

**Titre :**

« Modélisation numérique et optimisation du coupleur magnétique pour des systèmes de recharge par induction à forte puissance »

Directeur de thèse	Nom	Didier TRICHET
	Email	didier.trichet@univ-nantes.fr
	Téléphone	02 49 14 20 66
	Unité de recherche	Laboratoire IREENA UR4642
	Unité de rattachement	Nantes Université
	Nombre de thèses en cours	
Co-encadrant 1	Nom	Huu-Kien BUI
	Email	huu-kien.bui@univ-nantes.fr
	Téléphone	02 49 14 20 30
	Unité de recherche	Laboratoire IREENA UR4642
	Unité de rattachement	Nantes Université
	Nombre de thèses en cours	
Co-encadrant 2	Nom	
	Email	
	Téléphone	
	Unité de recherche	
	Unité de rattachement	
	Nombre de thèses en cours	

**Résumé :**

L'objectif de la thèse est de développer un outil numérique de modélisation multiphysique et d'optimisation du coupleur magnétique pour la recharge inductive à forte puissance de l'ordre du MW. L'optimisation de ce composant se fait sur la géométrie, les dimensions et la disposition des bobines et concentrateurs de champ magnétique. Sa conception est soumise aux nombreuses contraintes liées à l'encombrement, à la masse, aux échauffements, aux limites technologiques des composants électroniques associés et aux restrictions de l'exposition électromagnétique. Pour les systèmes à forte puissance, les composants sont soumis à des contraintes importantes liées aux forts champs électromagnétique et thermique. Dans cet environnement, les variations paramétriques dues aux non-linéarités des propriétés des matériaux auraient un effet non négligeable sur les performances globales du système. Dans la démarche d'optimisation, on cherche à maximiser la tolérance à la variation des propriétés des matériaux, à la variation de l'entrefer et aux désalignements entre les bobines des performances du coupleur. Pour la modélisation, afin de réduire le temps de calcul, un couplage multi-modèle optimisé (FEM, BEM, PEEC, SIBC, éléments dégénérés, ...) sera implémenté et intégré dans la démarche d'optimisation. Les travaux de thèse contribueront également aux développements de codes de calcul open-source.

## Modélisation numérique et optimisation du coupleur magnétique pour des systèmes de recharge par induction à forte puissance

Les systèmes de recharge par induction offrent une commodité accrue par l'élimination des connexions entre le chargeur et la batterie du véhicule. Cela peut simplifier le processus de recharge, en particulier dans les situations où la connectivité physique peut être difficile ou inconfortable, comme les milieux marins, sous-marins, les espaces publics ou encore les zones de construction. Bien que la recharge par induction pour les véhicules électriques soit encore en phase de développement, elle représente une direction prometteuse pour l'avenir de la mobilité électrique. Les technologies continuent de s'améliorer afin d'augmenter l'efficacité de la transmission d'énergie par induction et rendre la recharge sans fil plus compétitive par rapport aux méthodes filaires.

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux systèmes de recharge inductive en statique à forte puissance de l'ordre du MW. Ces systèmes trouvent leur application pour les véhicules électriques/hybrides maritimes ou terrestres de grande taille, comme les ferries, les drones sous-marins, les poids lourds ou encore les engins de chantier. Les études et réalisations récentes ont montré leur intérêt et leur faisabilité (Kim et al. 2015) (Guidi, Suul, and Jensen 2017) (Chalmers 2023) (WAVE 2023).

Le coupleur magnétique est l'élément central permettant le transfert d'énergie par couplage magnétique entre des bobines d'émission et de réception. Il est soumis aux nombreuses contraintes liées à l'encombrement, à la masse, aux échauffements, aux limites technologiques des composants électroniques associés et aux restrictions de l'exposition électromagnétique. Une conception optimale de ce composant permet de maximiser la puissance transmise et le rendement énergétique (Budhia, Covic, and Boys 2011) (Bosshard et al. 2015).

L'optimisation de ce composant se fait sur la géométrie, les dimensions et la disposition des bobines et concentrateurs de champ magnétique. Dans la littérature, plusieurs structures de coupleurs ont été proposées (Patil et al. 2017) (Feng et al. 2020). On peut citer les récents travaux sur l'optimisation topologique (Otomo and Igarashi 2022) (Pei et al. 2023), l'optimisation par méta-modèle (Pei 2022), l'optimisation paramétrique (Bensetti et al. 2023). Ces travaux avaient pour objectif principal l'application automobile où la puissance cible est de l'ordre de quelques dizaines de kW. La modélisation est généralement basée sur la méthode des éléments finis permettant de prendre en compte la géométrie tridimensionnelle complexe du système. La variation des propriétés des matériaux utilisés en fonction du champ magnétique et de la température est négligée.

