

Projet de thèse de doctorat : Contribution au développement d'approches de modélisation et de techniques de caractérisation et de contrôle des supraconducteurs à haute température critique

Les matériaux supraconducteurs à haute température critique (S-HTC) présentent un fort potentiel d'application dans les systèmes d'énergie électriques, permettant, au-delà d'un certain seuil de puissance, des augmentations significatives des densités massiques de puissance, tout en augmentant l'efficacité énergétique des systèmes [1-2].

Cependant, outre l'effet de la température, les performances électromagnétiques des S-HTC sont fortement dépendantes du champ magnétique qui leur est appliqué. Ce dernier est par ailleurs le principal vecteur de la conversion d'énergie électromagnétique et électromécanique. Une caractérisation préalable des S-HTC sous différentes conditions électromagnétiques est alors nécessaire avant leur intégration dans les systèmes de puissance.

Les éléments S-HTC, notamment les rubans de seconde génération qui se présentent sous une forme d'assemblage multicouches peuvent également présenter des défauts structuraux pouvant compromettre la fiabilité des systèmes dans lesquels ils sont intégrés [3-4]. Il est alors nécessaire de développer des techniques de contrôle fiables pouvant s'adapter aux structures très minces de ces rubans où les épaisseurs des couches sont de taille micrométrique.

Dans de précédents travaux [5-8], nous avons investi dans développement d'approches de modélisation multiphysique et des techniques de contrôle et de caractérisation originales des S-HTC, où les verrous scientifiques et techniques sont liés aux structures hétérogènes à dimensions multi-échelle de ces matériaux, ainsi qu'à leur comportement électromagnétique fortement non linéaire. Ce projet s'inscrit dans la continuité de ces travaux, avec comme objectifs :

- L'amélioration des performances numériques des modèles développés, qui sont principalement basés sur les méthodes d'intégrales de volume :
 - Prise en compte de la proximité de matériaux ferromagnétiques avec leurs propriétés magnétiques non linéaires, et l'amélioration des schémas numériques de résolution prenant en compte, à la fois, la non linéarité électrique des supraconducteurs et la non linéarité magnétique des matériaux ferromagnétiques.
 - Couplages multiphysique des modèles
 - Extension des modèles aux structures tridimensionnelles, avec la nécessité de réduction de la taille des modèles
- Le développement de stratégies de caractérisation des propriétés électromagnétiques des S-HTC sous différents environnements électromagnétiques, ainsi que des stratégies de contrôle pour la détection et la caractérisation de défauts structuraux dans les rubans S-HTC dans une démarche de contrôle et d'évaluation non destructifs. Cela nécessite la combinaison d'approches numériques et expérimentales. Les plateformes technologiques disponibles au Laboratoire (GREEN) permettent le développement des manipulations expérimentales pour la validation des modèles et approches de caractérisation développées.

La thèse se déroulera à temps plein dans les locaux du Groupe de Recherche en Énergie Électrique (GREEN) situés à la Faculté des Sciences et Technologies de Nancy. Le ou la doctorante aura un bureau à proximité immédiate de ses encadrants, ce qui favorisera les échanges quotidiens. Outre ces échanges quotidiens, un suivi régulier sera mis en place, au rythme d'une réunion par semaine, afin de faire le point sur l'état d'avancement des travaux. Les encadrants accompagneront de manière active le ou la doctorant(e) dans le développement des outils numériques et des manipulations expérimentales.

Mots clés : Supraconducteurs à haute température critique, modélisation, caractérisation, contrôle non destructif, thermographie inductive

Profil et compétences recherchés :

Titulaire d'un master 2 (Bac +5) ou équivalent en génie électrique, avec des connaissances approfondies en électromagnétisme basse fréquence, ayant un intérêt pour la recherche scientifique. Une expérience en modélisation numérique en

électromagnétisme sera appréciée. D'autre part, il y a certaines qualités indispensables pour mener une activité de recherche : Curiosité scientifique, autonomie et travail d'équipe, humilité, rigueur et engagement.

Début de la thèse : Octobre 2026.

Financement : Contrat doctoral de l'Université de Lorraine.

Lieu : Université de Lorraine - Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN) – FST, Nancy.

Contacts : Hocine Menana (hocine.menana@univ-lorraine.fr) / Jean Lévêque (jean.leveque@univ-lorraine.fr)

Références

- [1] X. Song, N. Mijatovic, C. Bühner, J. Kellers, J. Wiezoreck, J. Krause, H. Pütz, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, "Experimental Validation of a Full-Size Pole Pair Set-Up of an MW-Class Direct Drive Superconducting Wind Turbine Generator." IEEE Trans. Ener. Conv., vol. 35, no. 2, pp. 1120-1128, 2020.
- [2] X. Song, C. Bühner, P. Brutsaert, A. Ammar, J. Krause, A. Bergen, T. Winkler, M. Dhalle, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, S. Wessel, M. ter Brake, M. Bauer, J. Kellers, J. Wiezoreck, H. Pütz, H.; Boy, H. Kyling, H. Seitz, "Ground Testing of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator." IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 757-764, June 2020.
- [3] Edgar R. Canavan, Henning Leidecker, and Lyudmyla Panashchenko, "Conductance Degradation in HTS Coated Conductor Solder Joints", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 102, 012032, 2015.
- [4] Lei Su, Xiaonan Yu, Ke Li, Michael Pecht, "Defect inspection of flip chip solder joints based on non-destructive methods: A review", Microelectronics Reliability, Vol. 110, 113657, July 2020.
- [5] Y. Statra, "Contribution à la modélisation et à la caractérisation des supraconducteurs HTC pour leur intégration dans les machines électrique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2021.
- [6] S. Fawaz, "Études numériques et expérimentales de bobines supraconductrices HTC pour des applications en énergie électrique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2023.
- [7] W. Dirahoui, "Caractérisations numérique et expérimentale de défauts structuraux dans les rubans supraconducteurs multicouches par thermographie inductive", Thèse de l'Université de Lorraine, 2022.
- [8] M. Farhat, "Contribution à la modélisation 3D du champ électromagnétique dans les supraconducteurs à haute température critique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2019. mperature superconductors for their control and characterization

