
Modélisation électromagnétique et thermique des aimants REBCO haute performance

Les performances des matériaux supraconducteurs Haute Température Critique (hTc) et notamment REBCO permettent de développer des applications exceptionnelles comme les aimants à champ très intense. Leur utilisation pour des dispositifs de très grande taille est désormais envisagée, comme dans des machines de fusion par exemple. Les conditions de fonctionnement du conducteur dans les peuvent être extrêmes, avec des densités de courant moyenne au-delà de 1000 A/mm² sous des champs au-delà de 20 T. L'étude du comportement de ces matériaux et de leur mise en œuvre dans les applications est portée en France par le PEPR SupraFusion. Cette collaboration de grande ampleur regroupe l'ensemble des acteurs de la supraconductivité appliquée (CNRS, CEA et plusieurs Universités), elle constituera le cadre de cette thèse.

Afin de permettre une conception fiable des dispositifs supraconducteurs hTc, une prise en compte fine du comportement des matériaux est indispensable, ce qui requiert de développer des outils de modélisation adaptés. Leurs propriétés exigent que ces outils numériques prennent en compte des problèmes multi physiques complexes, non linéaires et couplés, sur des plages de fonctionnement très large en température et en champ magnétique.

Les conducteurs hTc sont disponibles sous la forme de couches minces (quelques microns) déposés sur des rubans larges (quelques mm). Représenter des applications complètes, potentiellement de grande taille, mettant en œuvre des conducteurs formés de plusieurs de ces rubans est un défi considérable, car la distribution de courant est très inhomogène entre rubans et même dans chacun de ceux-ci.

Un premier outil de modélisation a été développé au G2Elab dans la plateforme MIPSE (équipe MAGE) pour prédire et interpréter l'évolution de la distribution de la densité de courant dans les bobinages ce qui permet de prévoir très précisément l'évolution de la tension ainsi que du champ magnétique produit. Cet outil est basé sur une approche innovante : la méthode intégrale de volume couplée à une approche de circuit électrique. Son principal avantage est de nécessiter un maillage plus léger, comparée à la méthode des éléments finis classique car seules les régions actives (c'est-à-dire les régions conductrices et/ou magnétiques) doivent être discrétisées. De plus, cette approche assure également une très bonne conservation des courants électriques et permet facilement de représenter l'interaction du dispositif avec son circuit d'alimentation. De récents développements ont permis d'ajouter des outils performants de compression matricielle permettant un gain considérable d'efficacité.

L'objectif de cette thèse sera de contribuer au développement des outils de modélisation d'applications supraconductrices dans la plateforme MIPSE, à la fois en 2D axisymétrique et en 3D. Cette thèse sera menée dans une collaboration forte entre chercheurs travaillant sur les applications supraconductrices au G2Elab (Madea) et à l'Institut Néel, et chercheurs travaillant sur la modélisation électromagnétique au G2Elab sein de l'équipe Mage.

- Un premier objectif sera notamment de coupler aux modèles électro magnétique 2D et 3D existants un modèle thermique afin de rendre compte de la dépendance en température de la loi de comportement $E(J)$ et d'étudier l'impact de cette dépendance sur le comportement des conducteurs et applications. Cela permettra d'évaluer les pertes transitoires des bobines supraconductrices REBCO ainsi que l'étude des dynamiques d'avalanche thermique lorsque le courant critique est dépassé localement (phénomène de quench). Les applications visées vont des aimants forts champs très compacts aux câbles multi-ruban constituant les applications de



très grande taille comme les aimants de fusion. Des validations seront effectuées en collaborations avec d'autres laboratoires français (GeePs, Green) ou internationaux développant de tels outils, ainsi que par comparaison à des données expérimentales obtenues dans l'équipe sur des cas simples.

- Le deuxième objectif sera de mettre en œuvre ces outils de modélisation pour améliorer l'analyse des données expérimentales complexes issues des activités de caractérisation expérimentale menées en parallèle dans l'équipe à Grenoble. Le doctorant sera amené à participer à des campagnes de mesures voire à proposer des mesures permettant de compléter la validation des modèles. Les modèles seront également appliqués pour la simulation de dispositifs développés par des partenaires du PEPR Suprafusion, notamment au CEA en ce qui concerne les conducteurs très forts courant, ainsi que dans d'autres collaborations internationales.
- Enfin, une exploration sera menée pour la prise en compte des effets locaux sur des bobinages de très grande taille par une approche multi-échelle : les modélisations 3D à l'échelle du conducteur pourraient permettre de définir des lois de comportement équivalentes appliquées ensuite à des modèles macroscopiques de bobinage où la structure du conducteur n'est pas détaillée.

Encadrants "Supraconductivité Appliquée" G2Elab Madea / Institut Néel :
Arnaud Badel, Alexandre Zampa

Encadrants G2Elab Mage :
Gérard Meunier, Brahim Ramdane

Lieu : G2Elab et Institut Néel, CNRS, rue des Martyrs, Grenoble.