



AVIGNON
UNIVERSITÉ

PROPOSITION SUJETS DE THÈSES CONTRATS DOCTORAUX 2021-2024

Appel ciblé (merci de cocher la case correspondante):

- ✓ **Contrat doctoral établissement ED 536**
- Contrat doctoral établissement ED 537**
- Contrat doctoral fléché FR Agorantic**

Équipe de direction

Directeur de thèse : Gaëlle LEFEUVE-MESGOUEZ

Co-encadrant : Slimane ARHAB

Informations générales

Titre en français :

CARACTÉRISATION DE MILIEUX NATURELS À L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE PAR APPROCHES ONDULATOIRES MÉCANIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTIQUE. APPLICATION À L'ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA TENEUR EN EAU SUR LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES D'UN MILIEU HÉTÉROGÈNE

Titre en anglais :

CHARACTERISING NATURAL ENVIRONMENTS ON A MACROSCOPIC SCALE USING MECHANICAL AND ELECTROMAGNETIC WAVE APPROACHES. APPLICATION TO THE STUDY OF THE IMPACT OF WATER CONTENT ON THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF A HETEROGENEOUS MEDIUM

Mots-clés : milieux hétérogènes, caractérisation, problèmes inverses, ondes mécaniques, ondes électromagnétiques, sols rocheux et agricoles, teneur en eau

Discipline de rattachement (principal) : électromagnétisme

Discipline de rattachement (secondaire) : mécanique

Insertion dans un des 2 axes de l'établissement : Agro&Sciences

Cotutelle : Oui - Non **Pays** :

Opportunités de mobilité à l'international du doctorant dans le cadre de sa thèse :

Oui - Non

⇒ Dans le cadre du Projet de collaboration de Recherche International, intitulé "Maxwell - Berger Low-Noise Underground Research Laboratory" auquel participe l'UMR EMMAH, une demande de séjour à l'international est envisagée; **Université de Colombie Britannique, Canada.**

⇒ Suivant les besoins au fur et à mesure des étapes abordées, un séjour au Department School of the Built Environment, **Heriot-Watt University, United Kingdom**, (spécialiste méthode des éléments finis) ou au Department Engineering Acoustics, **Lund University, Sweden** (spécialiste méthode des éléments de frontière) pourra également être envisagé avec ici un soutien des bourses Perdiguier d'AU.

Profil attendu des candidats à auditionner :

Formation théorique et numérique sur les problèmes de propagation d'ondes soit en mécanique soit en électromagnétisme; une expérience sur logiciels éléments finis serait un plus.

Présentation détaillée du sujet

Contexte

La connaissance et la compréhension du fonctionnement hydrique des milieux souterrains constituent un enjeu sociétal majeur, à plusieurs niveaux. Du point de vue économique, il s'agit par exemple de mieux gérer les ressources du sous-sol, ou encore de permettre de mieux anticiper les dégâts issus de catastrophes naturelles (glissement de terrain, séisme). D'un point de vue scientifique, il s'agit d'une part de mieux comprendre les processus physiques mis en jeu de façon à mieux les modéliser théoriquement et numériquement grâce à des modèles dits modèles directs, et d'autre part de construire des modèles et des méthodes permettant de caractériser ces milieux grâce à des modèles dits inverses. Ce projet répond plus spécifiquement au besoin de prolonger et amender les recherches engagées pour la détection de la présence d'eau et la caractérisation de l'écoulement d'eau dans le milieu karstique du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB, Rustrel, Vaucluse, Région PACA, <https://lsbb.eu/>). Notons qu'Avignon Université a signé début 2021, avec ses partenaires, dont le LSBB, un accord de collaboration de recherche international (IRP pour International Research Project), intitulé "Maxwell - Berger Low-Noise Underground Research Laboratory". L'équipe TWICS, impliquée pour partie dans cet IRP, est force de proposition avec ce projet de thèse émergeant sur le volet dédié à l'imagerie du milieu complexe karstique du LSBB.

Objectif

Ce travail a pour objectif de contribuer : i) à **mieux modéliser les phénomènes ondulatoires dans les milieux complexes**, de type naturel avec comme terrains d'applications le milieu karstique du LSBB et des sols agricoles d'INRAE (problème direct); ii) à construire une **methodologie d'identification de paramètres physiques caractéristiques mécaniques et électromagnétiques** d'un milieu hétérogène et leurs potentielles variations dans le milieu (problème inverse); et iii) à investiguer ainsi **l'impact de l'eau sur les signaux**.

