

PhD position – HTS conductors for fusion

Multiscale numerical modelling of REBCO conductors for fusion : multi-tape architectures, variability, AC losses and multiphysics coupling

Framework : Université de Lorraine / GREEN, PEPR SupraFusion, scientific collaboration envisaged with CEA, including possible measurement campaigns on prototypes at Cadarache. **Keywords :** REBCO, fusion, HTS conductors, multi-tape cables, CORC/HFRC, FEM, AC losses, electromagnetic modelling, variability, multiphysics.

Context and objective

Superconducting magnets for fusion require conductors able to carry very high currents under high magnetic field, with limited losses, good stability and mechanical robustness compatible with operating constraints. REBCO tapes are now a major route towards high-field magnets, but their assembly into multi-tape conductors carrying several kA to several tens of kA remains an open scientific and technological challenge.

Several architectures are currently investigated worldwide : straight or twisted stacks, CORC/HFRC conductors, Roebel, CroCo, SECAS, TSTC, VIPER or hybrid concepts. These solutions differ in tape arrangement, transposition level, electrical contacts, compactness, AC losses, self-field effects, current redistribution and manufacturing constraints.

The PhD project will build on the experience of **GREEN** in the modelling of superconducting systems : AC losses, nonlinear $E - J$ laws, self-field effects, finite-element formulations and electromagnetic, thermal or mechanical couplings applied to HTS devices. It will be carried out in the framework of **PEPR SupraFusion**, with a scientific collaboration envisaged with **CEA**, in particular on high-current REBCO conductor architectures for fusion. Measurement campaigns may be carried out or exploited at **CEA Cadarache** on conductor or sub-cable prototypes, depending on sample availability and experimental facilities.

General objective. Develop a multiscale numerical modelling workflow to compare different REBCO conductor architectures for fusion, integrating AC losses, current distribution, self-field effects, realistic tape variability and targeted multiphysics couplings.

Scientific challenges

Comparing several conductor architectures on common grounds

Multi-tape REBCO conductors are often studied with assumptions specific to each architecture, which makes direct comparison difficult. The PhD will aim to define numerical benchmark cases to compare several conductor families using common criteria : AC losses, effective critical current, current homogeneity, engineering current density J_e , self-field effects, influence of contact and termination resistances, and robustness against defects.

The architectures considered may include straight or sectorized stacks, twisted stacks, cylindrical conductors such as CORC/HFRC, as well as transposed or quasi-transposed references such as Roebel, TSTC or VIPER-like conductors, depending on available data.

Predicting AC losses and current distribution in nonlinear REBCO conductors

The calculation of electromagnetic losses is central to the PhD project. In a REBCO conductor, losses depend on the geometry, the local orientation of the tapes, the applied magnetic field, the self-field, electrical contacts and the nonlinear superconducting law.

The current distribution evolves with the current level, field ramps, progressive saturation of some tapes, the local dependence of $I_c(B, T, \theta)$, and the onset of weakly dissipative zones. These effects directly influence hysteretic losses, coupling losses and losses associated with current redistribution.

The models developed should allow the evaluation of losses in tapes, coupling losses between tapes or sub-cables, the influence of contact resistances, the localization of dissipative zones and the effect of ramps representative of fusion operating conditions. Particular attention will be paid to non-idealized external magnetic-field scenarios, including irregular ramps, fast variations or non-periodic sequences, for which reduced or hybrid models may complement detailed finite-element calculations.

The models will combine methods adapted to the scale considered : finite-element formulations such as **H**, **H- ϕ** , **T-A** or **J-A** for the local calculation of magnetic field, $E - J$ law and losses ; equivalent or nonlinear network models to represent contacts, terminations and couplings at conductor scale. This organization will make it possible to build hybrid approaches balancing physical accuracy and computation time.

Defining the appropriate level of description from tape to full conductor

A fusion conductor may contain several tens or even several hundreds of tapes. A full geometrical representation of all details is rarely compatible with parametric studies. Conversely, excessive homogenization may hide important local phenomena.

