

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé :** Optimisation des flux numériques dans une approche de décomposition de domaine de type Trefftz pour l'électromagnétisme : approche traditionnelle ou intelligence artificielle ?

Référence : **SNA-DTIS-2022-29**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse :** 01/10/2022

**Date limite de candidature :**

### Mots clés

Electromagnétisme, équations de Maxwell, méthode de Trefftz, solveur itératif, Intelligence artificielle

### Profil et compétences recherchées

Université ou école d'ingénieur

Mathématique appliquées, EDP, analyse numérique et fortran ou C

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Ces dernières années, l'ONERA et l'INRIA ont décidé d'unir leur effort afin de développer des moyens de simulation capable de prédire la propagation des ondes électromagnétiques en régime harmonique dans un environnement complexe et de grande taille. En effet, les fréquences des signaux électromagnétiques actuels peuvent atteindre plusieurs Gigahertz, de sorte que le domaine de calcul devient de plus en plus grand en termes de longueur d'onde (plusieurs centaines). Le caractère oscillatoire du champ électromagnétique et l'augmentation de la pollution numérique en fonction de la fréquence nécessitent alors d'utiliser un nombre prohibitif de points de discrétisation afin de contrebalancer ces effets. Cela conduit à des systèmes linéaires à grande échelle dont la résolution est un défi pour les ressources de calcul actuellement disponibles, même dans un contexte HPC. A titre d'exemple, une méthode traditionnelle directe (solveur LU multi-frontale pour les matrices creuses) basée sur une approche d'éléments finis d'ordre élevé (ordre 4) exige 100To de mémoire et consomme environ une puissance électrique de 1MW pour traiter un domaine d'environ 80 longueurs d'onde (dans chaque direction). Nous faisons le constat que toutes les optimisations apportées ne permettent pas d'éviter à terme ce goulot d'étranglement et que de nouvelles méthodes de simulation à faible coût de mémoire basées sur la décomposition de domaine sont alors nécessaires.

Dans le cadre du projet IterMaxwell (E2S-UPPA/ONERA) et de la thèse de Margot Sirdey [1,2], nous développons le nouveau solveur GoTEM3 basé sur une **approche de Trefftz**. Cette dernière consiste à utiliser des fonctions de base solutions ou quasi-solutions locales des **équations de Maxwell**. Ce choix permet de maîtriser les phénomènes de pollution numérique, de restreindre le nombre de degrés de liberté et de construire une formulation variationnelle se concentrant uniquement sur le squelette du maillage. De plus, contrairement aux discrétisations classiques en électromagnétisme, cette méthode est intrinsèquement adaptée à une résolution itérative : propriétés de contraction et préconditionneurs naturels. Nous avons alors couplé la méthode de Trefftz avec un solveur algébrique de type Krylov (GMRES) et ainsi réduit drastiquement le coût (en mémoire par un facteur 1000, en temps de calcul et financier car il permet d'éviter d'utiliser un super ordinateur) de résolution de la propagation dans des domaines de grande taille : une scène de 100 longueurs d'onde est simulée à présent avec seulement 43 Gb de mémoire. Nous ambitionnons par l'utilisation de ce type d'approche de réaliser ce type de résolution à partir d'un ordinateur portable.

En vue d'atteindre cet objectif, nous proposons en collaboration avec l'équipe Makutu de l'INRIA ce nouveau projet doctoral qui sera articulé autour des axes de recherche suivant :

1/ **Solveur local rapide** : dans une méthode (quasi-)Trefftz, la construction des fonctions de base nécessite de résoudre sur chaque cellule les équations de Maxwell pour un certain nombre de second membres. Pour cela, différents solveurs peuvent être utilisés : différences finies, éléments finis, Galerkin discontinu ...etc. Dans cette thèse, nous proposons d'étudier l'approche **différences spectrales** qui rencontre un grand succès par exemple en mécanique des fluides numérique (CFD). Elle consiste à chercher la solution des équations fortes sous forme de polynômes maille par maille et à résoudre un problème de Riemann pour gérer les flux d'interfaces, rendant l'approche conservative et peu coûteuse. Il s'agira ici de réaliser la dérivation ainsi que l'analyse théorique et numérique de ce type de méthode pour les équations de Maxwell en régime harmonique.

2/ **Optimisation du transfert d'informations** : la méthode de Trefftz est un décomposeur de domaine naturel qui s'appuie pour le transfert d'informations entre les domaines sur une approximation des opérateurs de transmission/réflexion. Ces dernières ont un impact sur le nombre d'itérations nécessaires au solveur itératif pour converger à une précision donnée. Nous envisageons d'étudier deux pistes pour améliorer la qualité de cette approximation : 1/ une approche classique consistant à utiliser des approximations d'opérateurs non-locaux de transfert basés sur des formulations intégrales 2/ Il semble toutefois possible en permettant à cet opérateur d'évoluer au cours des itérations d'avoir recours à des algorithmes d'**intelligence artificielle** afin d'obtenir des opérateurs locaux optimaux.

3/ **Intégration dans le solveur GoTEM3** : il s'agira de mettre en musique les ingrédients développés dans les parties 1 et 2 en proposant une implémentation robuste et optimisée ainsi que de réaliser une évaluation fine des performances de la méthode pour des scènes de calcul complexes (grand tailles et hétérogènes).

[1] Margot Sirdey, *Méthode de type Trefftz pour la simulation de la propagation électromagnétique à haute fréquence*, thèse, 2019-2022.

[2] H.S. Fure, S. Pernet, M. Sirdey, S. Tordeux, *A discontinuous Galerkin Trefftz type method for solving the two dimensional Maxwell equations*. SN Partial Differ. Equ. Appl., 2020.

#### Collaborations envisagées

DEMR, INRIA

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'Information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

**Contact** : Sébastien Pernet & Xavier Ferrières

Tél. : 0562252634 Email : [sebastien.pernet@onera.fr](mailto:sebastien.pernet@onera.fr)

#### Directeur de thèse

Nom : Sébastien Tordeux

Laboratoire : UPPA/INRIA

Tél. : 0660136540

Email : [sebastien.tordeux@univ-pau.fr](mailto:sebastien.tordeux@univ-pau.fr)

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>