée à l'aval, la zone de transition étant encore difficile à localiser précisément et à interpréter à ce jour (Fig. 1b). Une synthèse des connaissances du site est disponible dans Fiolleau *et al.* (2021).

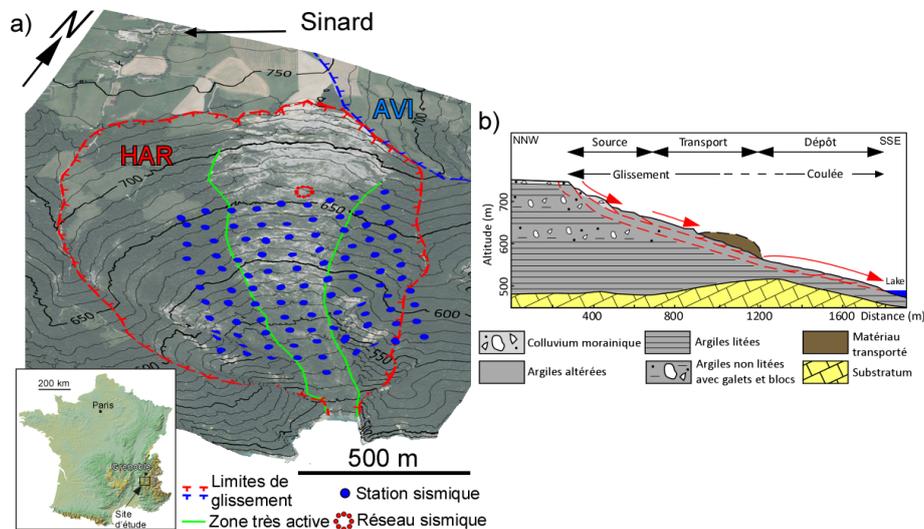


Fig. 1 – Présentation du site d'étude. a) Localisation du site d'étude et des expérimentations. HAR : glissement d'Harmalière ; AVI : glissement d'Avignonet. b) Coupe géologique dans la partie centrale du glissement d'Harmalière.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dispositif expérimental

Cent vélocimètres autonomes, large-bande, 3 composantes ont été déployés durant 1 mois en juin 2021 dans la partie centrale du glissement selon une maille d'environ 70 m de côté (Fig. 1a). La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 200 Hz. Dans le but de pouvoir déterminer la vitesse des ondes P, 3 sources sismiques verticales ont été générées à chaque station à l'aide d'une masse de 5 kg, seulement, pour cause d'accès difficile dans le glissement. Finalement, les positions des capteurs ont été déterminées par positionnement satellite.

Stratégies de traitement

Pour chaque source sismique, 3 tirs ont été sommés. Toutefois, les sources sismiques générées à la masse étant de faible énergie en regard de l'atténuation (distance source capteur maximum de l'ordre de 950 m), elles ne permettent pas de pointer les premières arrivées sur de grandes distances. La technique de Super-Virtual Refraction Interferometry (SVRI ; Bharadwaj *et al.* 2012) a été utilisée. Succinctement, elle consiste à corrélérer et sommer les signaux pour calculer une onde réfractée théorique, puis à convoluer celle-ci avec les signaux expérimentaux, dans le but d'augmenter le rapport signal-sur-bruit. Elle a permis d'accroître le nombre de pointés des premières arrivées, notamment pour des distance source-capteur de 400 à 700 m. Au-delà de cette distance, les pointés sont restés difficiles à réaliser. La comparaison des temps de propagation réciproques a permis d'évaluer la qualité des pointés, et les différences supérieures à 9 % ont été éliminées. Au final, environ 6 200 pointés ont été obtenus (sur 9 800 théoriquement possibles). Ils ont été inversés à l'aide du code TOMO-TV (*e.g.* Latorre *et al.* 2004) en prenant en compte la topographie, très complexe à l'intérieur du glissement, et qui ne peut être négligée.

Pour ce qui concerne les ondes S, les fonctions de Green ont été calculées pour chaque couple possible de capteurs par inter-corrélation de bruit de fond. Les traitements ont montré une limite de fréquence supérieure utilisable de 6 Hz, ce qui rend la résolution limitée dans la première dizaine de

mètres. Puis, la technique de tomographie d'équation d'onde (wave-equation tomography, WET) a été utilisée en 3D, à l'aide du code SEM46 (Trinh *et al.* 2019, Cao *et al.* 2022). La topographie a également été prise en compte.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Figure 2 présente les résultats des tomographies, sous la forme de coupes 2 extraites des volumes. La vitesse des ondes P (Fig. 2a) montre des vitesses inférieures à 1 000 m/s pour les premiers mètres sous la surface, ce qui correspond à des matériaux argileux non saturés. En dessous, la vitesse augmente rapidement jusqu'à plus de 1 500 m/s, ce qui correspond aux argiles saturées. Cette couche a une épaisseur de plus de 100 m à l'amont et diminue jusqu'à moins de 50 m à l'aval. Finalement, des vitesses supérieures à 2 200 m/s sont observées dans la partie la plus profonde du modèle. Cet horizon pourrait correspondre au substratum carbonaté.

Pour les ondes S (Fig. 2b), la première couche, de vitesse inférieure à 200 m/s, montre une diminution d'épaisseur depuis l'amont (environ 30 m) vers l'aval (environ 10 m). En dessous, les vitesses sont de l'ordre de 450 m/s, ce qui correspond à des argiles glissées mais assez peu remaniées. Dans la partie aval, il est possible d'observer un plongement du toit de cette couche vers le sud et qui semble disparaître vers l'ordonnée $y = 200$ m. Finalement, dans la partie centrale du modèle des zones avec des vitesses localement plus élevées (environ 600 m/s) sont détectées.

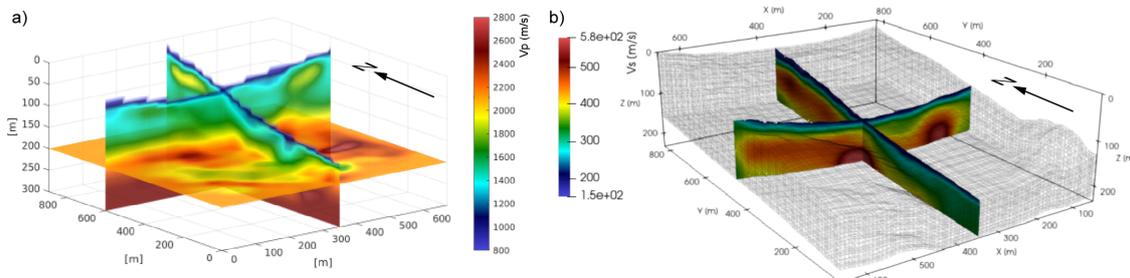


Fig. 2 – Modèles tomographiques. a) Tomographie des ondes P. b) Tomographie WET des ondes S.

Une coupe 2D extraite du modèle 3D WET de la Figure 2b est présentée conjointement avec une coupe géologique dans la Figure 3. L'épaisseur d'une trentaine de mètres du glissement à l'amont est en accord avec les résultats de Fiolleau *et al.* (2021) qui avaient trouvé cette même épaisseur suite à l'inversion des courbes de dispersion d'un réseau de bruit de fond déployé en juillet 2017, environ 50 m à l'amont du réseau sismique utilisé ici (voir l'implantation de ce réseau sismique sur la Figure 1a). La diminution de l'épaisseur de la couche active du glissement est également en accord avec les interprétations conduites à ce jour (Cf coupe géologique de la Figure 3). En dessous, les couches de vitesse intermédiaire (environ 450 m/s) correspondent à des argiles très faiblement remaniées (Fiolleau *et al.* 2021). Puis, dans la partie centrale de l'image en V_s entre 350 et 500 m de distance, un bombement de vitesse élevée (jusqu'à plus de 600 m/s) est détecté à 60 m de profondeur. Il reste difficile de dire si ces couches correspondent à des argiles non remaniées ou du substratum carbonaté altéré (V_s de l'ordre de 650 m/s). À l'aval, et en dessous du glissement actif, les vitesses sont de l'ordre de 350 m/s. Ces couches ne peuvent correspondre à du substratum, comme ce qui était interprété jusqu'à présent (voir coupe géologique sur le Figure 3). Par analogie avec ce qui est connu sur le glissement d'Avignonnet notamment, ces vitesses pourraient correspondre à des argiles remaniées, qui signeraient un ancien glissement de terrain à cet endroit.

Il est notable que le bombement observé en partie centrale du modèle correspond à la transition glissement-coulée. Il pourrait ainsi jouer le rôle d'un butée mécanique qui permettrait de bloquer l'évolution du glissement vers l'aval. Un mécanisme comparable a été proposé pour le glissement voisin d'Avignonnet (Bièvre *et al.* 2011). Puis, quand suffisamment de matériaux argileux sont accumulés, la contrainte cisailante exercée dépasserait la contrainte critique admissible, favorisant la génération d'un écoulement à l'aval (Fiolleau *et al.* 2021).

