

Réseaux neuronaux informés par la physique en imagerie par tomographie d'impédance électrique

Lieux d'exercice :

- CEA, site de Cadarache
- Université de Technologie de Troyes

Contacts :

- Encadrant CEA : michel.frederic@cea.fr
- Directeur de thèse : alexandre.baussard@utt.fr

Contexte :

Dans le cadre de l'utilisation durable de l'énergie nucléaire pour un mix énergétique décarboné en association avec les énergies renouvelables, les réacteurs de IV^e génération à neutrons rapides sont cruciaux pour la fermeture du cycle du combustible et la maîtrise de la ressource en uranium. La maîtrise de la sûreté d'un tel réacteur à caloporteur sodium repose notamment sur la détection précoce de vides gazeux dans les circuits. Dans ces milieux opaques et métalliques, les méthodes d'imagerie optiques sont inopérantes, d'où la nécessité de développer des techniques innovantes.

Cette thèse s'inscrit dans le développement de la tomographie d'impédance électrique (EIT) appliquée aux métaux liquides, une approche non intrusive permettant d'imager la distribution de conductivité dans un écoulement.

Les réseaux neuronaux informés par la physique (PINN, pour Physics-informed neural network) sont récemment apparus comme une technique d'apprentissage automatique prometteuse pour résoudre les équations différentielles partielles (EDP) en intégrant directement les lois physiques dans la fonction de perte. Ils ont déjà démontré leur potentiel dans la résolution de problèmes directs et inverses pour de nombreuses applications. Il est possible de définir une fonction de perte intégrant uniquement les équations physiques mais aussi d'intégrer, en plus de la physique, des données (simulées, expérimentales ou réelles), sans donc faire de l'apprentissage purement guidé par les données (dit data-driven) comme avec des réseaux de neurones convolutionnels classiques.

Si les PINN ont déjà été utilisés en inversion, il existe cependant très peu de publications qui traitent de la résolution du problème inverse en tomographie d'impédance électrique. Ces dernières sont de plus très récentes et se limitent généralement à des géométries de reconstruction relativement simples et elles peuvent reposer sur des hypothèses assez restrictives pour des scénarios réels.

Ainsi différentes contributions pourront émerger de ce travail à la fois méthodologique sur les PINN mais aussi applicatives par l'exploitation de données expérimentales.

Sujet de thèse :

L'objectif de cette thèse est de développer un système complet de tomographie d'impédance électrique pour la détection et la cartographie en temps réel des écoulements diphasiques métal liquide/argon en vue de l'appliquer à des écoulements de circuits de Génération IV.

Des approches d'intelligence artificielle, notamment les réseaux neuronaux informés par la physique, seront explorées pour combiner apprentissage numérique et contraintes physiques. Elles seront comparées à l'utilisation de simulations numériques. L'objectif est d'établir des modèles physiques adaptés au contexte et de concevoir des méthodes d'inversion robustes vis-à-vis des bruits de mesure.

Le sujet s'articulera autour de quatre axes :

1. Lois physiques et modélisation (électromagnétique) des signaux de tomographie dans le sodium.
2. La reconstruction d'image à partir des mesures de conductivité, en 2D et en 3D spatial, avec tensions sinusoïdales. On se tournera pour cela vers des méthodes de Machine-Learning.
3. Développement expérimental : mesures avec du galinstan (de conductivité proche de celle du sodium liquide).
4. Amélioration de la reconstruction tomographique en présence de bruit de défauts des capteurs et de perturbations de fond.

Objectifs détaillés :

- Étude phénoménologique : modéliser la réponse électrique du métal liquide en milieu diphasique (simulation COMSOL/Openfoam).
- Création d'une base de données à partir de mesures expérimentales (en utilisant le dispositif avec du galinstan déjà existant) et de simulations pour démontrer le bon fonctionnement et/ou servir de base d'apprentissage pour du Machine Learning. Afin de limiter la différence entre les données simulées et expérimentales (présence de bruit, système d'acquisition...), qui peut impacter négativement l'étape d'apprentissage (si utilisation des données), des méthodes de transfert de domaine pourront être utilisées. Une étude de l'échantillonnage de l'espace d'apprentissage exploitant données expérimentales et simulations pourra aussi être menée.
- Formulation mathématique du problème permettant de mettre en œuvre les réseaux de neurones informés par la physique pour résoudre le problème direct et inverse.
- Obtention d'une solution numérique du problème direct par Physics-Informed Neural Networks (PINN) et comparaison avec les simulations numériques par éléments finis (simulation COMSOL/Openfoam) et les données expérimentales.
- Application des PINN pour inverser le problème et obtenir le champ des conductivités.

Profil recherché :

Etudiant(e) de niveau master ou ingénieur ayant suivi une formation en mathématique appliquée, en apprentissage machine (deep learning) ou en physique (électromagnétisme). Il est nécessaire de maîtriser Python et de connaître si possible PyTorch.

Le travail attendu nécessite rigueur, autonomie et un intérêt pour les sujets à la frontière de plusieurs disciplines.