



## Offre de thèse : Méthodes numériques et simulation haute performance pour l'imagerie 3D en milieu complexe

**Contexte** Cette thèse s'inscrit dans l'action exploratoire *OptiGPR3D* menée par les équipes *IDEFIX* et *POEMS* d'Inria Saclay, dont l'objectif est d'introduire des outils de simulation versatiles et robustes qui peuvent s'adapter à des matériaux complexes tout en restant efficaces, dans la perspective de rendre l'imagerie électromagnétique 3D réalisable et certifiable par des méthodes d'inversion interprétables et optimisées. Avec un a priori associé à une méthode d'imagerie classique, pourrait-on concevoir un réseau d'émetteurs à même de fournir un éclairage optimal d'une structure cible et un réseau de capteurs permettant d'obtenir une image 3D optimale? Cette question est motivée par le besoin de dépasser les capacités actuelles d'examen non destructif des structures enfouies dans les ouvrages d'art maintenus par EDF.

**Description** Dans le cadre de l'allongement de la durée de vie des moyens de production d'EDF, les travaux de maintenance reposent sur l'*Examen Non Destructif* (END) des structures. Dans le domaine du génie civil par exemple, les besoins d'imagerie des structures sont nombreux, d'une part dans la préparation des activités de maintenance et d'autre part dans les dossiers d'études de danger remis aux autorités de sûreté. Les moyens les plus recherchés actuellement sont ceux permettant d'obtenir une image la plus précise possible du cœur des constructions. Nous pouvons citer comme applications la localisation en 3D des aciers de renforcement, des défauts de bétonnage, des pathologies du béton ou la recherche des conduits. Les meilleures techniques actuellement disponibles reposent sur la propagation d'ondes électromagnétiques comme les radars GPR (Ground Penetrating Radars). La principale difficulté provient des épaisseurs à inspecter, des hétérogénéités des matériaux et des résolutions nécessaires.

Ces différents aspects rendent les méthodes d'*imagerie 3D* très coûteuses en temps et ressources de calcul. Un exemple récent d'imagerie 3D pour l'END des tubes des générateurs de vapeur [1] donne un temps de calcul de 5 heures, avec 900 processeurs, pour une analyse monofréquence à basse résolution. Ce coût n'est pas envisageable pour des analyses multifréquences, ainsi que pour l'optimisation des conditions d'acquisition (position, forme et nombre des capteurs), qui impliquent de résoudre de nombreuses fois des problèmes d'imagerie 3D, qui eux-mêmes se reposent sur de *nombreuses simulations efficaces du modèle physique*, appelé problème direct. Deux classes de méthodes sont généralement utilisées pour la simulation numérique du modèle physique : la méthode des éléments finis (FEM = Finite Element Method), qui est versatile et adaptée aux matériaux hétérogènes, et la méthode des éléments de frontière (BEM = Boundary Element Method), qui est la plus performante sur les matériaux homogènes par morceaux et les domaines non bornés. Afin de traiter de façon optimale les différentes natures de matériaux, nous proposons de coupler ces deux méthodes de façon systématique. Pour ce faire nous souhaitons explorer comment associer les méthodes FEM et BEM dans des configurations complexes avec une approche de décomposition de domaine et le formalisme multitrace [2], tout en développant une analyse théorique et une mise en place numérique adaptée aux calculateurs parallèles.

L'idée est d'isoler les sous-domaines homogènes (tels que des couches homogènes dans le sol) pour y appliquer la méthode BEM et de traiter les sous-domaines hétérogènes (tels que le béton) par la méthode FEM, puis de concevoir et analyser des stratégies de *couplage FEM-BEM multidomaine*. L'analyse de ce couplage multidomaine devient problématique dans le cas où les interfaces entre les sous-domaines se croisent et forment des *points de jonction* (voir les cercles jaunes dans la Figure 1). Il est donc nécessaire de traiter ce cas pour développer un outil suffisamment versatile qui peut s'adapter aux différentes configurations physiques, et qui soit efficace pour des problèmes 3D.

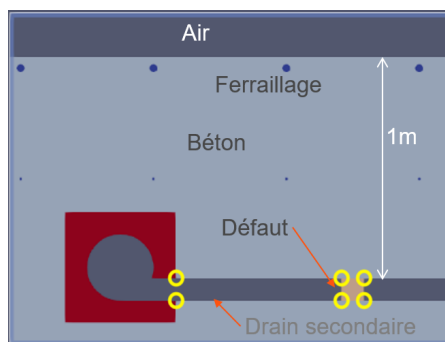


FIGURE 1 – Drains de barrage hydraulique, exemple de configuration comportant des points de jonctions (en jaune).