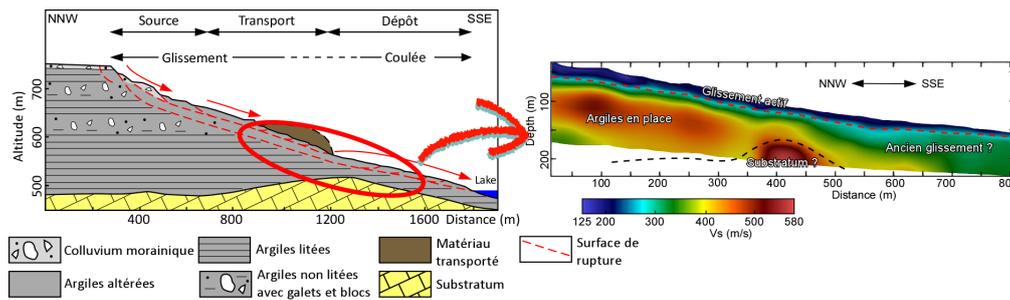


Fig. 3 – Comparaison entre le modèle géologique supposé et une image de la vitesse des ondes S extraite du modèle 3D WET dans la partie centrale du glissement.

CONCLUSIONS

Un réseau sismique dense de 100 vélocimètres a été déployé durant un mois au sein du glissement argileux d'Harmalière. Cette instabilité présente une transition entre glissement, à l'amont, et coulée, à l'aval. Le réseau a été centré sur cette zone de transition avec l'objectif de comprendre ce qui la contrôle. Des sources actives à chaque station ont permis de conduire une tomographie en 3D des ondes P. La tomographie en ondes S a été conduite à l'aide de la méthode d'équation d'ondes. Les résultats sont cohérents avec ce qui était connu ou supposé jusqu'à présent. La présence d'un bombement en zone centrale est confirmée et sa position correspond à celle de la transition entre glissement et coulée. Elle pourrait servir de butée mécanique et permettre l'accumulation de matériaux jusqu'à ce que la contrainte seuil soit dépassée. Finalement, en pied de glissement, des argiles sont détectées en profondeur, au contraire de ce qui était supposé jusqu'à présent. Des prospections complémentaires dans cette zone (e.g. tomographie de résistivité électrique) devraient permettre de confirmer ces observations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BIÈVRE G., KNIEß U., JONGMANS D., PATHIER E., SCHWARTZ S., VAN WESTEN C. J., VILLEMIN T., ZUMBO V., 2011**, Paleotopographic control of landslides in lacustrine deposits (Trièves plateau, French western Alps). *Geomorphology*, 125, 214-224.
- BHARADWAJ P., SCHUSTER G., MALLINSON I., DAI W., 2012** – Theory of supervirtual refraction interferometry. *Geophysical Journal International*, 188, 263–273.
- CAO J., BROSSIER R., GORSZCZYK A., MÉTIVIER L., VIRIEUX J., 2022** – 3D multi-parameter full-waveform inversion for ocean-bottom seismic data using an efficient fluid-solid coupled spectral-element solver. *Geophysical Journal International*, 229, 671–703.
- FIOLLEAU S., JONGMANS D., BIÈVRE G., CHAMBON G., LACROIX P., HELMSTETTER A., WATHELET M., DEMIERRE M., 2021** – Multi-method investigation of mass transfer mechanisms in a retrogressive clayey landslide (Harmalière, French Alps). *Landslides*, 18, 1981-2000.
- LACROIX P., BIÈVRE G., PATHIER E., KNIEß U., JONGMANS D., 2018** – Use of Sentinel-2 images for the detection of precursory motions before landslide ruptures. *Remote Sensing of Environment*, 215, 507-516.
- LATORRE D., VIRIEUX J., MONFRET T., MONTEILLER V., VANORIO T., GOT J.-L., LYON-CAEN H., 2004** – A new seismic tomography of Aigion area (Gulf of Corinth, Greece) from the 1991 data set, *Geophysical Journal International*, 159, 1013–1031.
- TRINH P. T., BROSSIER R., MÉTIVIER L., TAVARD L., VIRIEUX J., 2019** – Efficient 3D time-domain elastic and viscoelastic Full Waveform Inversion using a spectral-element method on flexible Cartesian-based mesh, *Geophysics*, 84, R75–R97.

ACQUISITION MULTI-METHODES POUR LA DETECTION DES VIDES DANS UNE MINE DESAFFECTEE

BITRI A.¹, BOUTEILLE S.², TRUFFERT C.², DIETZ M.,¹ JACOB TH.,¹ ARNAUD F.³.

¹ BRGM, Orléans, France, a.bitri@brgm.fr; t.jacob@brgm.fr

² IRIS-Instruments, Orléans s.bouteille@iris-instruments.com

² GEOSCOP, Libourne, France, florine.arnaud03@gmail.com

RESUME

Nous présentons ici les résultats d'une expérience conçue pour tester les capacités et le pouvoir de résolution d'une mesure de muons cosmiques dans un environnement minier par rapport à d'autres outils géophysiques standard : la gravimétrie et les études sismiques.

Mots clés : *Muographie, gravimétrie, sismique, cavité*

ABSTRACT

We present here the results of an experiment designed to test the capabilities and resolving power of a cosmic muon measurement in a mining environment against other standard geophysical tools: gravimetry and seismic surveys.

Key words: *Muography, gravimetry, seismic, cavity*

INTRODUCTION

La présence de vides dans le proche sous-sol cause des risques d'effondrements liés à l'altération des terrains sus-jacents. Pour cette raison, la détection de cavités souterraines est un enjeu majeur en géophysique appliquée à la proche surface. L'impact sur le signal géophysique de cavités dans le milieu souterrain est à ce jour encore très mal compris. Le grand nombre de typologies de cavités complexifie d'autant la mise au point de méthodes d'auscultation non destructives.

Les techniques géo-électriques sont largement utilisées grâce à un fort contraste de conductivité entre les cavités et les roches environnantes (Hutchinson 2005). Cependant, cette méthode n'est efficace que lorsque les dimensions latérales de la cavité sont supérieures à sa profondeur (Ogilvi 1957). L'autre limite repose sur l'interprétation des résultats qui peuvent être fortement influencés par la présence d'une couche de haute conductivité, même fine (Putiska et al. 2012).

En ce qui concerne les méthodes gravimétriques, un grand nombre d'études appliquées ont démontré leur capacité à détecter les cavités peu profondes (Debeglia et al. 2006). Cette technique, applicable même dans les zones urbaines à condition que des corrections appropriées soient apportées, est très prometteuse pour la détection des vides. Toutefois, dans le cas où les vides sont remplis de débris rocheux, le contraste de densité avec les roches hôtes environnantes pourrait être trop faible pour générer une anomalie gravimétrique détectable. L'autre limite à la genèse d'une anomalie gravimétrique détectable repose sur la dimension du vide par rapport à sa profondeur.

Des études récentes ont fait état de bons résultats pour l'imagerie des cavités à l'aide de méthodes sismiques à ondes de surface (Samyn et al. 2013). Cependant, l'interprétation n'est pas toujours évidente essentiellement parce que les dispositifs de mesures sont en 2D alors que les structures sous-jacentes du milieu et la topographie sont en 3D.

L'absorption de muons cosmiques (muographie) est une technique qui permet de mesurer les variations de densité à l'intérieur de la matière jusqu'à quelques centaines de mètres. George (1955) utilise cette technique pour déterminer la densité de roches au-dessus d'un tunnel et Alvarez et collaborateurs en 1971 pour la recherche de cavités funéraires inconnues dans la pyramide de Khephren. Ces dernières années, cette technique a été utilisée à partir de galeries souterraines pour scanner les grottes naturelles (Olah 2012), évaluer l'intégrité des tunnels (Thompson, 2019) ou l'évolution des glaciers (Nishiyama, 2017). Cependant, sa mise en œuvre sur le terrain implique que l'objet de l'investigation se situe entre le ciel et le télescope. L'étude présentée, réalisée par IRIS Instruments et le BRGM, avait pour but d'évaluer le potentiel de la muographie parmi d'autres méthodes éprouvées (micro-gravimétrie et sismique) pour une meilleure imagerie des galeries et des vides d'une mine abandonnée.

MINE DE FER DE MAY-SUR-ORNE

Le site de May-sur-Orne est situé en Normandie, à la limite nord-ouest du bassin sédimentaire de Paris (Fig. 1). La mine de fer a été creusée pendant des décennies à l'intérieur des deux flancs d'un synclinal. Dans la partie sud du synclinal, les travaux miniers ont atteint jusqu'à 400 m de profondeur, mais seuls les 50 premiers mètres demeurent au-dessus du niveau de l'eau après exploitation grâce à une sortie à flanc de colline juste au-dessus du niveau de l'Orne. Dans une partie de la mine, les tunnels passent sous un quartier d'habitation et traversent une route très fréquentée. Pour des raisons de sécurité, le site est surveillé en permanence. Des mesures sismiques et micro-gravimétriques ont été réalisées en surface. Le télescope à muons a pu être installé dans la partie sèche de la galerie, juste en dessous de la route.

