

Etude des performances de TRBCO et tests préliminaires de prototypes pour un insert 10 T

T. Benkel^{1,2}, G. Escamez¹, X. Chaud², A. Badel¹, P. Tixador¹

¹G2Elab/Institut Néel, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, 38042 Grenoble, France

²LNCMI, CNRS, Univ. Grenoble Alpes, 38042 Grenoble, France

Les améliorations récentes des supraconducteurs à haute température critique (SHT) font de ces derniers un bon candidat pour de nombreuses applications, notamment la réalisation d'aimants capables de générer des champs magnétiques intenses. Dans ce contexte se dessine le projet NOUGAT dont l'objectif final est la réalisation d'un insert SHT générant 10 T dans un champ résistif extérieur de 20 T. L'insert est pensé comme un empilement de plusieurs doubles galettes bobinées avec des rubans TRBCO. Dans cette configuration, le bobinage de l'insert est soumis à de fortes contraintes mécaniques et ses extrémités à un champ magnétique élevé faiblement désorienté par rapport à son axe. A cause des fortes propriétés anisotropes qui influencent les performances du conducteur, ce dernier doit être étudié dans des conditions similaires pour évaluer les marges de fonctionnement de l'insert. L'étape suivante est la réalisation de plusieurs prototypes de galettes et doubles galettes afin de développer la technicité intrinsèque au processus de bobinage et de prendre la mesure des problèmes liés à la protection de l'insert ainsi qu'aux contraintes mécaniques.

Aimant, courant critique, champ magnétique intense, SHT, conducteurs TRBCO.

1. INTRODUCTION

Les aimants résistifs sont fiables et, à l'heure actuelle les seuls à pouvoir générer des champs magnétiques au-delà de 23.5 T, qui est le record détenu par une bobine supraconductrice (RMN Bruker au CRMN de Lyon). Ils ont montré de bonnes qualités de champ bien que possédant une forte consommation électrique. Ils atteignent à présent leurs limites et, notamment avec l'augmentation constante du coût de l'énergie, de nouveaux conducteurs doivent être envisagés pour la réalisation d'aimants générant des champs magnétiques plus intenses. Les supraconducteurs à haute température critique (SHT) sont notamment sérieusement considérés pour la réalisation d'insert [1], [2]. Ils montrent en effet plusieurs avantages dont leur densité de courant critique élevée sous champ intense et leur grande marge de fonctionnement en température. En effet, ces conducteurs sont capables de transporter de fortes densités de courant sous haut champ et sont aujourd'hui très largement commercialisés.

Dans ce contexte, l'ANR NOUGAT a pour but la conception et la réalisation d'un insert de 10 T, à tester à l'intérieur d'un aimant résistif de 20 T. L'insert est imaginé comme un empilement de doubles galettes dont la géométrie est principalement contrainte par l'aimant extérieur déjà

existant. Dans cette configuration, le champ transverse le plus important s'applique sur les extrémités de la bobine [3]. Or, les performances des supraconducteurs dépendent non seulement de l'intensité du champ magnétique appliqué mais également de son orientation [4]. Ceci doit donc être pris en considération lors du dimensionnement. L'aimant extérieur crée également un champ non homogène, principalement sur les extrémités du bobinage. Ainsi ces dernières sont soumises à un champ magnétique intense faiblement désorienté par rapport à l'axe longitudinal.

La figure 1 représente la distribution complète du champ magnétique dans lequel fonctionnera l'insert, le champ de l'aimant extérieur ajouté à son champ propre, ce dernier étant calculé sur COMSOL[®]. La géométrie de l'insert permet de générer 10 T avec un courant de fonctionnement d'environ 200 A (400 A/mm²). Les flèches rouges du diagramme représentent l'orientation du champ magnétique. En prenant le champ selon l'axe z de l'aimant comme référence, le conducteur est soumis à un maximum de champ transverse de 3,5 T, soit un angle d'incidence de champ d'environ 14°. Il est donc indispensable de connaître les valeurs du courant critique dans cet intervalle de désorientation de champ au-dessus de 20 T.

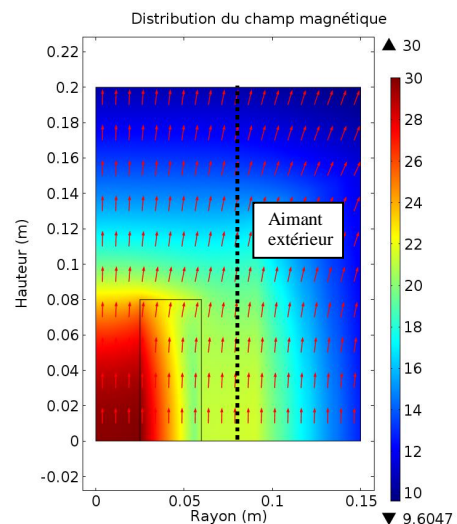


Fig. 1. Distribution du champ magnétique généré par l'insert SHT et l'aimant externe résistif. Le domaine d'étude est délimité par l'aimant externe (en pointillé) et l'insert est représenté par les traits pleins.

2. ETUDES PRÉLIMINAIRES DES MARGES DE FONCTIONNEMENT

2.1. Caractérisation du conducteur

Les fabricants ne garantissent les courants critiques de leurs conducteurs qu'à 77 K, sous champ propre. Les caractéristiques sous champ magnétique à 4,2 K ne peuvent donc être mesurées que sur des installations comme celles du LNCMI. Ainsi le ruban, ici fourni par SuperOx[®], a été testé systématiquement jusqu'à 23 T à différents angles variant de 0° (champ parallèle) à 180°. Le conducteur est étudié dans un bain d'hélium liquide. Les résultats complets sont regroupés dans [5], présentés en Fig. 2.