Ce projet présente une **dualité physique** en proposant une modélisation d'une part de la propagation d'ondes mécaniques et d'autre part de la propagation d'ondes électromagnétiques dans ces milieux hétérogènes, et un traitement des données sismiques et électromagnétiques s'appuyant sur des méthodes inverses sophistiquées mais analogues dans les deux problèmes physiques traités. Ces traitements doivent mener à une reconstruction de la cartographie 3D des paramètres mécaniques pour l'un et des paramètres électromagnétiques pour l'autre, avec comme idée maîtresse deux apports complémentaires en information sur la quantité d'eau et sur sa répartition spatiale dans le milieu. L'objectif est de quantifier spatialement cette teneur en eau avec une résolution spatiale supérieure aux performances des techniques d'imagerie usuelles. Typiquement, nous visons des résolutions inférieures à la longueur d'onde d'excitation du milieu.

Méthodes à mettre en œuvre

Le travail envisagé est tout d'abord d'ordre fondamental par le développement et l'application de méthodes novatrices et performantes d'inversion et d'identification de paramètres. Les dispositifs d'imagerie en Sismologie Active et en GPR (Ground Penetrating Radar) existant dans le commerce fournissent des données expérimentales riches en information, toutefois les algorithmes de traitement de données qui sont actuellement proposés fonctionnent selon le principe des temps de vol, n'utilisant donc qu'une partie restreinte de l'information. Les conséquences de ce type de traitement sont : une mauvaise résolution et l'apparition d'artefacts tels qu'une présence dans les images d'objets fantômes restreignant à une résolution qualitative du problème inverse. Pour le résoudre quantitativement, il est primordial d'utiliser un modèle

physique capable de décrire rigoureusement l'interaction entre l'onde incidente et le milieu. Nous proposons ici une **méthodologie consistant en l'utilisation de modèles directs numériques fins combinés à une inversion optimisée adaptée prenant en compte l'ensemble des informations contenues dans les signaux mécaniques et électromagnétiques**. L'équipe TWICS possède une expertise sur la caractérisation de milieux homogènes décrits par des paramètres effectifs à partir d'inversion de la forme d'onde complète [1], ainsi que sur les techniques d'optimisation locale capables d'inverser un très grand nombre de paramètres [2], autant de savoir-faire qui seront mis en œuvre pour imaginer le milieu avec une résolution de l'ordre de la demi longueur d'onde d'excitation. Pour la description fine et fiable du milieu, l'équipe a investi récemment dans une station de calcul équipée des modules *Acoustics* et *Wave Optics* du logiciel de modélisation par éléments finis Comsol Multiphysics[®] pour le problème direct et d'un lien spécifique vers Matlab[®] LiveLinkTM for Matlab[®] pour la programmation et la gestion du problème inverse. Une précédente thèse a permis de développer des méthodes semi-analytiques adaptées à la configuration du LSBB [3] qui permettront de valider l'utilisation du code EF dans des cas simplifiés en lien avec les configurations du LSBB, de façon à orienter et focaliser le travail de cette thèse sur l'étape fondamentale "inversion et caractérisation". Le code éléments-finis servira également de brique élémentaire pour construire la méthode inverse itérative avec laquelle les données seront traitées.

Ce travail est également à visée applicative en s'appuyant entre autres sur le terrain du LSBB dont l'environnement s'intègre parfaitement dans cette problématique puisque le site donne accès à une grande diversité d'échelles de mesures en temps et en espace, et peut s'envisager sous plusieurs angles physiques. Une des applications concerne **l'imagerie du milieu fracturé se situant au sein du LSBB**, lequel est à dominante calcaire et un des objectifs peut être de repérer les hétérogénéités de type failles. Pour une première connaissance préalable de l'environnement de la montagne de Rustrel, on s'appuiera ici sur certains travaux antérieurs menés au LSBB, en particulier : les thèses de Laure Dubœuf [4], Pierre Jeanne [5] et Yan Beres [6] donnent des caractéristiques moyennées du milieu, des relevés sur carottes et un positionnement global des grandes failles du site; de plus, grâce au projet MIGA (le lien avec ce projet est explicité section "retombées pour Avignon Université") et au creusement récent de galeries équipées en capteurs régulièrement répartis, récents et donnant des mesures 3D, des informations supplémentaires, obtenues par des campagnes de mesures opérées par ailleurs, pourront être exploitées. Le savoir-faire de l'équipe HYDRO de l'UMR sera précieux sur ce point. La méthodologie développée pourra également s'appliquer à des **milieux hétérogènes de type sols agricoles** caractérisés par des paramètres en lien avec l'état hydrique et la densité racinaire qui intéresse plus particulièrement l'INRAE, en particulier l'équipe SWIFT de l'UMR EMMAH, ceci par un changement de fréquence et de longueur d'onde du signal permettant ainsi d'ausculter de plus petites distances.