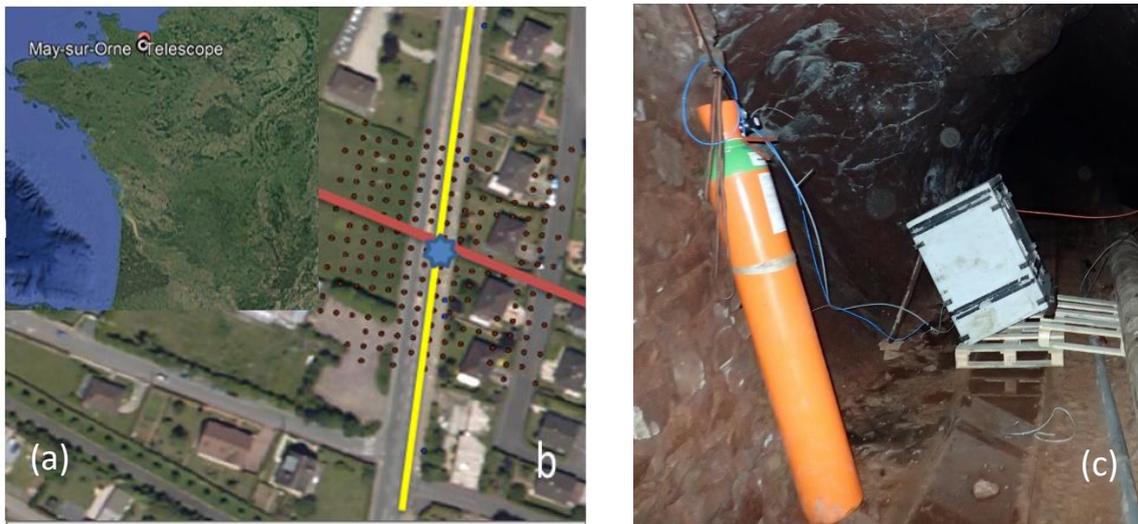


Fig. 1 – (a) Site de May-sur-Orne localisation du site (b) ligne sismique (jaune), points gravimétriques (points noirs) et position du télescope (bleu) (c) Installation du télescope dans la galerie.

Acquisition et traitement des données

Le relevé micro-gravimétrique a été effectué à l'aide de deux gravimètres relatifs Scintrex, un modèle CG-6 et un modèle CG-5. Au total, 163 stations gravimétriques ont été mesurées sur une maille de 5 mètres sur 5. L'altitude des stations a été obtenue par nivellement direct avec une précision de l'ordre du centimètre. Pour obtenir l'anomalie de Bouguer (Fig. 2a), les mesures ont été corrigées de la dérive instrumentale, des marées terrestres, de l'altitude, de la latitude et des effets du terrain à l'aide du logiciel propriétaire du BRGM. Environ 20 % des stations ont été reprises au cours de l'étude afin d'évaluer la répétabilité des mesures gravimétriques. En tenant compte des erreurs de nivellement et de correction de terrain, l'incertitude sur l'anomalie de Bouguer est estimée à 8 μ Gal. La carte des anomalies de Bouguer, montre des valeurs faibles au sud (0.02-0.04mGal) et des valeurs plus élevées au centre et au nord de la zone d'étude (0.08-0.1mGal). Nous interprétons cette discontinuité gravimétrique comme étant due au contact lithologique entre les formations de grès de faible densité au sud et les formations de schiste de plus forte densité au nord, qui comprennent la formation de minerai de fer, immédiatement au-dessus de la formation de grès.

L'acquisition sismique a été réalisée avec un dispositif de 120 traces espacées de 2 m en utilisant trois sismographes Geode à 24 canaux et un sismographe Stratavisor à 48 canaux. Les données enregistrées ont été traitées par différentes approches afin de tirer le meilleur parti des ondes réfractées et des ondes de surface. Les premières arrivées de toutes les prises de vue enregistrées le long du profil 2D ont été sélectionnées pour construire un modèle de vitesse proche de la surface par tomographie de réfraction. Le résultat de l'inversion tomographique présenté sur la figure 2b montre une anomalie de faible vitesse des ondes P (1600-1900m/s) probablement due à la présence d'une zone de travaux remblayée.

Le télescope à muons a été installé dans une galerie à 50 m de profondeur par rapport à la surface. La zone de danger est située à l'aplomb, juste au-dessus de la projection verticale du télescope. L'acquisition a duré 102 jours. Le télescope mis en place est de type détecteur gazeux Micromégas (Procureur et al. 2013), constitué de 4 plaques de détection d'une surface de 50cm x 50cm. Au bout de 102 jours de présence, le télescope a mesuré 700 000 muons. La carte du nombre de muons obtenue est présentée sur la figure 3.

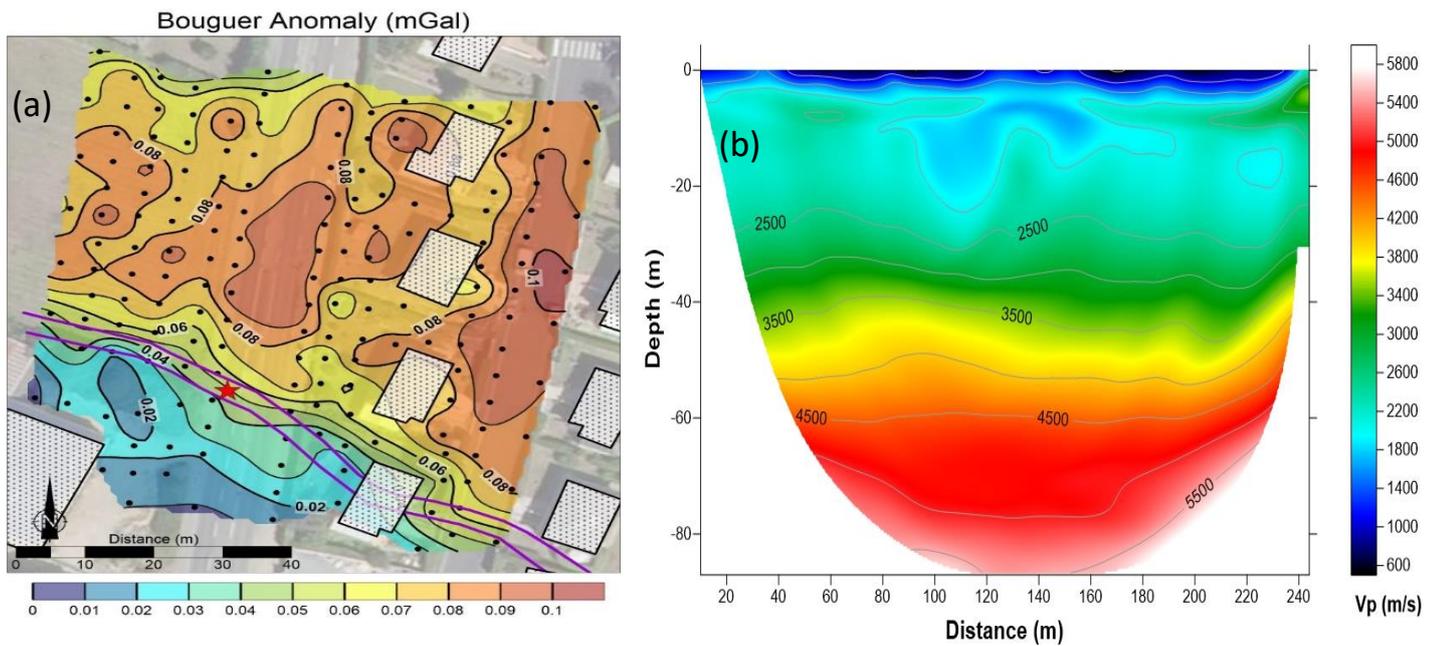


Fig. 2. (a)-Carte des anomalies de Bouguer ($d=2,6$) calculée à partir du relevé de micro-gravimétrie enregistré au-dessus de la galerie (ligne violette) et du télescope à muons (étoile rouge) (b)- Modèle de vitesse P obtenu par la tomographie réfraction.

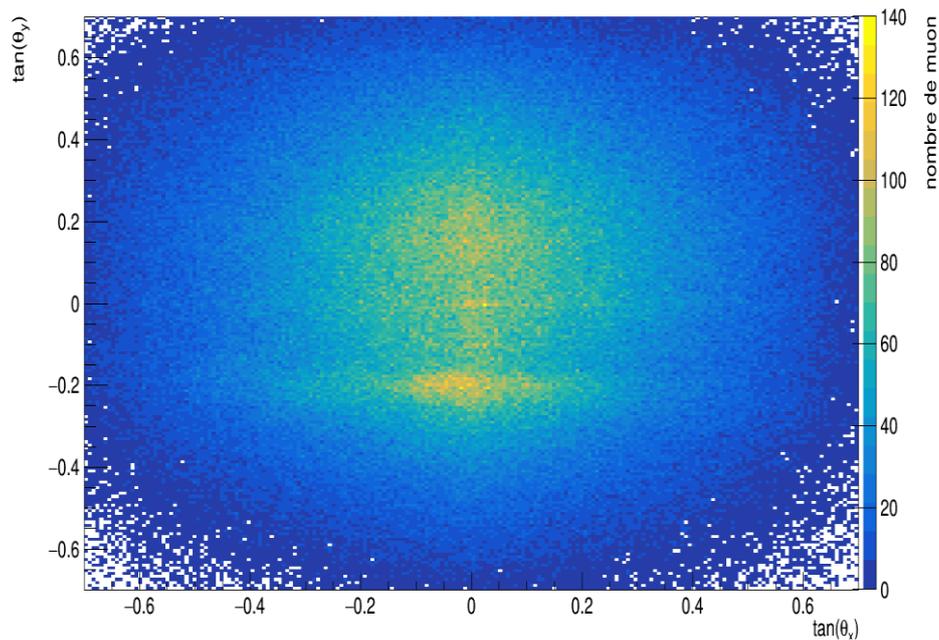


Fig. 3 -Carte du nombre de muons obtenu lors de la campagne de May-sur-Orne

On y distingue une zone entre $(-0.2 < \tan(\theta_x) < 0.1)$ où le nombre de muons est plus important, et donc la densité plus faible. Des simulations numériques des flux de muons ont été réalisées pour confirmer ou pas la présence de vide. Plusieurs scénarios ont été considérés en rajoutant au fur et à mesure des objets géologiques dans lesquels la calcite a une densité $\rho_{\text{calcite}} = 2,71 \text{ g.m}^{-3}$, la veine de minerai de fer est constituée d'hématite et de calcite en proportion variable. L'hématite a une densité de $5,26 \text{ g.m}^{-3}$ et elle est composée de 2 atomes de fer et de 3 atomes d'oxygène. Différents paramètres varient dans ces modèles : l'épaisseur horizontale de la couche, le pendage, la position des tunnels dans la couche et la proportion d'hématite de la couche (20 % à 80 %). Le modèle qui explique le mieux les données mesurées parmi les modèles testés (Fig. 4) est

une zone de très faible densité, parallélépipède incliné de la même façon que la couche minéralisée et a pour dimension 5 m x 24 m x 12 m.

