

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Couplage Et Modélisation Electromagnétique Sur Les Câblages Electrique Par l'Intelligence Artificielle.

Référence : **PHY-DEMR-2025-2**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/09/2025

Date limite de candidature : 01/08/2025

Mots clés

Compatibilité électromagnétique, paramètres électriques primaires, lignes de transmission, défauts de câblages, Intelligence Artificielle.

Profil et compétences recherchées

Nous recherchons un(e) candidat(e) possédant une solide formation en Data Science (Bac+5) avec une expertise en informatique scientifique. Une connaissance préalable du domaine électrique serait un atout majeur. Les diplômé(e)s d'écoles d'ingénieurs ou d'universités sont les bienvenu(e)s.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

L'électrification des avions ouvre la voie à de nouveaux défis, notamment en matière de couplage électromagnétique dans les architectures électriques embarquées. Les études menées par l'ONERA montrent que l'intégration de ces nouvelles architectures nécessite une attention particulière aux règles d'installation et de maintenance, pour lesquelles les approches de modélisation des interactions électromagnétiques peuvent offrir un soutien précieux.

Dans ce contexte, la Compatibilité Électromagnétique (CEM) se présente comme le domaine clé pour étudier les risques d'interférences électromagnétiques sur les systèmes électriques. Les câbles y jouent un rôle central et leur maîtrise est essentielle. En particulier, les défauts de câblage et leurs origines peuvent avoir un impact majeur sur les performances des systèmes, soulignant l'importance d'une compréhension approfondie de ces aspects

À ce titre, les modèles de réseaux de lignes de transmission multiconducteurs (Multiconductor-Transmission-Line-Networks, MTLN) sont devenus des outils incontournables dans le domaine de la CEM, en particulier pour la modélisation d'architectures complexes de faisceaux de câbles électriques pour l'aéronautique. Le département Electromagnétisme et Radar (DEMR) de l'ONERA développe depuis de nombreuses années un logiciel de simulation numérique de référence, appelé CRIPTÉ, basé sur le formalisme de Topologie Électromagnétique et couplé à la théorie MTLN. Ce logiciel permet de créer un modèle de réseau de câbles électriques dans lequel les torons de câbles sont modélisés par des lignes de transmission multiconducteurs caractérisées par des matrices de paramètres électriques primaires dits « RLGC » (Résistance, Inductance, Conductance, Capacité), déduites de la géométrie des conducteurs à l'intérieur du faisceau ainsi que de leurs propriétés électriques. Actuellement, le calcul de ces matrices se fait soit analytiquement pour les cas simples, soit par un outil numérique annexe résolvant numériquement l'équation de Laplace en deux dimensions. L'évaluation précise de ces paramètres est essentielle puisqu'ils régissent la réponse des réseaux électriques à des excitations électromagnétiques.

Dans le cas de configurations de câblages complexes comprenant des torons composés de nombreux conducteurs, ce modèle peut présenter des limitations importantes en termes de performance de calcul pour des analyses nécessitant des calculs nombreux et systématiques (statistique de réponses électriques de réseaux, optimisation de placement de câbles dans des torons...). De plus, les défauts au sein de ces configurations, tels que les problèmes d'isolation, de connectivité, ou d'interférence électromagnétique, ainsi que leurs causes, sont des enjeux cruciaux pour la performance et la sécurité des systèmes électriques. Une compréhension approfondie des types de défauts et de leurs mécanismes est ainsi nécessaire, tout comme l'estimation des courants et tensions induits par le couplage électromagnétique dans ces environnements complexes.

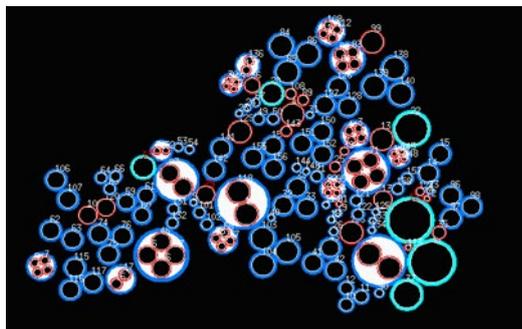
Cette thèse propose une approche novatrice utilisant l'intelligence artificielle (IA) pour améliorer le calcul des paramètres électriques primaires des lignes de transmission et pour analyser les types de défauts dans les câblages et estimer les effets du couplage électromagnétique. Dans ce contexte, cette recherche se concentrera plus particulièrement sur le développement de modèles de réseaux de neurones capables d'extraire ces paramètres, de capturer leur variation fine, et de quantifier l'impact des défauts identifiés, afin de calculer la réponse des réseaux de câbles dans diverses conditions opérationnelles et environnementales. Ces modèles seront entraînés et validés à l'aide de données simulées et réelles. En parallèle, l'utilisation de l'IA sera étendue à la gestion du risque CEM, en analysant les interactions complexes entre les câbles et en proposant des solutions pour minimiser les interférences électromagnétiques indésirables.