The PhD will therefore seek to identify the relevant level of description : individual representation of selected tapes, equivalent groups, representative cells, cross-section models or reduced models. The objective is to preserve the dominant physics while keeping computation times compatible with architecture comparison and sensitivity analyses.

Including material, geometrical and assembly variability

The behaviour of a multi-tape conductor does not depend only on the nominal properties of the tapes. It is influenced by variability at several levels : material properties, geometry, stabilization, electrical contacts, mechanical assembly and manufacturing.

The models may include variations in I_c , n -value, copper thickness, total tape thickness, tape width, positioning, angular misalignment, twist pitch, compaction, contact resistance, termination resistance or assembly quality. Local defects may also be considered : degraded tape, poor contact, non-uniform pressure, imperfect soldering or locally less efficient cooling.

The objective will be to identify which sources of variability significantly affect losses, current distribution and robustness, in order to move beyond the modelling of an ideal conductor.

Confronting the models with prototypes and experimental measurements

The models should be confronted, whenever possible, with representative experimental data. Measurement campaigns may be carried out or exploited with CEA Cadarache on REBCO conductor or sub-cable prototypes. Quantities of interest may include critical current, $V - I$ curves, AC losses, segmented voltages, contact effects, response to current or field ramps, and the influence of heterogeneities.

This model/experiment comparison will help adjust modelling assumptions, identify dominant parameters and propose benchmark cases useful for PEPR SupraFusion.

Candidate profile

The position is intended for a candidate with a solid background in electrical engineering, applied physics, electromagnetism, numerical modelling, cryogenics or materials science. Previous experience in superconductivity is appreciated but not mandatory. A strong interest in multiphysics systems, numerical simulation and energy/fusion applications is expected.

Scientific skills	Electromagnetism, numerical methods, finite elements, equivalent circuits, basic knowledge of thermal or mechanical modelling appreciated.
Numerical skills	MATLAB or Python required ; COMSOL, GetDP/Gmsh or equivalent tools appreciated ; interest in reproducible and well-documented modelling.
Expected qualities	Rigour, autonomy, ability to connect physical modelling, numerical simulation and critical analysis ; ability to work collaboratively.
Additional assets	Experimental data processing, interpolation, optimization, Monte Carlo methods, scientific computing, instrumentation or cryogenics.

Practical information

Supervision	Dr. Kévin Berger, Dr. Mattia Ortino, Prof. Jean Lévêque
Doctoral school	IAEM Lorraine
Funding	PEPR SupraFusion PC 02 – SF-Cond
Main location	GREEN, Université de Lorraine, Nancy, France
Expected start	October 2026
Application	CV, cover letter, transcripts, and contact details of referees if available
Contact	Associate Professor Kévin Berger , +33 6 61 63 42 09

Sujet de thèse – Conducteurs HTS pour la fusion

Modélisation numérique multi-échelle de conducteurs REBCO pour la fusion : architectures multi-rubans, dispersions, pertes AC et couplages multiphysiques

Cadre : Université de Lorraine / GREEN, PEPR SupraFusion, collaboration scientifique envisagée avec le CEA, incluant des campagnes possibles sur prototypes à Cadarache. **Mots-clés** : REBCO, fusion, conducteurs HTS, câbles multi-rubans, CORC/HFRC, FEM, pertes AC, modélisation électromagnétique, dispersion, multiphysique.

Contexte et objectif

Les aimants supraconducteurs pour la fusion nécessitent des conducteurs capables de transporter des courants très élevés sous fort champ magnétique, avec des pertes limitées, une bonne stabilité et une tenue mécanique compatible avec les contraintes d'exploitation. Les rubans REBCO constituent aujourd'hui une voie majeure pour les aimants à haut champ, mais leur assemblage en conducteurs multi-rubans de plusieurs kA à plusieurs dizaines de kA reste un problème scientifique et technologique ouvert.