De façon indiscutable, la méthode sismique a permis de repérer une anomalie de faible vitesse sous le quartier d'habitation. Etant donné la connaissance parcellaire des galeries de la mine, cette anomalie pourrait correspondre à une zone remblayée déjà indiquée dans les plans d'exploitation de la mine. En revanche, cette anomalie ne permet pas de bien discerner une cavité.

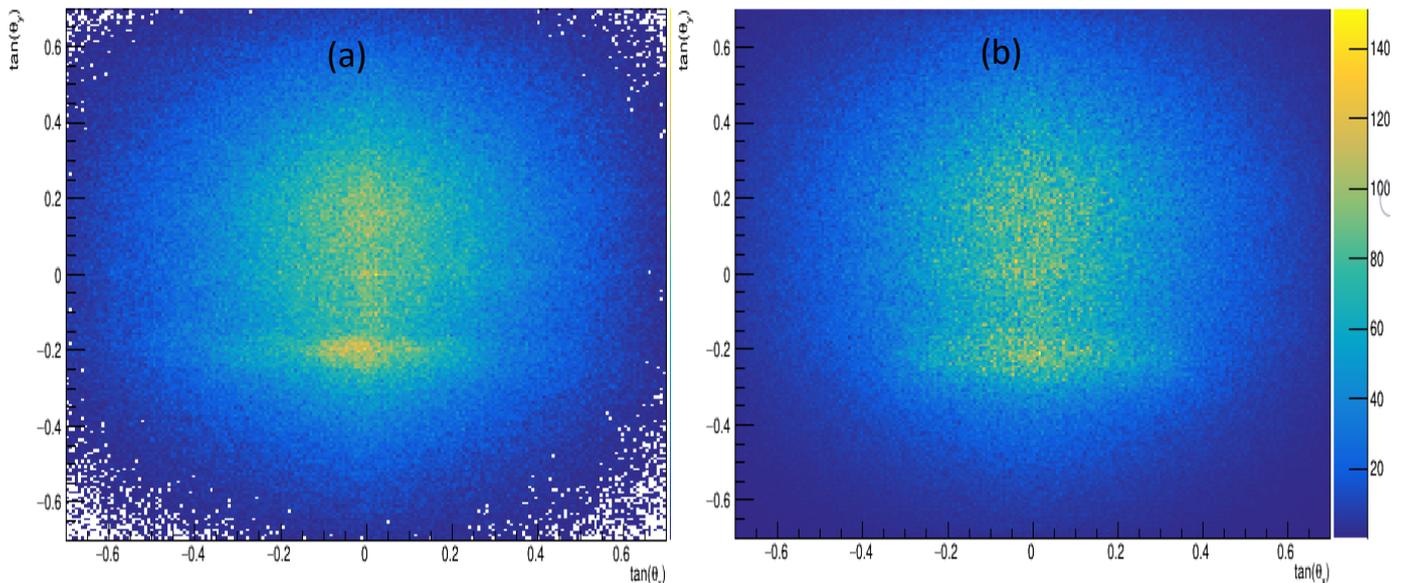


Fig. 4. (a) Carte du nombre de muons mesurés par le télescope. (b) Carte du nombre de muons obtenus par simulation numérique

CONCLUSIONS

De façon indiscutable, la méthode sismique a permis de repérer une anomalie de faible vitesse sous le quartier d'habitation. Etant donné la connaissance parcellaire des galeries de la mine, cette anomalie pourrait correspondre à une zone remblayée déjà indiquée dans les plans d'exploitation de la mine. En revanche, cette anomalie ne permet pas de bien discerner une cavité.

L'étude gravimétrique (anomalie de Bouguer) montre une anomalie positive correspondant aux formations de veines de fer et de schistes, mais aucune anomalie négative claire compatible avec la position de la zone de travaux ne peut être trouvée. La limitation de la micro-gravimétrie peut être liée à la forte densité du fer dans les veines.

En revanche, la comparaison des données mesurées avec le modèle obtenu par simulations du flux de muons montre la présence d'une zone à faible densité d'environ 1 440 m³. La méthode de tomographie muonique est plus précise pour localiser la présence de la zone altérée comparée à la méthode sismique. Des trois méthodes, la muographie apporte la meilleure définition de la « cavité ». Une amélioration de l'algorithme d'inversion permettrait de préciser la géométrie de la cavité, les contrastes de densité entre les différents milieux et leurs incertitudes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GEORGE E.P., 1955-** Cosmic rays measure overburden of tunnel », *Commonw. Eng.*, vol.,1955, p. 455–457
- OGILVI A.A., 1957-** *Geoelectric Methods for Studying Karst*. Moscow: Moscow State University
- ALVAREZ L.W., 1970-** Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, vol. 167, 1970, p. 832–839
- HUTCHINSON J., 2005** -Electrical imaging of deep clay-mine voids: *SAGEEP*, 18 (1), 247–279
- DEBGLIA N., BITRI, A., THYERRY P., 2006-** Karst investigations using microgravity and MASW. Application to Orléans, France: *Near Surface Geophysics*, 215-225
- PROCUREUR S., DUPRE R., AUNE S., 2013-** Genetic multiplexing and first results with a 50×50 cm² micromegas. *Nucl. Instrum.* **729**, 888–894.
- SAMYN K., BITRI A., GRANDJEAN G., 2013-** Imaging a near-surface feature using cross-correlation analysis of multi-channel surface wave data: *Near Surface Geophysics*, 11, 1-10.

COMPRENDRE LES TRANSFERTS SOUTERRAINS DE LIXIVIAT DEPUIS LES ANCIENNES DECHARGES

LEVY Léa¹, LONGUEVERGNE Laurent¹, NICOLLIN Florence¹, NAUSSANS Léa², FIANDACA Gianluca³, GALLI Stefano³, COMPOSTELLA Chiara³, CAMERLYNCK Christian⁴, FLORSCH Nicolas⁴, ROBIN Henri⁴,

¹Géosciences Rennes UMR 6118, CNRS, Université de Rennes, Rennes, France, lea.levy@univ-rennes.fr

² Etudiante à l'EOST (Strasbourg) et stagiaire CNRS pour son M1 en 2024.

³ Université de Milan, Milan, Italie, gianluca.fiandaca@unimi.it

⁴ Sorbonne-Université, Paris, France, christian.camerlynck@sorbonne-universite.fr

RESUME

6 lignes MAX

Nous présentons les résultats préliminaires issus d'une étude interdisciplinaire menée sur deux sites en territoire breton : un centre d'enfouissement technique (CET) et une décharge non recensée. Sur les deux sites, des panaches souterraines de lixiviats ont été identifiées par des méthodes géophysiques de proche surface, notamment l'ERT, le TDIP et le tTEM. Sur le CET, les déchets eux-même ont également pu être cartographiés. Les résultats d'imagerie complètent des mesures de chimie des eaux réalisées en rivière et permettent d'établir la connectivité entre les déchets et la contamination des écosystèmes en aval.

Mots clés : décharges ; lixiviats ; contamination souterraine ; méthodes géo-électriques ; méthodes électromagnétiques ; Bretagne

INTRODUCTION

Nos sociétés utilisent le milieu souterrain pour exploiter ses ressources en eau et y disposer ses déchets. Ces deux usages, pensés et gérés séparément peuvent interférer par l'écoulement de nappes d'eau souterraine, qui connecte différents domaines. En effet, bien que des dispositifs techniques aient (parfois) été mis en œuvre pour confiner les déchets, le fonctionnement des décharges est défini par le cycle hydrologique. Les lixiviats, liquides résiduels issus de la macération des déchets avec les eaux d'infiltration, se propagent dans le sol et les eaux souterraines, créant un panache de contamination. Les écoulements souterrains permettent de transporter les contaminants en profondeur, sur des distances importantes, mais également de faire converger ces contaminants vers les écosystèmes de surface. Les suivis en surface de la qualité d'eau (outils des gestionnaires) sont insuffisants pour définir un transfert potentiel de contaminants vers les écosystèmes. L'imagerie géophysique permet en revanche de rendre visible les contaminations souterraines invisibles, et reste particulièrement efficace, notamment pour spatialiser les informations obtenues par une caractérisation détaillée de la composition chimique et biologique en certains points d'échantillonnage.

Nous proposons ici de présenter les résultats géophysiques issus d'une étude interdisciplinaire, financée par la MITI du CNRS, portant sur les pollutions souterraines liées à d'anciennes décharges dans une commune littorale de Bretagne. Notre point de départ est l'alerte lancée par les gestionnaires de l'eau suite à des mesures de polluants excédant les seuils dans un cours d'eau en aval d'un centre d'enfouissement technique. Une première étude socio-historique de la commune a mis en évidence la présence d'un ensemble de décharges anciennes, qui n'ont pas toujours été autorisées et décrites, et de pollutions désignées comme telles par les riverains. L'invisibilisation des déchets, à la fois physiquement en les enfouissant, et dans le débat public, semble être un frein à la mise en place d'une gestion collective et

rationnelle des pollutions qui en découlent. En outre, l'ampleur et l'impact de la pollution souterraine sur les écosystèmes et la santé sont difficiles à quantifier et à contrôler du fait du rôle joué par des processus souterrains. Dans ce contexte, nous utilisons l'imagerie géo-électrique, magnétique et électro-magnétique pour mettre en visibilité à la fois les déchets et les lixiviats qui leur sont associés.