L’objectif de la thèse sera d’explorer de nouvelles approches de *couplage multitrace FEM-BEM*, en utilisant les différentes variantes du formalisme multitrace, qui peuvent permettre de traiter la problématique des points de jonction, mais auxquelles il faut ajouter l’aspect du couplage FEM-BEM. Par ailleurs, de nombreux choix sur l’*information communiquée entre sous-domaines* peuvent être faits, et ils ont un impact direct sur les formulations FEM et BEM locales aux sous-domaines. Outre les implications théoriques des différents choix possibles de formulation, il est aussi essentiel de proposer des méthodes parallèles de résolution efficace dans le contexte du *calcul haute performance*. Il faudra alors investiguer la construction de préconditionneurs robustes ainsi que les méthodes de recyclage et de résolution par blocs, adaptées à la résolution des problèmes d’imagerie et à leur optimisation, qui fait intervenir des systèmes linéaires avec de nombreux seconds membres.

**Profil recherché** Diplôme de Master ou d’école d’ingénieurs, avec des compétences en analyse numérique (EDP, méthodes des éléments finis, algèbre linéaire ...) et en programmation (ex. C/C++, Python, ...).

**Localisation** Unité de Mathématiques Appliquées (UMA), ENSTA Paris, 828, Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau, France.

**Durée** 3 ans, à partir de septembre 2023.

**Salaire** Aligné sur le barème Inria standard.

**Encadrant·e·s**

- Marcella Bonazzoli (équipe Inria IDEFIX, UMA, ENSTA Paris, [marcella.bonazzoli@inria.fr](mailto:marcella.bonazzoli@inria.fr))
- Xavier Claeys (LJLL, Sorbonne Université, [xavier.claeys@sorbonne-universite.fr](mailto:xavier.claeys@sorbonne-universite.fr))
- Pierre Marchand (équipe Inria POEMS, UMA, ENSTA Paris, [pierre.marchand@inria.fr](mailto:pierre.marchand@inria.fr))

**Collaborateurs** Lorenzo Audibert (EDF R&D, équipe IDEFIX), Housseem Haddar (Inria, équipe IDEFIX) et Frédéric Taillade (EDF R&D, équipe IDEFIX).

**Pour candidater** Envoyer un mail aux trois encadrant·e·s avec un curriculum vitae, les relevés de notes de Licence et Master (ou équivalents), des lettres de recommandation éventuelles et des rapports des projets/stages éventuels effectués au cours de la scolarité. *Un sujet de stage de Master précédant cette offre de thèse est disponible.*

## Références

[1] Lorenzo Audibert, Hugo Girardon, Housseem Haddar, and Pierre Jolivet. Inversion of Eddy-Current Signals Using a Level-Set Method and Block Krylov Solvers. Preprint, 2021. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03043491>.

[2] Xavier Claeys and Emile Parolin. Robust treatment of cross-points in optimized Schwarz methods. *Numerische Mathematik*, 2022. URL : <https://arxiv.org/pdf/2003.06657.pdf>, doi:10.1007/s00211-022-01288-x.



## PhD offer: Numerical methods and high performance simulation for 3D imaging in complex media

**Context** This PhD is part of the [OptiGPR3D](#) exploratory action led by [IDEFIX](#) and [POEMS](#) teams at Inria Saclay, whose objective is to introduce versatile and robust simulation tools that can adapt to complex materials while remaining efficient, in the perspective of making 3D electromagnetic imaging feasible and certifiable through interpretable and optimized inversion methods. With an a priori provided by a classical imaging method, could we design a network of emitters that can provide an optimal illumination of a target structure and a network of receivers that makes it possible to obtain an optimal 3D image? This question is motivated by the need to go beyond the current capabilities of non-destructive testing for buried infrastructures maintained by EDF.

**Description** In the context of extending the life cycle of EDF facilities, maintenance works rely on *Non-Destructive Testing* (NDT) of infrastructures. In the field of civil engineering, for example, imaging of infrastructures is often needed, both in the preparation of maintenance activities and in hazard studies submitted to safety authorities. The most sought after tools at the moment are those providing the most precise possible image of the core of the structures. As applications, we can mention the 3D localization of reinforcement steels, concrete defects, concrete pathologies, or the search for water pipes. The best techniques currently available, such as GPR (Ground Penetrating Radars), are based on the propagation of electromagnetic waves. The main difficulty comes from the thicknesses to be inspected, the heterogeneities of the materials, and the necessary resolution.