Différentes architectures sont étudiées au niveau international : stacks droits ou torsadés, conducteurs CORC/HFRC, Roebel, CroCo, SECAS, TSTC, VIPER ou concepts hybrides. Ces solutions diffèrent par la disposition des rubans, le niveau de transposition, les contacts électriques, la compacité, les pertes AC, la sensibilité au champ propre, la redistribution de courant et les contraintes de fabrication.

Le sujet s'appuiera sur l'expérience du **GREEN** en modélisation des systèmes supraconducteurs : pertes AC, lois de comportement non linéaires $E - J$, effets du champ propre, formulations éléments finis et couplages électromagnétiques, thermiques ou mécaniques appliqués aux dispositifs HTS. Il s'inscrit dans le cadre du **PEPR SupraFusion**, avec une collaboration scientifique envisagée avec le **CEA**, notamment autour des architectures de conducteurs REBCO haut courant pour la fusion. Des campagnes de mesures pourront être menées ou exploitées au **CEA Cadarache** sur des prototypes de conducteurs ou de sous-câbles, selon la disponibilité des échantillons et des moyens expérimentaux.

Objectif général. Développer une chaîne de modélisation numérique multi-échelle pour comparer différentes architectures de conducteurs REBCO pour la fusion, en intégrant les pertes AC, la distribution de courant, les effets de champ propre, les dispersions réelles des rubans et des couplages multiphysiques ciblés.

Verrous scientifiques

Comparer plusieurs architectures de conducteurs sur des bases communes

Les conducteurs REBCO multi-rubans sont souvent étudiés avec des hypothèses propres à chaque architecture, ce qui rend les comparaisons difficiles. La thèse visera à définir des cas numériques de référence pour comparer plusieurs familles de conducteurs selon des critères communs : pertes AC, courant critique effectif, homogénéité de courant, densité de courant ingénieur J_e , effet du champ propre, influence des résistances de contact et des terminaisons, et robustesse vis-à-vis des défauts.

Les architectures considérées pourront inclure des stacks droits ou sectorisés, des stacks torsadés, des conducteurs cylindriques de type CORC/HFRC, ainsi que des références transposées ou quasi-transposées de type Roebel, TSTC ou VIPER-like, selon les données disponibles.

Prédire les pertes AC et la distribution de courant dans des conducteurs REBCO non linéaires

Le calcul des pertes électromagnétiques constitue le cœur de la thèse. Dans un conducteur REBCO, les pertes dépendent de la géométrie, de l'orientation locale des rubans, du champ appliqué, du champ propre, des contacts électriques et de la loi non linéaire du supraconducteur.

La distribution de courant évolue avec le niveau de courant, les rampes de champ, la saturation progressive de certains rubans, la dépendance locale de $I_c(B, T, \theta)$ et l'apparition de zones faiblement dissipatives. Ces effets influencent les pertes hystérétiques, les pertes de couplage et les pertes associées aux redistributions de courant.

Les modèles développés devront permettre d'évaluer les pertes dans les rubans, les pertes de couplage entre rubans ou sous-câbles, l'influence des résistances de contact, la localisation des zones dissipatives et l'effet des rampes représentatives des conditions d'exploitation fusion. Une attention particulière sera portée aux scénarios de champ magnétique externe non idéalisés, incluant rampes irrégulières, variations rapides ou séquences non périodiques, pour lesquels des modèles réduits ou hybrides pourront compléter les calculs éléments finis détaillés. Ils combineront des méthodes adaptées à l'échelle étudiée : éléments finis avec formulations **H**, **H- ϕ** , **T-A** ou **J-A** pour le calcul local du champ, de la loi $E - J$ et des pertes ; modèles équivalents ou réseaux non linéaires pour représenter les contacts, les terminaisons et les couplages à l'échelle du

conducteur. Cette organisation permettra de construire des approches hybrides conciliant précision physique et temps de calcul.