Cette recherche contribuera ainsi à la fiabilité et à l'efficacité des réseaux électriques pour des applications représentatives de l'industrie. Par exemple, les solutions proposées pour la gestion de la CEM, couplées à une compréhension fine des défauts de câblages et de l'estimation des effets électromagnétiques, auront des applications pratiques pour l'installation des architectures électriques à bord des futurs avions électriques.

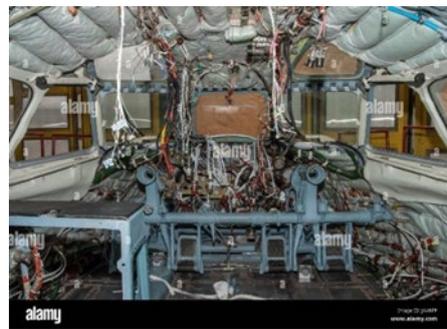
Dans un premier temps, le doctorant réalisera une revue bibliographique sur l'application de l'IA dans le domaine de la CEM ainsi que sur les travaux réalisés pour la détection de défauts dans les lignes de transmission multiconducteurs. Le développement de modèles Deep Learning pour l'estimation des paramètres des lignes de transmission et l'analyse des défauts de câblages sera l'objectif prioritaire. Dans un second temps, le doctorant cherchera à évaluer si la modélisation obtenue est conforme à la physique des interactions électromagnétiques en se concentrant sur des configurations d'architectures de câblages complexes. Un focus sera réalisé sur la visualisation et l'interprétabilité des modèles afin de permettre de mieux comprendre les décisions prises par les modèles de Deep Learning. En fin, une validation expérimentale, via le banc d'essai TROPHEA, enrichira la base de données d'apprentissage avec des données fiables et réalistes, validant les résultats des simulations et du modèle IA.

Au cours de cette thèse, le candidat aura l'opportunité unique d'acquérir et de développer un ensemble diversifié de compétences et de connaissances techniques hautement recherchées. Parmi celles-ci :

1. Maîtrise des modèles de Deep Learning : à travers l'utilisation et le développement des modèles, le candidat acquerra une expertise approfondie dans la conception, l'entraînement et l'optimisation des réseaux de neurones pour la détection et l'analyse de défauts de câblages ainsi que l'estimation des effets sur la réponse des réseaux électriques.
2. Compétences en Programmation et en Informatique Scientifique : le candidat développera des compétences avancées en programmation, en manipulant des données massives et en utilisant des outils informatiques scientifiques pour résoudre des problèmes complexes liés à la CEM.
3. Expertise en CEM et en Analyse des Défauts de Câblages : le candidat perfectionnera ses compétences dans le domaine de la CEM et dans l'analyse des défauts des lignes de transmission multiconducteurs, en comprenant les défis liés à la modélisation des réseaux et en développant des solutions innovantes pour améliorer la CEM et l'intégrité des systèmes électriques dans des environnements complexes.



Toron de câbles électriques (vue de coupe du code Laplace, suite CRIPE)



Faisceau de câbles électriques dans un cockpit d'avion



Banc d'essai de propulsion électrique distribuée, TROPHEA, de l'ONERA

Références :

[1] T. Sekine, "An Estimation Method for the Capacitance Matrix of Bundle of Wires Based on Machine Learning," *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Amsterdam, Netherlands, 2018, pp. 1004-1007, doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8485122.

[2] J. C. Clements, C. R. Paul and A. T. Adams, "Computation of the Capacitance Matrix for Systems of Dielectric-Coated Cylindrical Conductors," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-17, no. 4, pp. 238-248, Nov. 1975, doi: 10.1109/TEMC.1975.303430.

[3] Leila Djaziri, "Diagnostic des défauts d'isolement dans des lignes de transmission électrique : application aux câbles de signalisation SNCF". Thèse, université Paris Sud, 2015.

[4] H. Chebbi, I. Junqua and T. Cissé, "Deep Learning Model for Capacitance and Inductance Matrices Prediction of Multiconductor Transmission Line," *2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Brugge, Belgium, 2024, pp. 340-345.

Collaborations envisagées

SO

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : DEMR/CME

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : Housseem Chebbi

Tél. : 0562252590 Email : houssem.chebbi@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Jérôme Morio

Laboratoire : ONERA/DTIS

Tél. : 0562252663

Email : Jerome.Morio@onera.fr

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