Pour les systèmes avec des puissances de plusieurs MW, les composants sont alors soumis à des contraintes plus importantes liées aux forts champs électromagnétique et thermique. Dans cet environnement, les variations paramétriques dues aux non-linéarités des propriétés des matériaux auraient un effet non négligeable sur les performances globales du système. À fortes puissances, il est souhaitable que le couplage maximal soit obtenu avec une tolérance élevée à la variation des propriétés des matériaux, à la variation de l'entrefer et aux désalignements entre les bobines afin d'éviter un surdimensionnement excessif du convertisseur électronique et le circuit de compensation qui peut engendrer un surcoût significatif du système de recharge. Il est donc important que les non-linéarités des propriétés des matériaux soient prises en compte dans la démarche d'optimisation.

L'objectif de la thèse est de développer un outil numérique de modélisation et d'optimisation du coupleur magnétique pour la recharge inductive à haute puissance. La variation des performances du coupleur sera à minimiser sous différentes conditions opératoires. Cette démarche nécessite de développer d'un modèle 3D multi-physique avec un temps de calcul réduit. L'approche de modélisation par éléments finis classiques (FEM) est pertinente pour des simulations en 3D avec matériaux magnétiques et non-linéaires mais coûteuse en temps de calcul. En effet, la nécessité de mailler des régions d'air conduit à de larges systèmes matriciels. En plus, afin de prendre en compte de l'effet de peau prononcés sous des fréquences de travail habituelles des systèmes de recharge, les régions conductrices doivent être finement maillées. A cela s'ajoute la présence des régions minces comme des écrans de blindage. Leur modélisation conduit à un maillage fin, sinon déformé conduisant à un système matriciel mal conditionné.

Dans la littérature, différentes méthodes hybrides couplées ont été proposées afin de réduire le temps de simulation. Un couplage des éléments finis avec des méthodes intégrales comme la BEM et la PEEC est possible permettant de supprimer le maillage de l'air (Tran et al. 2008) (Rüberg, Kielhorn, and Zechner 2021). L'effet de peau prononcé peut être pris en compte par la méthode FEM-SIBC sans mailler des régions fortement conductrices (Desmoort et al. 2017) (Ba et al. 2020). Les régions minces peuvent être modélisées par la méthode des éléments dégénérés (Ren 1998) (Bui et al. 2016b). Un modèle multi-physique électromagnétique et thermique est également possible avec les méthodes couplées (Ba et al. 2020) (Bui et al. 2016a). Dans cette thèse, un couplage multi-modèle optimisé sera implémenté et intégré dans la démarche d'optimisation. Les travaux de thèse contribueront également aux développements de codes de calcul open-source.

**Mots clés :** Recharge inductive, Forte puissance, Couplage électromagnétique thermique, Optimisation, Éléments finis 3D, Éléments de frontière, PEEC, Méthodes couplées.

### Information générale :

- Directeur de thèse : Didier TRICHET
- Encadrants : Huu-Kien BUI
- École doctorale : MASTIC (<https://ed-mastic.doctorat-paysdelaloire.fr/>)
- Financement : Bourse CDE (Contrat Doctoral Établissement)
- Localisation : Laboratoire IREENA, 37, bd de l'Université, 44600 Saint Nazaire, France
- Durée : 3 ans
- Date de début : octobre 2024
- Employeur : Nantes Université
- Qualifications : Ingénieur/Master 2 Génie électrique, Mathématiques Appliqués
- Connaissances linguistiques : Anglais, Français

### Planning préliminaire :

	$T_0 + n$ mois →	+06	+12	+18	+24	+30	+36
Etat de l'art							
• Recharge inductive à haute puissance							
• Méthode numérique de modélisation du coupleur							
• Méthode d'optimisation du coupleur							
Implémentation des méthodes couplées + Validation							
Optimisation du coupleur + Validation							
Conférences + Rédaction d'articles							
Rédaction du manuscrit de thèse							
Finalisation + Dépôt du manuscrit de thèse							
Préparation soutenance							