SITES D'ETUDE ET METHODES D'INVESTIGATION

Quatre campagnes géophysiques de terrain ont été réalisées (avril-mai-septembre-novembre 2024), se concentrant dans un premier temps sur le centre d'enfouissement technique (CET), puis ont été élargies à une autre décharge, non recensée dans les bases de données. Une cinquième campagne est prévue pour avril 2025 sur les deux sites.

Les méthodes utilisées incluent (i) le tomographie de résistivité électrique et de polarisation provoquée en domaine temporel, (ii) des sondages électromagnétique en domaine fréquentiel (FDEM), (iii) une cartographie 3D par *towed time-domain electromagnetics* (tTEM), (iv) des mesures de variation du champ magnétique terrestre par magnétomètre à césium et (v) des mesures de potentiel spontané. Par ailleurs, des suivis continus de température et conductivité électrique ont été mis en place (i) dans la rivière en aval du CET, (ii) dans la même rivière en amont du CET et (iii) dans une piézomètre en aval du CET mais en amont de la rivière.

RESULTATS

Dans un premier temps, une cartographie qualitative a été effectuée à l'aide d'un instrument frequency-domain EM (EM34), qui a permis d'identifier (i) des changements brutaux de conductivités électriques au niveau du CET, (ii) des valeurs négatives au sud de la décharge et (iii) aucune variation notable en aval de la décharge (Fig. 1).

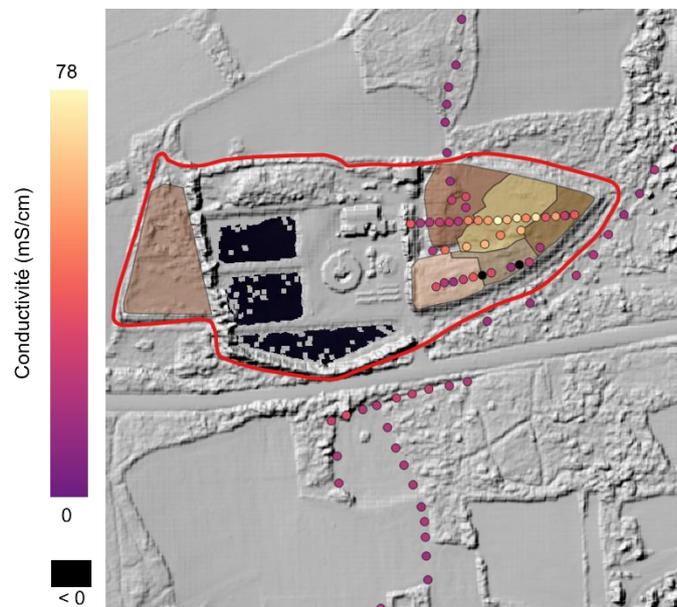


Fig. 1 –Sondages FDEM sur le centre d'enfouissement technique (CET, délimité par le contour rouge) et en aval du CET. Les mesures de conductivité ainsi effectuées moyennent le signal entre 0 et 7.5 m.

Par la suite, les données de tomographie de résistivité électrique et de polarisation provoquée ont permis d'identifier deux types de signatures électriques (Fig. 2) : une pour le lixiviat de la décharge (la résistivité est faible) et une pour les déchets eux-mêmes (la chargeabilité est élevée). Les interprétations des inversions de chargeabilité sont également confirmées par les anomalies magnétiques (Fig. 2). Ces signaux indiquent clairement la présence de métaux, probablement les feuilères métalliques utilisées pour comprimer les balles de déchets.

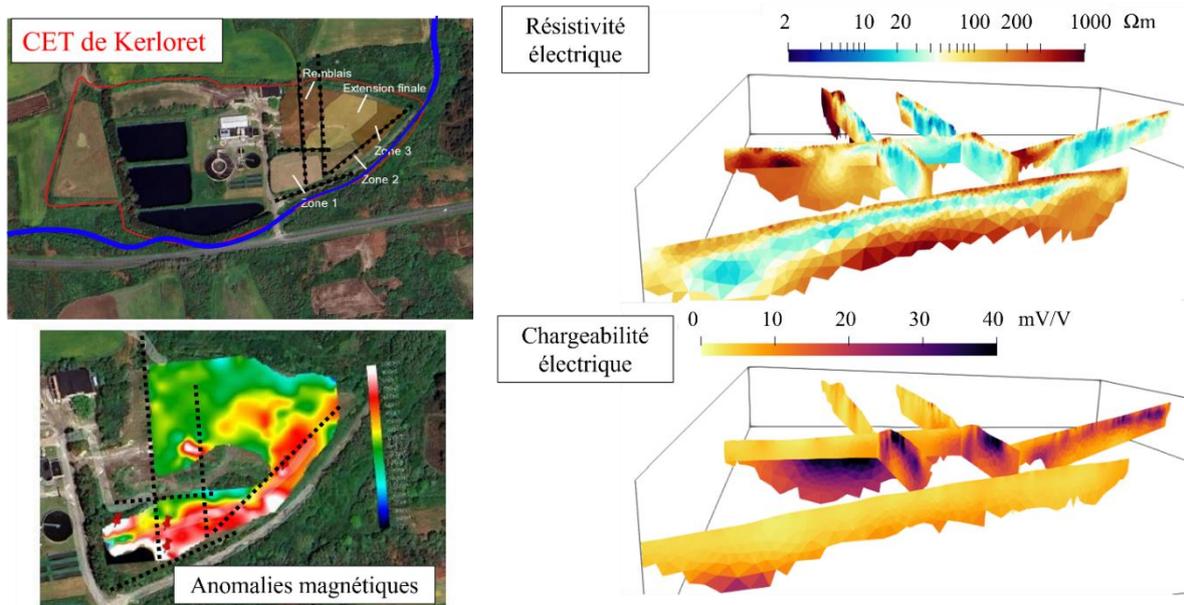


Fig. 2 –Imagerie géo-électrique et magnétique sur le centre d'enfouissement technique (CET). A droite : mesures de surface par ERT et TDIP. La position des profils est représentée en noir sur les figures de gauche.

La cartographie plus systématique mise en œuvre avec le tTEM montre des effets de polarisation provoquée (PP) très importants dans le signal time-domain EM, qui sont probablement responsables des valeurs négatives observées avec les mesures en frequency-domain EM.

La prise en compte des effets PP dans l'inversion TEM, aussi bien sur le CET que sur l'autre décharge, a permis d'obtenir un modèle 3D de la résistivité et de la chargeabilité (Fig. 3). Sur la décharge non recensée, ces modèles montrent d'abord une fine couche de 4 m de sol conducteur et chargeable au-dessus d'un granite très résistif. Ils montrent également un fort signal conducteur, interprété comme émanant des lixiviats et se dirigeant vers le sud-ouest. Ces résultats restent à confirmer avec les mesures à venir.

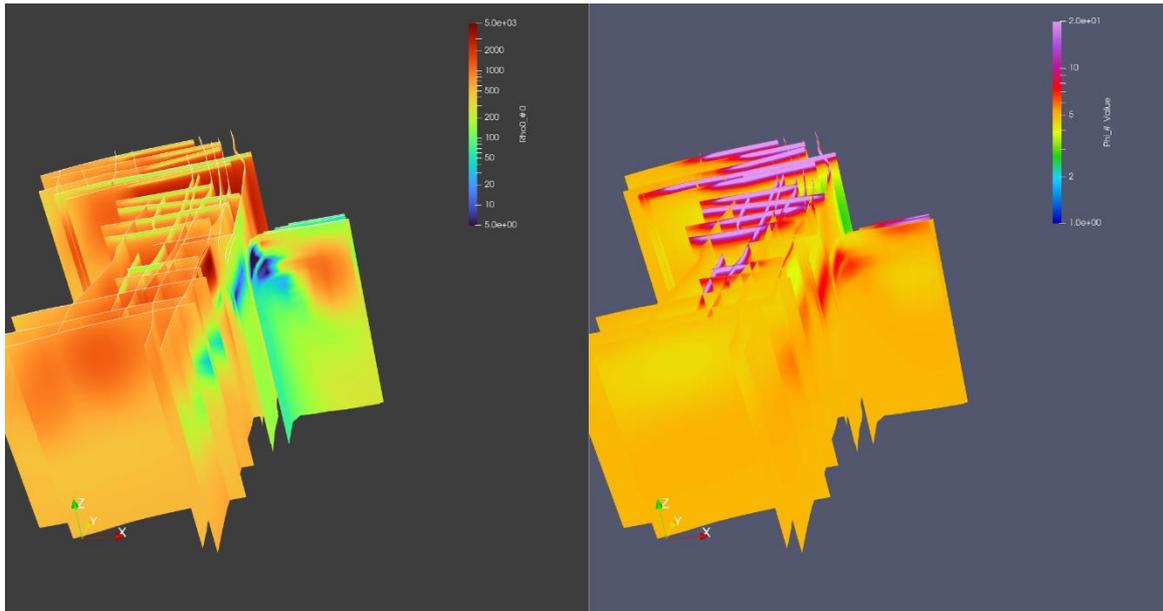


Fig. 3 – Résultats préliminaires d’inversion des données tTEM sur la décharge non recensée, en incluant les effets PP dans l’inversion EM. A gauche : résistivité électrique. A droite : angle de phase (équivalent à la chargeabilité).