English version

Doctoral thesis project: Contribution to the development of modeling approaches and techniques for the characterization and control of high-temperature superconductors

High-temperature superconducting (HTS) materials have a high potential for application in electrical power systems, enabling significant increases in power mass densities beyond a certain power threshold, while increasing the energy efficiency of the systems [1-2].

However, in addition to the effect of temperature, the electromagnetic performance of HTS is highly dependent on the applied magnetic field, which is nevertheless the primary driver of electromagnetic and electromechanical energy conversion. Therefore, prior characterization of HTS under various electromagnetic conditions is necessary before their integration into power systems.

HTS elements, particularly second-generation ribbons which are multilayer assemblies, can also exhibit structural defects that may compromise the reliability of the systems in which they are integrated [3-4]. It is thus necessary to develop reliable testing techniques that can adapt to the very thin structures of these ribbons, where the layer thicknesses are on the order of micrometers.

In previous works [5-8], we invested in developing multiphysics modeling approaches and original control and characterization techniques of HTS, where the scientific and technical challenges are linked to the heterogeneous, multi-scale structures of these materials, as well as their strongly nonlinear electromagnetic behavior. This project is a continuation of this work, with the following objectives:

- Improving the numerical performance of the developed models, which are primarily based on volume integral methods:
 - Considering the proximity of ferromagnetic materials with their nonlinear magnetic properties, and improving the numerical solution schemes that consider both the electrical nonlinearity of superconductors and the magnetic nonlinearity of ferromagnetic materials.
 - Multiphysics coupling of models
 - Extension of the models to three-dimensional structures, requiring model size reduction

- Development of strategies for characterizing the electromagnetic properties of HTS under different electromagnetic environments, as well as control strategies for the detection and characterization of structural defects in HTS tapes using a nondestructive testing and evaluation approach. This requires a combination of numerical and experimental approaches. The technological platforms available at the Laboratory (GREEN) enable the development of experimental manipulations for validating the developed models and characterization approaches.

Key words: High temperature superconductors, modeling, characterization, nondestructive testing, inductive thermography

Candidates should hold a Master's degree (Bac +5) or equivalent in electrical engineering, with in-depth knowledge of low-frequency electromagnetism and with an interest in scientific research. Experience in numerical modeling in electromagnetism would be an asset. Furthermore, certain qualities are essential for conducting research: scientific curiosity, autonomy and teamwork, humility, rigor, and commitment.

Starting : Octobre 2026.

Funding: Doctoral contract with the University of Lorraine.

Workplace : Université de Lorraine - Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN) – FST, Nancy.

Contacts: Hocine Menana (hocine.menana@univ-lorraine.fr) / Jean Lévêque (jean.leveque@univ-lorraine.fr)

References

1. X. Song, N. Mijatovic, C. Bühner, J. Kellers, J. Wiezoreck, J. Krause, H. Pütz, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, "Experimental Validation of a Full-Size Pole Pair Set-Up of an MW-Class Direct Drive Superconducting Wind Turbine Generator." IEEE Trans. Ener. Conv., vol. 35, no. 2, pp. 1120-1128, 2020.
2. X. Song, C. Bühner, P. Brutsaert, A. Ammar, J. Krause, A. Bergen, T. Winkler, M. Dhalé, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, S. Wessel, M. ter Brake, M. Bauer, J. Kellers, J. Wiezoreck, H. Pütz, H.; Boy, H. Kyling, H. Seitz, "Ground Testing of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator." IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 757-764, June 2020.
3. Edgar R. Canavan, Henning Leidecker, and Lyudmyla Panashchenko, "Conductance Degradation in HTS Coated Conductor Solder Joints", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 102, 012032, 2015.
4. Lei Su, Xiaonan Yu, Ke Li, Michael Pecht, "Defect inspection of flip chip solder joints based on non-destructive methods: A review", Microelectronics Reliability, Vol. 110, 113657, July 2020.
5. Y. Statra, "Contribution à la modélisation et à la caractérisation des supraconducteurs HTC pour leur intégration dans les machines électrique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2021.
6. S. Fawaz, "Études numériques et expérimentales de bobines supraconductrices HTC pour des applications en énergie électrique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2023.
7. W. Dirahoui, "Caractérisations numérique et expérimentale de défauts structurels dans les rubans supraconducteurs multicouches par thermographie inductive", Thèse de l'Université de Lorraine, 2022.
8. M. Farhat, "Contribution à la modélisation 3D du champ électromagnétique dans les supraconducteurs à haute température critique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2019. mperature superconductors for their control and characterization