## Références :

- Ba, Abdoulaye, Huu Kien Bui, Gérard Berthiau, Didier Trichet, and Guillaume Wasselynck. 2020. "Simulation of Induction Thermography NDT Technique Using SIBC." *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 39(5):1071–83.
- Bensetti, Mohamed, Karim Kadem, Yao Pei, Yann Le Bihan, Eric Labouré, and Lionel Pichon. 2023. "Parametric Optimization of Ferrite Structure Used for Dynamic Wireless Power Transfer for 3 KW Electric Vehicle." *Energies* 16(14):5439.
- Bosshard, Roman, Johann Walter Kolar, Jonas Mühlethaler, Ivica Stevanović, Bernhard Wunsch, and Francisco Canales. 2015. "Modeling and  $\eta$  -  $\alpha$ -Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 3(1):50–64.
- Budhia, Mickel, Grant A. Covic, and John T. Boys. 2011. "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems." *IEEE Transactions on Power Electronics* 26(11):3096–3108.
- Bui, H. K., G. Wasselynck, D. Trichet, and G. Berthiau. 2016a. "Application of Degenerated Hexahedral Whitney Elements in the Modeling of NDT Induction Thermography of Laminated CFRP Composite." *IEEE Transactions on Magnetics* 52(3):1–4.
- Bui, H. K., G. Wasselynck, D. Trichet, and G. Berthiau. 2016b. "Degenerated Hexahedral Whitney Elements for Electromagnetic Fields Computation in Multi-Layer Anisotropic Thin Regions." *IEEE Transactions on Magnetics* 52(3):1–4.
- Chalmers. 2023. "New Technology Makes Wireless Charging of Electric Vehicles and Ferries Attractive." Retrieved (<https://www.chalmers.se/en/current/news/e2-new-technology-makes-wireless-charging-of-electric-vehicles-and-ferries-attractive/>).
- Desmoort, A., Zacharie De Grève, P. Dular, C. Geuzaine, and O. Deblecker. 2017. "Surface Impedance Boundary Condition with Circuit Coupling for the 3-D Finite-Element Modeling of Wireless Power Transfer." *IEEE Transactions on Magnetics* 53(6):18–21.
- Feng, Hao, Reza Tavakoli, Omer C. Onar, and Zeljko Pantic. 2020. "Advances in High-Power Wireless Charging Systems: Overview and Design Considerations." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 6(3):886–919.
- Guidi, By Giuseppe, Jon Are Suul, and Frode Jensen. 2017. "Wireless Charging for Ships. High-Power Inductive Charging for Battery Electric and Plug-in Hybrid Vessels." *IEEE Electrification Magazine* (september):22–32.
- Kim, Jae Hee, Byung Song Lee, Jun Ho Lee, Seung Hwan Lee, Chan Bae Park, Shin Myung Jung, Soo Gil Lee, Kyung Pyo Yi, and Jeihoon Baek. 2015. "Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62(10):6242–50.
- Otomo, Yoshitsugu and Hajime Igarashi. 2022. "Topology Optimization of Magnetic Cores for WPT Using the Geometry Projection Method." *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 41(3):889–99.
- Patil, Devendra, Matthew K. McDonough, John M. Miller, Babak Fahimi, and Poras T. Balsara. 2017. "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 4(1):3–37.
- Pei, Yao. 2022. "Design and Optimization of Inductive Power Transfer Systems by Metamodeling Techniques." Université Paris-Saclay.
- Pei, Yao, Lionel Pichon, Yann Le Bihan, and Mohamed Bensetti. 2023. "SIMP-Method Topology Optimization of Ferrite Structures in Inductive Power Transfer Systems." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 65(6):1–7.
- Ren, Zhuoxiang. 1998. "Degenerated Whitney Prism Elements - General Nodal and Edge Shell Elements for Field Computation in Thin Structures." *IEEE Transactions on Magnetics* 34(5 PART 1):2547–50.
- Rüberg, Thomas, Lars Kielhorn, and Jürgen Zechner. 2021. "Electromagnetic Devices with Moving Parts—Simulation with FEM/BEM Coupling." *Mathematics* 9(15).
- Tran, T. S., G. Meunier, P. Labie, Y. Le Floch, J. Roudet, J. M. Guichon, and Y. Maréchal. 2008. "Coupling PEEC-Finite Element Method for Solving Electromagnetic Problems." *IEEE Transactions on Magnetics* 44(6):1330–33.
- WAVE. 2023. "WAVE Charging." Retrieved (<https://wavecharging.com/products/wireless/>).