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus jusqu’à présent montrent la pertinence et la complémentarité des méthodes géo-électriques et électromagnétiques pour étudier à la fois les déchets et les transferts souterrains de lixiviat venant des anciennes décharges. Des mesures plus systématiques de potentiel spontané restent à implémenter. Le contexte granitique breton présente un défi spécifique en termes de rapport signal-sur-bruit, notamment pour l’imagerie électromagnétique, où les effets PP combinés à la propagation limitée du courant rend les données difficiles à analyser.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BJERG, P. L., RUEGGE, K., PEDERSEN, J. K., & CHRISTENSEN, T. H. (1995). Distribution of redox-sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental science & technology*, 29(5), 1387-1394.

MAURYA, P. K., RØNDE, V. K., FIANDACA, G., BALBARINI, N., AUKEN, E., BJERG, P. L., & CHRISTIANSEN, A. V. (2017). Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography-with correlation to ionic strength measured in screens. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 1-8.

PEDERSEN, J. B., MAURYA, P. K., KRAGHEDE, R., CHRISTIANSEN, A. V., NIELSEN, O. F., & PEDERSEN, J. K. (2021). *Optimized management of point-source polluted sites by using 3D geophysics*. Paper presented at the NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics, Bordeaux, France.

DETECTION D'UNE ANCIENNE DECHARGE EN MILIEU DIFFICILE D'ACCES PAR APPROCHE CONJOINTE DE PROFILS ERT ET D'AEROMAGNETISME EN DRONE

NOUVEAU M.¹, GAVAZZI B.², JOLY J.³, THAVEAU A.⁴, BERTRAND L.⁵, GALLUSER F.⁶

¹ ENVISOL, La-Tour-du-Pin, FRANCE, mc.nouveau@envisol.fr ²ENEREX, Vandœuvre-lès-Nancy, FRANCE, bruno.gavazzi@enerex.fr ³ ENVISOL, La-Tour-du-Pin, FRANCE, j.joly@envisol.fr ⁴ ENVISOL, La-Tour-du-Pin, FRANCE, a.thaveau@envisol.fr ⁵ENEREX, Vandœuvre-lès-Nancy, FRANCE, lionel.bertrand@enerex.fr ⁶COLEOPTERE, Strasbourg, FRANCE, francis.galluser@coleoptere.fr

RESUME

Dans le cadre de la réhabilitation d'une ancienne décharge sur une surface fortement végétalisée, une cartographie magnétique par drone, complétée par des profils ERT, ont été déployés. Les mesures drones ont été faites à différentes élévations en fonction de la praticabilité pour s'assurer de capter les limites de ladite décharge. Les résultats drone mettent en évidence un ensemble contrastant fortement avec l'encaissant aux différentes échelles d'observation, ce qui a permis de délimiter une partie de la zone d'enfouissement. Les résultats ERT montrent une couche de terrain d'environ 2 m d'épaisseur, possiblement du remblai, reposant sur un terrain conducteur a priori lié aux déchets de plus de 10 m d'épaisseur. Les résultats des deux méthodes sont concordants et complémentaires, ce qui est prometteur pour l'étude de site à fortes contraintes d'accès.

Mots clés : décharge, magnétique, drone, ERT, accès

ABSTRACT

In the framework of a rehabilitation project of an old landfill with a dense vegetation cover, a survey combining aeromagnetic drone measurements and ERT profiles has been conducted. The drone-borne data have been recorded at different elevations according to practicability, in order to maximize the chances of detection. The drone results reveal a target contrasting greatly with the surroundings at all scales of observation, which allowed to delimit part of the landfill area. The ERT results show a 2m thick layer of soil, possibly backfill, on top of a 10m thick conductive body interpreted as linked to the waste constituting the landfill. The results of both methods are coherent and complementary, and promising for the study of sites with rugged access and terrain.

Key words: landfill, magnetism, drone, ERT, access

INTRODUCTION

Dans le cadre de la réhabilitation d'une ancienne décharge, des mesures géophysiques ont été réalisées afin d'avoir des informations sur la distribution du sol pour l'étude de faisabilité du projet (Cavalcante *et al.*, 2019). En effet, l'emprise se situe sur une ancienne décharge référencée (BASIAS), mais aucune information sur les profondeurs d'enfouissement n'est disponible. Le site s'étend sur environ 16 ha divisés en deux (seule la zone V1 est à l'étude) et est entièrement végétalisé (herbes hautes, forêt...), ce qui rend l'accès difficile. Des mesures magnétiques par drone aérien, ainsi que sept profils ERT ont été réalisés pour tenter de cartographier l'emprise des déchets.



Figure 1 – Répartition des mesures géophysiques réalisées sur l’emprise.

CARTOGRAPHIE MAGNETIQUE PAR DRONE

Les mesures aéroportées réalisées

Les mesures ont été réalisées à l’aide d’un système de mesure DIEFI utilisant un capteur fluxgate trois composante (Bartington MAG03), intégré sur un drone Mavik 3 entreprise (DJI) par ENEREX et son partenaire COLEOPTERE. Les données ont ensuite été traitées et interprétées à l’aide d’une suite logicielle propriétaire d’ENEREX. L’intégration et la procédure se basent sur des travaux précédents permettant d’obtenir des systèmes compacts avec une précision de l’ordre du nT (Gavazzi et al., 2016 ; Gavazzi et al., 2019). Afin d’étudier la faisabilité de la méthode dans le contexte de l’étude, six vols différents ont été réalisés ; un premier à 22 m d’élévation (juste au-dessus de la canopée) couvrant toute la zone, puis des vols sur surfaces plus dégagées entre 2 et 12 m d’élévation (Tableau 1).

Tableau 1 - Récapitulatif des mesures magnétiques réalisées.

Vol	Hauteur (m)	Espacement des profils (m)	Espacement des traverses (m)	Surfaces couvertes (m ²)
1	22	15	36	84 700
2	5	3	12	6 250
3	5	3	12	7 625
4	2	2	6	683
5	12	5	5	1 085
6	11	5	12	3 350

Résultats des mesures drones

Les résultats obtenus présentent une très bonne corrélation entre les mesures d’ensemble à 22m et celles sur zones plus restreintes entre 2 et 12 m d’élévation (Figure 2).

Sur la carte globale, une anomalie de très forte intensité est visible sur toute la moitié ouest de la zone et bien délimitée par le gradient entre tons rouges et bleus. Cette limite est confirmée par les vols à faible élévation. Dans la partie centrale, on peut remarquer une zone moins homogène avec une variation de nuances orange-verte sur la carte globale. Des anomalies dipolaires sont également mieux définies sur les cartes plus proches du sol. Cela signifie que des objets ferromagnétiques sont présents en masse depuis la proche surface jusqu'à plusieurs mètres de profondeur (saturation à toutes les échelles).

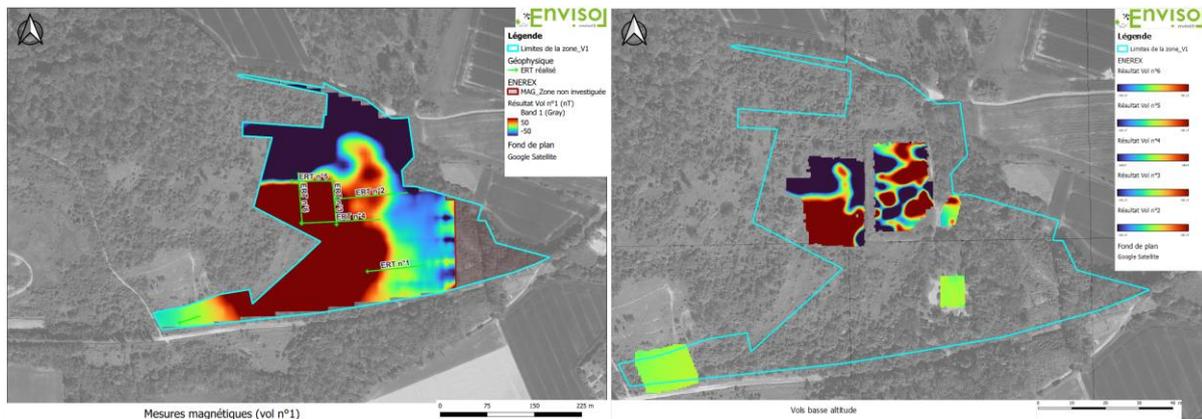


Figure 2 - Mesures magnétiques obtenues sur le vol n°1 (haute altitude) à gauche et sur les vols de 2 à 6 (basse altitude) à droite.