Définir le bon niveau de description entre ruban, sous-câble et conducteur complet

Un conducteur pour la fusion peut contenir plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de rubans. Une modélisation complète de tous les détails géométriques est rarement compatible avec des études paramétriques. À l'inverse, une homogénéisation trop forte peut masquer des phénomènes locaux importants.

La thèse cherchera donc à identifier le niveau de description pertinent : représentation individuelle de certains rubans, groupes équivalents, cellules représentatives, modèles de section ou modèles réduits. L'objectif est de conserver la physique dominante tout en gardant des temps de calcul compatibles avec la comparaison d'architectures et l'analyse de sensibilité.

Intégrer les dispersions matériau, géométriques et d'assemblage

Le comportement d'un conducteur multi-rubans ne dépend pas seulement des propriétés nominales des rubans. Il est influencé par les dispersions qui apparaissent à plusieurs niveaux : matériau, géométrie, stabilisation, contacts électriques, assemblage mécanique et fabrication.

Les modèles pourront intégrer les variations de I_c , de n -value, d'épaisseur de cuivre, d'épaisseur totale, de largeur de ruban, de positionnement, de désalignement angulaire, de pas de torsion, de compactage, de résistance de contact, de résistance de terminaison ou de qualité d'assemblage. Des défauts locaux pourront également être considérés : ruban dégradé, mauvais contact, pression non uniforme, soudure imparfaite ou zone localement moins bien refroidie.

L'objectif sera d'identifier quelles dispersions influencent significativement les pertes, la distribution de courant et la robustesse, afin de dépasser la modélisation d'un conducteur idéal.

Confronter les modèles à des prototypes et à des mesures expérimentales

Les modèles devront être confrontés, lorsque possible, à des données expérimentales représentatives. Des campagnes de mesures pourront être réalisées ou exploitées avec le CEA Cadarache sur des prototypes de conducteurs ou de sous-câbles REBCO. Les grandeurs d'intérêt pourront inclure le courant critique, les courbes $V - I$, les pertes AC, les tensions segmentées, les effets de contact, la réponse à des rampes de courant ou de champ et l'influence d'hétérogénéités.

Cette confrontation modèle/expérience permettra d'ajuster les hypothèses, d'identifier les paramètres dominants et de proposer des cas de référence utiles au PEPR SupraFusion.

Profil du candidat recherché

Le profil recherché est celui d'un candidat ou d'une candidate ayant une formation solide en génie électrique, physique appliquée, électromagnétisme, modélisation numérique, cryogénie ou sciences des matériaux. Une expérience préalable en supraconductivité est appréciée mais non indispensable. Un intérêt marqué pour les systèmes multiphysiques, la simulation numérique et les applications énergie/fusion est attendu.

Compétences scientifiques	Électromagnétisme, méthodes numériques, éléments finis, circuits équivalents, bases de thermique ou de mécanique appréciées.
Compétences numériques	MATLAB ou Python indispensable ; COMSOL, GetDP/Gmsh ou outils équivalents appréciés ; goût pour les modèles reproductibles et documentés.
Qualités attendues	Rigueur, autonomie, capacité à relier modèle physique, simulation numérique et analyse critique ; aptitude au travail collaboratif.
Atouts supplémentaires	Traitement de données expérimentales, interpolation, optimisation, Monte-Carlo, calcul scientifique, instrumentation ou cryogénie.

Informations pratiques

Encadrement	Dr. Kévin Berger, Dr. Mattia Ortino, Pr. Jean Lévêque
École doctorale	IAEM Lorraine
Financement	PEPR SupraFusion PC 02 – SF-Cond
Lieu principal	GREEN, Université de Lorraine, Nancy
Début souhaité	Octobre 2026
Candidature	CV, lettre de motivation, relevés de notes, et contacts de personnes référentes le cas échéant
Contact	Associate Professor Kévin Berger , +33 6 61 63 42 09