RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

www.onera.fr

PROPOSITION DE STAGE EN COURS D'ETUDES

Référence : **DTIS-2026-50**
(à rappeler dans toute correspondance)

Lieu : Toulouse

Département/Dir./Serv. : DTIS/MACI

Tél. : 05/62/25/26/34
05/62/25/25/06

Email. : Sebastien.Pernet@onera.fr
Nadir-Alexandre.Messai@onera.fr

Responsable(s) du stage : Sébastien Pernet et Nadir-Alexandre Messaï

DESCRIPTION DU STAGE

Thématique(s) : Mathématiques appliquées et leurs interactions, calcul scientifique

Type de stage : ☒ Fin d'études bac+5 ☒ Master 2 ☐ Bac+2 à bac+4 ☐ Autres

Intitulé : PINNs pour la simulation des équations de Maxwell

Sujet : Les phénomènes électromagnétiques sont aux cœurs d'un large éventail de technologies. Leur simulation est dès lors un enjeu crucial dans un grand nombre de domaines industriels et scientifiques : conception d'antennes, radars, imagerie médicale, contrôle non destructif etc. Le DEMR porte cette thématique de recherche depuis plusieurs décennies. Actuellement il existe plusieurs discrétisations permettant de résoudre les équations de Maxwell en milieu complexe et dans de grandes scènes électromagnétiques (différences finies, volumes finis, éléments finis, Galerkin discontinu, etc.). Ces méthodes se révèlent très efficaces mais ne sont pas exemptes de défauts. Elles sont en particulier complexes à implémenter et à maintenir. Elles demandent de plus un travail conséquent pour incorporer de nouveaux modèles physiques tout en garantissant la stabilité numérique. Depuis 2020, de nouvelles méthodes d'apprentissage automatiques sont apparues pour résoudre un certain nombre d'équations aux dérivées partielles : les PINNs (pour physical informed neural network). Ces nouvelles méthodologies apparaissent prometteuses mais n'ont pour l'instant été que peu explorées pour la résolution des équations de Maxwell. L'objectif de ce stage est donc d'évaluer l'intérêt des PINNs pour résoudre les équations de Maxwell dans le domaine temporel.

Dans le contexte des PINNs, l'apprentissage s'effectue en minimisant une erreur basée sur le résidu de l'EDP, où les dérivées spatiales et temporelles sont évaluées à chaque itération via l'algorithme de rétro-propagation du gradient et de la différentiation automatique. Cette approche – communément rencontrée dans la littérature – présente deux défauts majeurs pour les équations de Maxwell. En effet le problème d'optimisation sous-jacent s'avère fortement non convexe et difficile à résoudre, en particulier pour des problèmes en trois dimensions. En pratique, il est délicat de trouver un minimum local menant à l'obtention d'une solution physique convenable. Deuxièmement, cette approche n'utilise pas les propriétés mathématiques des équations de Maxwell. Un article récemment paru propose d'utiliser une UWVF (pour utra weak variational formulation) pour effectuer l'apprentissage. Cette formulation variationnelle particulière permet d'exprimer le problème d'optimisation sans aucune dérivée en faisant intervenir les traces des champs électromagnétiques sur le bord du domaine. Cela induit un temps de calcul de l'erreur d'apprentissage réduite et une meilleure stabilité de l'apprentissage. La référence [1] portant sur des problèmes d'acoustique, l'objectif de ce stage est d'adapter cette méthode à des problèmes d'électromagnétisme et d'évaluer ses performances pratiques.

Le stage se déroulera en plusieurs étapes progressives :

1 - Dans un premier temps, un travail bibliographique sera entrepris pour prendre en mains la référence [1]. Il s'agira d'appréhender la formation UWVF pour les équations de Maxwell ainsi que la construction de l'architecture PINN associée.

2 - Un travail d'implémentation informatique sera ensuite conduit pour évaluer les performances de cette architecture sur des problèmes académiques en une dimension d'espace.

3 - Nous étendrons ensuite la formulation à d'autres problèmes 2D puis évaluerons les performances et limitations de l'architecture PINNs sur des problèmes physiques de complexité croissante.

Pourquoi nous rejoindre ?

Ce stage se déroulera au sein de l'ONERA, centre public de recherche appliquée en aéronautique, spatial et défense, qui agit comme interface entre l'État (notamment la DGA), l'industrie (Dassault, Thales, Airbus...) et la recherche académique. La ou le stagiaire aura l'occasion de monter en compétences en

- Analyse numérique.
- Électromagnétisme.
- Réseaux de neurones.
- Informatique scientifique.

Qui sont des compétences transférables à bien d'autres domaines de simulation.

[1] Hélène Barucq, Henri Calandra, Thibaut Maron. UW-PINN: Ultra-Weak PINNs for the acoustic wave system. 2023

Est-il possible d'envisager un travail en binôme ? Non

Méthodes à mettre en oeuvre :

☒ Recherche théorique ☒ Travail de synthèse

☒ Recherche appliquée ☐ Travail de documentation

☐ Recherche expérimentale ☐ Participation à une réalisation

Possibilité de prolongation en thèse : Non

Durée du stage : Minimum : 5 mois Maximum : 6 mois

Période souhaitée : mars-août

PROFIL DU STAGIAIRE

Connaissances et niveau requis :	Ecoles ou établissements souhaités :
Mathématiques Appliquées, Simulation Numérique, EDP	Master 2 Université ou école d'ingénieur