ETUDE EN PROFONDEUR PAR ERT

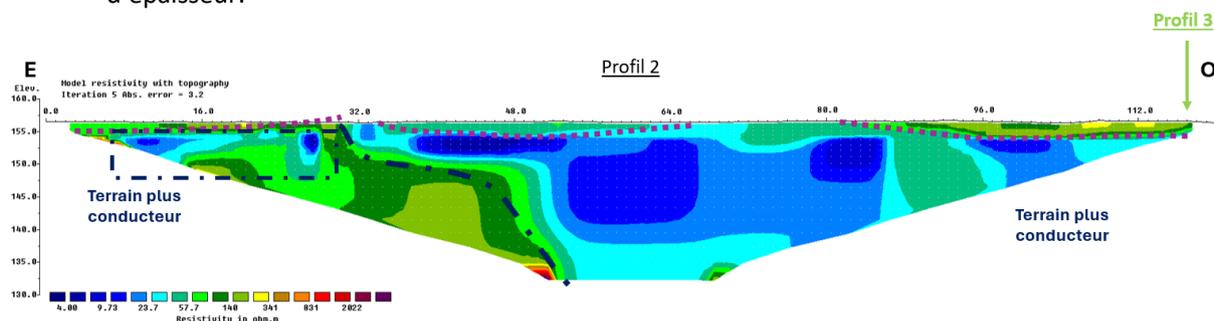
Profils réalisés

Au total, 7 profils ERT ont pu être réalisés (Figure 1). Les mesures sur site ont été adaptées aux spécificités du site (végétation dense et topographie). La longueur des profils varie donc entre 38 et 130 m de long avec des espacements inter-électrodes entre 1 et 2 m en configuration Wenner-Schlumberger.

Résultats ERT

Plusieurs niveaux de résistivité électrique sont plus ou moins distinguables sur les 7 profils et dont l'interprétation s'est appuyée sur les recherches bibliographiques réalisées en amont de l'étude :

- une couche de surface avec des valeurs de résistivité entre 50 et plus de 850 $\Omega.m$ (tons jaunes). Cette couche peut atteindre 1,5 à 2,5 m de profondeur. Elle est présente tout au long des profils de façon tabulaire la plupart du temps et correspondrait à une couche de remblais ;
- un terrain plus conducteur sur toute la longueur du profil avec des valeurs de résistivité entre 4 et 100 $\Omega.m$. Ce terrain peut correspondre à la zone de décharge recherchée, présent sous la couche de surface. Cette couche s'étend jusqu'à la profondeur d'investigation du profil, soit plus de 14 m d'épaisseur.



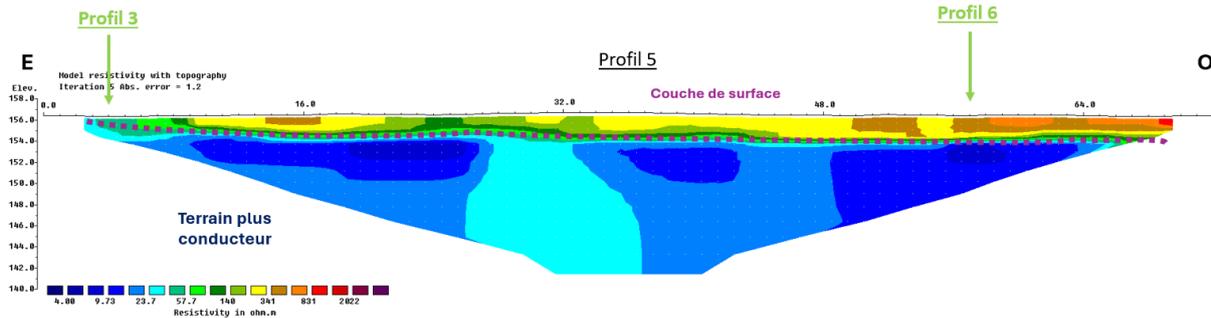


Figure 3 - Coupes de résistivité électrique du sous-sol obtenue sur le profil 2 en haut et sur le profil 5 en bas.

CONCLUSIONS

Les résultats géophysiques obtenus avec les deux méthodes sont concordants. La résistivité électrique baisse avec l'augmentation de l'intensité magnétique de l'anomalie correspondant à la position attendue de l'ancienne décharge, comme attendu.

Les résultats cartographiques obtenus par magnétométrie ont permis de repérer les bordures de la décharge sur la zone V1 sur la partie centrale et est. D'après ces mêmes résultats et les photos aériennes historiques, la zone de déchets s'étend dans la partie ouest vers la zone V2 (non étudiée). Les mesures de résistivité électrique s'orientent vers un modèle à 2 couches :

- une couche superficielle (a priori des remblais) plus résistante de quelques décimètres à 2 m de profondeur a pu être mise en évidence (sur les profils 2,3,4,5 et 6). Les valeurs de résistivité électrique (vers 300 Ω .m) associées à cette couche peuvent correspondre à une nature de terrain argilo-sableuse plus ou moins humide (remblais) ;
- une couche plus conductrice (<50 Ω .m) en profondeur pouvant aller à plus de 17 m de profondeur qui correspondrait aux déchets.

À l'aplomb des zones sans anomalie magnétique notable, les mesures électriques effectuées montrent des terrains plus résistants. Il est donc probable que les terrains sous-jacents dans ces zones contiennent un volume moins voire peu important de déchets.

Cette méthodologie a également été déployée sur un autre site dans des conditions de praticabilité plus extrêmes et sur des couches de déchets théoriques moins épaisses. Les résultats sont également concordants. Si cette méthodologie reste à affiner, notamment concernant l'exploration de ses limites, les résultats à ce stade sont très positifs et prometteurs et ouvrent de nouvelles possibilités d'investigation de zones polluées. En revanche, elle n'a été déployée que pour la détection de masses métalliques conséquentes et vient s'appuyer sur les renseignements historiques disposés en amont de la géophysique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAVALCANTE FRAGA L.H., SCHAMPER C., NOËL C., GUÉRIN R., REJIBA F., 2019 - Geometrical characterization of urban fill by integrating the multireceiver electromagnetic induction method and electrical resistivity tomography: A case study in Poitiers, France. *Eur J Soil Sci.* 2019; 70:1012–1024.

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

GAVAZZI B., LE MAIRE P., MERCIER DE LEPINAY J., CALOU P., MUNSCHY M., 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. *Geomech. Energy Environ.* 20, article 100117.

SUIVI DE LA PERCOLATION DU LIXIVIAT DANS L'ANCIENNE DECHARGE D'AGOE-NYIVE AU SUD TOGO

YALO E. N.^{1,2}, PEKEYI G. M.³, KOUNIKA E.^{2,4} RAZACK A.⁴ ET ZANNOU B.^{2,4}

¹Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), Bénin. yalonicaise@yahoo.fr

²Institut National de l'Eau (INE), Bénin

³Université de Lomé, Togo.

⁴Société de Géophysique d'Exploration et d'Exploitation Minière (SG2EM), Bénin

RESUME

La TRE et la magnétométrie ont été déployées sur la décharge d'Agoè Nyivé, afin de suivre la percolation du lixiviat. La cartographie magnétique a montré l'hétérogénéité des déchets enfouis, avec des amplitudes de valeurs d'anomalie magnétique au-delà de 400 nT. La section TRE a fait ressortir la géométrie du panache de lixiviat jusqu'à 30 m de profondeur, au-delà du niveau statique de 20 m de la nappe. Les résultats montrent que la percolation du lixiviat bien qu'ayant atteint la nappe, comme à Hèvlé, ne se reprend pas de manière homogène dans les déchets qui bloquent par endroits son infiltration.

Mots clés : *Lixiviat, Nappe souterraine, Magnétométrie, TRE.*

MONITORING OF LEACHATE PERCOLATION IN THE FORMER AGOE-NYIVE LANDFILL IN SOUTHERN TOGO

ABSTRACT

ERT and magnetometry were deployed at the Agoè Nyivé landfill to monitor leachate percolation. Magnetic mapping revealed the heterogeneity of the buried waste, with magnetic anomaly values exceeding 400 nT. The ERT section revealed the geometry of the leachate plume down to a depth of 30m, i.e. above the 20m water table. The results show that although leachate percolation has reached the water table, as at Hèvlé, it is not evenly distributed in the waste, which in places, blocks infiltration.

Key words: *Leachate, Groundwater, Magnetometry, ERT.*

INTRODUCTION

Dans les villes d'Afrique à l'instar du Togo, chaque famille produit quotidiennement quelques kilogrammes de déchets domestiques qui sont ensuite collectés et acheminés des ménages vers les décharges municipales pour y être déposés. La gestion de ces déchets urbains suit un schéma classique : la pré collecte, la collecte, le transport et la mise en décharge finale (Onibokun, 2001). Cependant, en Afrique, cette forme d'élimination n'intègre pas souvent le traitement et la valorisation des différentes fractions afin de minimiser ou de supprimer les impacts sanitaires et environnementaux (Dabire *et al.*, 2018). Au Togo, la décharge d'Agoè-Nyivé, une des plus grandes et unique décharge finale de la ville de Lomé, suscite beaucoup de craintes et de débats car elle est susceptible de contribuer à une forte dégradation du milieu naturel. En effet, les environs du site de cette décharge sont atteints par l'extension anarchique des habitations, qui subissent des nuisances provenant de cette décharge. Le risque d'une forte migration de la pollution vers les profondeurs persiste (Bassaï *et al.*, 2018) Depuis son officialisation en tant que décharge municipale en début 2001, le taux de collecte des ordures ménagères est passé de 30% en 1995 à 70% en 2015, avec des estimations indiquant que le site a reçu jusqu'à 3 millions de tonnes de déchets durant cette période.