Pour résumer, trois points essentiels seront spécifiquement étudiés et développés, à visée d'applications sur terrains naturels LSBB et INRAE : la **dualité de deux phénomènes physiques**, la **description précise du milieu grâce à l'association d'une résolution directe fine** par éléments finis et d'une **méthode d'inversion novatrice et efficace** spécifiquement développée au laboratoire, et le **lien heuristique des paramètres physiques avec la teneur en eau dans le milieu**.

Verrous scientifiques et résultats attendus :

En résumé, les **principales avancées attendues** peuvent se décliner de la manière suivante :

- i) grâce à la mise en place d'algorithmes d'inversion innovants, nous visons une description quantitative d'un milieu hétérogène *via* ses paramètres mécaniques et électromagnétiques, avec une résolution

supérieure aux performances des systèmes d'imagerie existants;

- ii) la mise en place d'une nouvelle méthodologie d'identification de paramètres jouant sur la dualité et la complémentarité des ondes mécaniques et électromagnétiques, rendra le processus d'inversion plus efficient;
- iii) la méthodologie mise en œuvre est en capacité d'explorer des questions ouvertes dans la communauté des problèmes inverses appliqués à l'imagerie, à savoir: quel est l'apport en résolution de la diffusion multiple de l'onde entre les différentes hétérogénéités du milieu dans l'obtention de la super résolution (le signal est alors plus riche en information) ? ou encore: comment choisit-on de manière optimale le nombre et le positionnement des émetteurs-récepteurs pour maximiser cette résolution ?
- iv) d'un point de vue applicatif sur les milieux naturels, ces travaux contribueront à la recherche sur les relations entre teneur en eau et paramètres constitutifs pour un milieu dont les hétérogénéités sont finement reconstruites, et à l'étude de l'impact sur la connaissance de la structure et de la nature du sous-sol du site du LSBB, ainsi que de l'état hydrique et de la densité racinaire des sols agricoles comme étudiés à INRAE.

Retombées pour Avignon Université :

Ce sujet de thèse contribuera au rayonnement scientifique d'Avignon Université par l'implication active de l'UMR EMMAH dans l'IRP "Maxwell - Berger Low-Noise Underground Research Laboratory" en émergeant sur son volet dédié à l'imagerie du milieu complexe du LSBB. Ce dernier qui associe les compétences du LEAT à Sophia-Antipolis, d'Avignon Université, de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour et de l'Université de Colombie Britannique à Vancouver, vise comme objectif la réalisation, la mise en œuvre et le traitement de données d'un nouveau système d'imagerie micro-onde subsurface automatisé ultra large bande et à très forte dynamique, avec comme contexte applicatif la caractérisation de l'environnement entourant les nouvelles galeries récemment creusées au LSBB pour accueillir l'instrumentation du projet MIGA (Matter wave - laser based Interferometer Gravitation Antenna), un projet à l'échelle européenne de développement d'un nouvel outil de détection des ondes gravitationnelles nécessitant une meilleure caractérisation de cet environnement. Par ailleurs, ce projet profitera à l'UMR EMMAH par la consolidation des liens inter-équipes HYDRO-SWIFT-TWICS.

References

- [1] Lefeuvre-Mesgouez G., Mesgouez A., Ogam E., Scotti T. and Wirgin A., Retrieval of the physical properties of an anelastic solid half space from seismic data, *J.Appl.Geophys.*,88, 70-82 (2013).
- [2] S. Arhab, G. Soriano, Y. Ruan, G. Maire, A. Talneau, D. Sentenac, P. C. Chaumet, K. Belkebir, and H. Giovannini, Nanometric Resolution with Far-Field Optical Profilometry, *Phys. Rev. Lett.* 111(5), 053902 (2013).
- [3] H. Bouaré, A. Mesgouez and G. Lefeuvre-Mesgouez, Contribution to the modeling and the mechanical characterization of the subsoil in the LSBB environment, *E3S Web of Conferences*,88,06001(2019), EDP Sciences.
- [4] L. Dubœuf, Injections de fluide dans une zone de faille (LSBB, Rustrel) : sismicité induite et déformation aismique. Mémoire de Thèse. Sciences de la Terre. Université Côte d'Azur, 2018. NNT: 2018AZUR4002.
- [5] P. Jeanne, Architectural, petrophysical and hydromechanical properties of fault zones in fractured-porous rocks : compared studies of a moderate and a mature fault zones (France). Mémoire de Thèse. Aix-Marseille Université, 2013.
- [6] Beres Jan, Caractérisation de l'anisotropie d'une plate-forme carbonatée karstifiée : approche méthodologique conjointe sismique et électrique. Mémoire de Thèse. Université Paris-Sud, 2013.