These different aspects make *3D imaging* methods very expensive in terms of time and computational resources. A recent example of 3D imaging for NDT of steam generator tubes [1] required a computation time of 5 hours, with 900 processors, for a single frequency analysis at low resolution. This cost is not acceptable for multi-frequency analyses, as well as for optimizing the acquisition conditions (position, shape and number of sensors), which requires solving several times 3D imaging problems, which themselves rely on *many efficient simulations of the physical model*, called direct problem. Two classes of methods are generally used for the numerical simulation of the physical model: the Finite Element Method (FEM), which is versatile and adapted to heterogeneous materials, and the Boundary Element Method (BEM), which is the most efficient for piecewise homogeneous materials and unbounded domains. In order to optimize the treatment of different types of materials, we propose to systematically couple these two methods. To do so, we wish to explore how to combine FEM and BEM methods in complex multidomain configurations with a domain decomposition approach and the multitrace formalism [2], while allowing both a theoretical analysis and a numerical implementation adapted to parallel computers.

The idea is to isolate homogeneous subdomains (such as homogeneous layers in soil), where BEM method can be applied, and to treat heterogeneous subdomains (such as concrete) by FEM method, with the aim of designing and analyzing strategies for *multidomain FEM-BEM coupling*. The analysis of this multidomain coupling becomes problematic in the case where the interfaces between the subdomains intersect and form *junction points* (see the yellow circles in Figure 1). It is therefore necessary to deal with this case in order to develop a sufficiently versatile tool that can adapt to different physical configurations, and that is efficient for 3D problems.

The objective of the PhD will be to explore new approaches of *multitrace FEM-BEM coupling*, using the different variants of the multitrace formalism, which can address the junction points problem, but to which the FEM-BEM coupling aspect has to be added. Moreover, many choices on the type of *information communicated between subdomains* can be made, and these have a

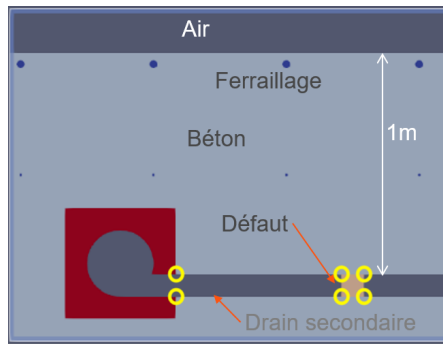


Figure 1: Hydroelectric dam drains, example of a configuration with junction points (in yellow).

direct impact on the local FEM and BEM formulations in the subdomains. In addition to the theoretical implications of the different formulation choices, it is also essential to design parallel methods for efficient resolution in the context of *high performance computing*. It will then be necessary to investigate the construction of robust preconditioners, as well as recycling techniques and block methods, adapted to the solution and optimization of imaging problems, which involve linear systems with several right-hand sides.

**Requirements** 2nd year Master student or 3rd year Engineering School student, with skills in numerical analysis (PDE, finite element method, linear algebra ...) and programming (e.g. C/C++, Python, ...).

**Location** Unité de Mathématiques Appliquées (UMA), ENSTA Paris, 828, Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau, France.

**Duration** 3 years, starting after September 2023.

**Salary** Paid according to Inria scale for PhD students.

#### Supervisors

- Marcella Bonazzoli (IDEFIX Inria team, UMA, ENSTA Paris, [marcella.bonazzoli@inria.fr](mailto:marcella.bonazzoli@inria.fr))
- Xavier Claeys (LJLL, Sorbonne Université, [xavier.claeys@sorbonne-universite.fr](mailto:xavier.claeys@sorbonne-universite.fr))
- Pierre Marchand (POEMS Inria team, UMA, ENSTA Paris, [pierre.marchand@inria.fr](mailto:pierre.marchand@inria.fr))

**Collaborators** Lorenzo Audibert (EDF R&D, IDEFIX team), Housseem Haddar (Inria, IDEFIX team) and Frédéric Taillade (EDF R&D, IDEFIX team).

**To apply** Email the three supervisors with a curriculum vitae, transcripts of Bachelor and Master (or equivalent) grades, recommendation letters (optional), and reports on any projects or internships carried out during Bachelor or Master. *A Master internship subject preceding this PhD offer is available.*

## References

- [1] Lorenzo Audibert, Hugo Girardon, Housseem Haddar, and Pierre Jolivet. Inversion of Eddy-Current Signals Using a Level-Set Method and Block Krylov Solvers. Preprint, 2021. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03043491>.
- [2] Xavier Claeys and Emile Parolin. Robust treatment of cross-points in optimized Schwarz methods. *Numerische Mathematik*, 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2003.06657.pdf>, doi:10.1007/s00211-022-01288-x.