En 3 ans, environ 800 000 tonnes de déchets ont été enfouies au Centre d'Enfouissement Technique (Edoh E. 2021)

MATERIEL ET METHODES

L'ancienne décharge publique d'Agoè-Nyivé, située à quinze kilomètres au nord du centre-ville de Lomé (Figure 1), fut la principale décharge de la commune depuis 2001. Son emplacement, au bord de la route nationale N°1, la place à environ 5 km de la limite nord du 5^{ème} arrondissement. Elle est délimitée au nord par la route d'Agoè-Nyivé-Dikamé et le centre d'entraînement « moto-cross », au sud par le Grand Contournement, à l'ouest et à l'est par le quartier Bernard Kopé. Initialement, la zone était une ancienne carrière de sable de 39 ha, qui servait clandestinement de dépotoir au début des années 1990. Quatre profils magnétiques avec des pas d'échantillonnage de 50 m ont permis d'obtenir une carte magnétique du champ total. Le profil de Tomographie de Résistivités Electriques (TRE) est orienté WNW-ESE et traverse la partie nord la plus large de la décharge sur une longueur de 240 m. Le dispositif d'acquisition est le Wenner alfa avec un espace inter électrode de 10 m. La TRE a déjà été utilisée pour cartographier le panache du lixiviat sur une décharge de Hévié au Bénin (Yalo *et al.*, 2014)

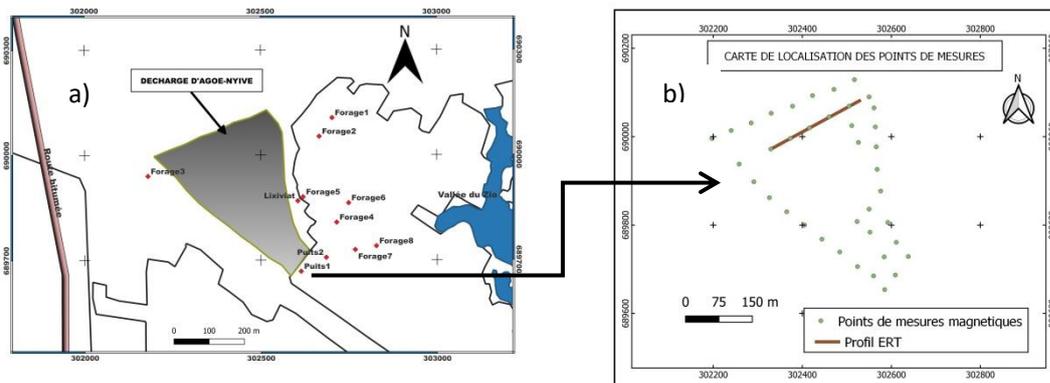


Figure 1 : a) Carte de localisation la décharge d'Agoè-Nyivé b) Localisation des profils magnétiques et de la TRE

RESULTATS ET DISCUSSION

Hétérogénéité magnétique des déchets de la décharge

L'amplitude de l'anomalie magnétique du champ total avoisine les valeurs de 415 nT. Le sud-ouest de la décharge présente des anomalies moins magnétiques que le nord-est. (Figure 2). Cette variation dans la cartographie du champ magnétique témoigne de l'hétérogénéité de la nature et de la compaction des ordures enfouies sur le site. Cette hétérogénéité visible sur la carte de réduction à l'équateur est particulièrement prononcée sur la carte du champ résiduel avec des amplitudes de -0,5 à 0,4nT.

La variation des anomalies magnétiques est aléatoire le long des points de mesures magnétiques.

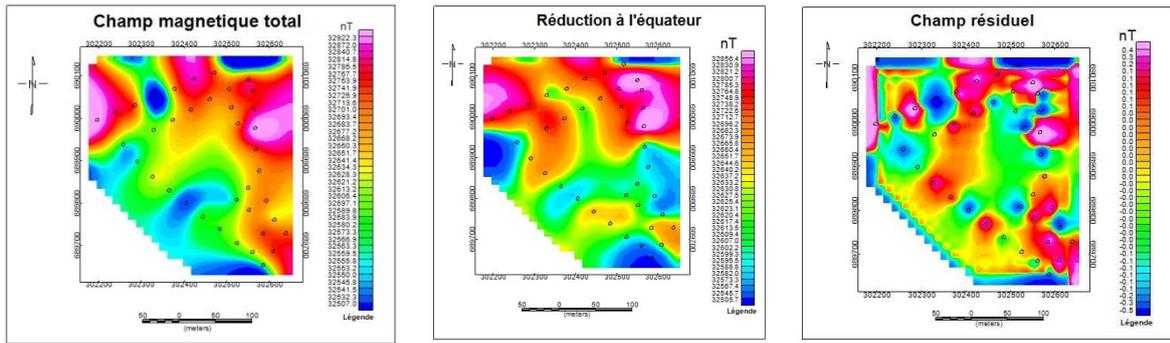


Figure 2 : Cartes magnétiques de la décharge d'Agoe-Nyive

Géométrie du panache du lixiviat en tomographie de résistivités électriques

En utilisant la loi d'Archie, la résistivité calculée de l'aquifère du Continental Terminal non pollué est égal à 340 Ω .m. Sachant que la résistivité moyenne du lixiviat est égale à 2 Ω .m, les couches à faible résistivité (inférieures à 340 Ω .m) sont supposées être polluées par le lixiviat et représentent le panache de lixiviat en profondeur. Les couches avec des résistivités vraies supérieures à 340 Ω .m ne sont pas censées être polluées par le panache de lixiviat. La limite de ce panache marque le contact entre la zone polluée par le panache de lixiviation et la zone non polluée. La section de tomographie électrique montre la variation 2D de la résistivité vraie des couches polluées par le lixiviat en fonction de la profondeur (Figure 3). Trois points d'infiltration du lixiviat ont été détectés depuis la surface. Ces points d'infiltration correspondent à des zones de faibles valeurs du champ total sur la carte magnétique.

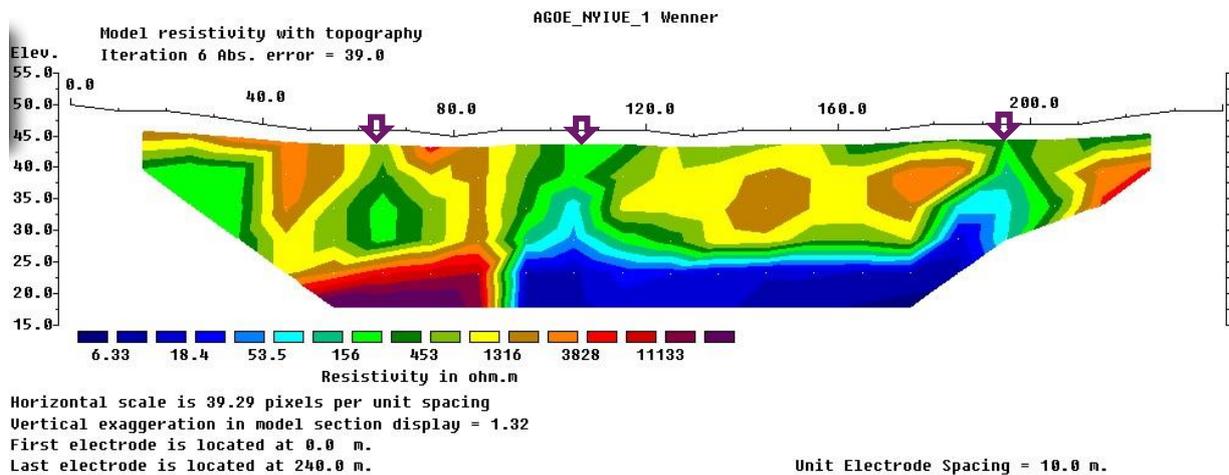


Figure 3 : Section ERT sur la décharge d'Agoe-Nyive

La géométrie du panache de lixiviat présente est marquée par une accumulation à partir 20 m de profondeur susceptible de polluer la nappe phréatique.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La percolation du lixiviat dans les décharges des ordures se fait façon aléatoire. Le lixiviat emprunte les chemins les plus poreux et reste bloqué par des hétérogénéités des ordures compactées comme les sachets plastiques dont la dégradation est plus lente. La résistivité électrique de la nappe

phréatique diminue sensiblement lorsqu'elle rentre en contact avec le lixiviat marquant ainsi sa signature de pollution.

En perspectives, les analyses chimiques et bactériologiques des échantillons de la nappe phréatique pourront confirmer son état de pollution avancée par le lixiviat.

Remerciements

Remerciements pour la société SOTOEMA en charge de la gestion du site de décharge depuis 1990.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **BASSAI M. B., SANONKA T. DIYAKADOLA D. B. MOHAMED M. ET MOHAMED Z. 2018** – Extraction chimique des métaux lourds des argiles de la décharge finale d'Agoè-Nyivé au Togo. Déchets Sciences et Techniques - N°78, pp. 29 – 41. 10.4267/dechets-sciences-techniques.3869.
2. **DABIRE ET GANGO A. 2018** – Retour d'expérience: programme de sélection d'équipements et infrastructures de gestion des déchets adaptés au contexte des villes secondaires d'Afrique de l'Ouest. Environnement, Ingénierie & Développement, N°77, pp.35-42. 10.4267/déchets sciences-techniques.3819, hal-03159477.
3. **ESAIE EDOH 2021** – GAGL : plus de 1,5 milliards dans l'enfouissement des déchets en 3 ans. TogoFirst Newsletter. 1p.
4. **FETTER C. W. 2018** – *Applied Hydrogeology: Fourth Edition*. Waveland Press. ISBN 1478637447; 978148637448. 599 pages
5. **ONIBOKUN A. G. 2001** – *La gestion des déchets urbains : des solutions pour l'Afrique*. IDRC, 2001.J. 1p.
6. **YALO. N. LAWSON F. ET ADIHOUC. 2014** – « Geophysical Contribution for the Mapping the Contaminant Plume of Leachate from Rubbish Dumpsite of Hèvié, Bénin », *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 4, p. 127-143.