

L'Ecole doctorale : Sciences Mécaniques et Energétiques, Matériaux et
Géosciences

et le Laboratoire de recherche : LMT - Laboratoire de mécanique et de technologie
(UMR 8535)

présentent

l'AVIS DE SOUTENANCE de Monsieur Mohamad Rajab ALHARAKE

Autorisé à présenter ses travaux en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université Paris-Saclay, préparé à
l'Université Paris-Saclay GS Sciences de l'ingénierie et des systèmes en :

mécanique des matériaux

**« Participation au développement d'un aimant haut champ 30T en
REBaCuO »**

le LUNDI 21 MARS 2022 à 10h00

à

Amphithéâtre 1Z14
4 Av. des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

Membres du jury :

M. Olivier HUBERT, Professeur des universités, ENS Paris-Saclay - Université Paris-Saclay, FRANCE -
Directeur de thèse

M. Philippe FAZILLEAU, Ingénieur-chercheur, CEA Saclay, FRANCE - Co-encadrant de thèse

M. Michel CORET, Professeur des universités, Ecole Centrale de Nantes, FRANCE - Rapporteur

Mme Laurence BODELOT, Maîtresse de conférences, Ecole Polytechnique, FRANCE - Examineur

M. François DEBRAY, Directeur de recherche, Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses,
FRANCE - Rapporteur

M. Jacques NOUDEM, Professeur des universités, ENSI CAEN, FRANCE - Examineur

« Participation au développement d'un aimant haut champ 30T en REBaCuO »
présenté par Monsieur Mohamad Rajab ALHARAKE

Résumé :

Les supraconducteurs se divisent en deux catégories, les supraconducteurs à basse température critique (Low Temperature Superconductors i.e. LTS) et les supraconducteurs à haute température critique (High Temperature Superconductors i.e. HTS). Avec les LTS, des limitations strictes sont imposées sur la température d'utilisation (<14 K) et le champ magnétique de fonctionnement (<28 T). Des températures de refroidissement (jusqu'à 93 K pour le REBCO) et des champs magnétiques plus élevés (> 100 T) sont possibles en utilisant les supraconducteurs HTS. Récemment, divers projets et applications R&D à très haut champ (RMN, IRM, fusion...) aux températures cryogéniques (4-20 K) sont devenus envisageables avec la baisse significative du coût des rubans HTS. Plusieurs prototypes d'électro-aimants ont été réalisés et testés pour obtenir des champs élevés à l'aide de rubans REBCO. L'aimant "Nougat" a par exemple atteint un champ record central de 32.5 T, dont 14.5 T provenait d'un bobinage interne en REBCO seul et 18 T d'un bobinage externe résistif; cet aimant est composé d'un empilement de "galettes" REBCO utilisant un bobinage à isolation métallique (metal as insulation i.e. MI). Les bobinages MI offrent une protection passive contre les points chauds (quench i.e. transition de l'état supraconducteur à l'état résistif) grâce à leur capacité de dérivation du courant dans les tours adjacents au travers de cette isolation. Ce ruban à haute limite d'élasticité sert également de renfort mécanique additionnel. Des calculs préliminaires ont cependant montré qu'au cours d'un fonctionnement nominal, les forces Laplace sont si importantes que la contrainte radiale qui assure la mise en contact des spires peut devenir positive sur une large portion de la bobine. Une contrainte radiale positive indique que les spires sont en passe de séparation, mettant en péril la conduction électrique indispensable pour assurer la protection contre les points chauds. L'objet de cette thèse est d'offrir une meilleure compréhension du comportement mécanique des bobines électromagnétiques plates en MI REBCO soumis à différents chargements (bobinage avec pré-tension, refroidissement et alimentation électrique), grâce à la mise en place d'une modélisation analytique et à sa validation expérimentale. La mise en place de ce modèle a nécessité des développements de mécanique des milieux continus, l'identification de paramètres matériau à l'aide d'essais de traction et de compression diamétrale suivis par corrélation d'images numériques (CIN), et la construction d'un banc cryogénique pour permettre des mesures in-situ du champ de déplacement d'une galette en MI-REBCO au cours des étapes de mise à froid et d'alimentation électrique.

“Participation in the development of a high field magnet 30T using REBaCuO”

Abstract :

Superconductors are divided into two categories, low critical temperature superconductors (LTS) and high critical temperature superconductors (HTS). With LTS, strict limitations are imposed on the operating temperature (<14 K) and the bearable magnetic field (<28 T). Higher cooling temperatures (up to 93 K for REBCO) and larger magnetic fields (> 100 T) are allowed for HTS superconductors. Recently, various R&D projects and applications at very high-field (RMN, IRM, Fusion...) and cryogenics temperature (4-20 K) have become possible with the significant drop in cost of HTS tapes. Different electromagnets have been built and tested to achieve high fields using REBCO tapes. The "Nougat" magnet, for example, reached a record central field of 32.5 T: 14.5 T came from an internal REBCO winding alone (insert) and 18 T from a resistive external winding (outsert); this magnet is made up of a stack of REBCO metal-insulating (MI) "pancakes". MI windings offer passive protection against hot spots (quench) thanks to their ability to deviate the current in adjacent turns through this insulation. This tape made of high yield stress limit metal also serves as an additional mechanical reinforcement. Preliminary calculations have however shown that

during nominal operation, the Laplace forces are so large that the radial stress which brings the turns into contact can become positive over a large portion of the coil. A positive radial stress indicates that the turns are in the process of separation, endangering the thermal conduction essential to ensure protection against hot spots. The purpose of this thesis is to provide a better understanding of the mechanical behavior of flat electromagnetic coils in MI REBCO subjected to different loads (pre-tensioning winding, cooling and energizing), thanks to the implementation of analytical modeling and to its experimental validation. The implementation of this model required developments in continuum mechanics, the identification of material parameters using tensile and diametrical compression tests assisted by digital image correlation (DIC), and the construction a cryogenic bench to allow in-situ measurements of the displacement field of a MI-REBCO pancake during cooling and energizing stages.