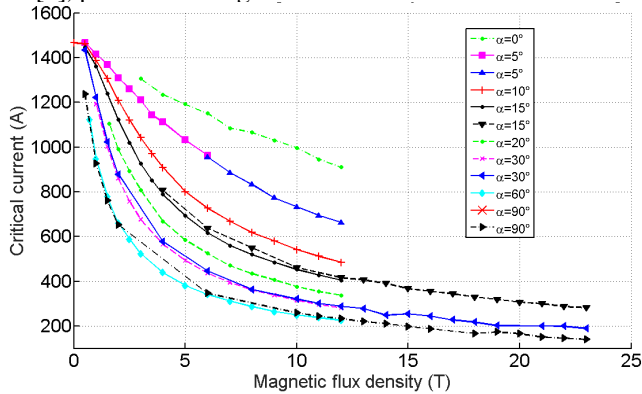


Fig. 2. Courant critique du conducteur SuperOx[®] en fonction du champ magnétique extérieur ainsi que de son orientation. Les valeurs d'angles sont données au degré près.

Les valeurs de courant critique évoluent que peu entre 30° et 90° (environ 30% de différence), mais sont quasiment divisées par deux pour des valeurs d'angles faibles, entre 0° et 10°. Cette diminution est une préoccupation majeure notamment pour les extrémités du bobinage où la composante transverse du champ est la plus importante.

2.2. Marges de fonctionnement

Ces mesures permettent d'extrapoler le courant critique sur l'intégralité du bobinage selon la composante transverse du champ magnétique. Réalisées sous COMSOL[®], les simulations calculent un courant critique pour l'intégralité de la bobine à partir du champ magnétique généré, en tenant compte des valeurs mesurées, de 350 A. Ces résultats rendent compte de l'importance du champ transverse dans le calcul des marges et donc du positionnement de la galette ou double galette dans la hauteur de l'aimant extérieur. Un courant d'environ 200 A est nécessaire pour générer 10 T, soit environ 60% du courant critique.

3. MISE EN PLACE DES PROTOTYPES DE TESTS

3.1. Principe de tests

Afin d'évaluer les problèmes de réalisation et de fonctionnement de l'insert SHT, plusieurs prototypes vont être bobinés et testés sous champ sur une canne de mesure déjà existante au LNCMI, adaptable aux prototypes [6]. Ils seront ensuite déplacés dans la hauteur de l'aimant extérieur afin d'être étudiés avec plus ou moins de champ transverse pour recréer au mieux les contraintes réelles de fonctionnement. Ces différents tests ont pour but de tester la faisabilité d'un bobinage complet, notamment en termes de tenue mécanique et de protection.

3.2. Premier prototype : double galette

Un premier prototype a été réalisé. Il s'agit d'une double galette bobinée avec le conducteur de 4 mm fourni par

SuperOx[®] caractérisé au §2.1. Le prototype est réalisé avec une seule longueur évitant ainsi des soudures éventuelles au niveau des spires intérieures. La double galette est présentée ci-dessous en Fig. 3. Elle génère un champ en son centre de 2 T lorsqu'elle est alimentée par un courant de 200 A. Elle a été testée sous un champ extérieur jusqu'à 16 T.

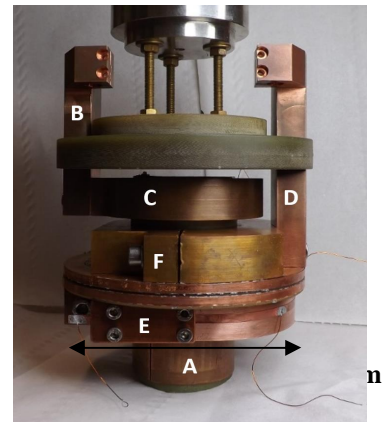


Fig. 3. Double galette (avant frettage) avant son installation sur la canne de mesure : (A) est la partie du mandarin en cuivre, (B) et (C) font partie de la bobine de courant positive, (D) est la bobine de courant négative, (E) est la bobine de courant positive et (F) fait partie de la bobine de courant négative.

4. CONCLUSION

La réalisation d'un insert SHT fonctionnant sous 20 T est complexe car le bobinage est soumis à un champ magnétique intense légèrement désorienté par rapport à l'axe de la bobine ce qui affecte les performances anisotropes des conducteurs. L'étude du conducteur proche de ses conditions de fonctionnement permet d'estimer, de manière numérique, les performances de l'insert. Afin de valider mesures et simulations, plusieurs prototypes vont être réalisés. L'étude d'une première double galette a débuté, elle a été testée à 200 A jusque 16 T. De nouveaux prototypes sont en cours de réalisation afin de préciser les problèmes liés à la tenue mécanique ainsi qu'à la protection de l'insert final.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible grâce à l'aide de J. Marpaud (préparation et mesures), C. Mollard (mécanique), A.-J. Vialle (bobinage), G. Novitchi (chimie) et Y. Miyoshi (design, fabrication et instrumentation des cannes de mesure). Il est financé par le projet ANR NOUGAT.

6. RÉFÉRENCES

- [1] H. Maeda, Y. Yanagisawa, "Recent developments in High-Temperature superconducting magnet technology", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 23, no. 3, Jun. 2014, Art. ID. 4602412.
- [2] "A comparison of Superconductor Critical Currents", NHMFL, 2014. Available at: <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots>
- [3] P. M. Leys *et al.*, "Angle-dependant U(I) measurements of HTS coated conductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013, 8000604.
- [4] D. Uglietti, *et al.*, "Angular dependence of critical current in coated conductors at 4.2 K and magnet design", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, no. 3, Jun. 2009.
- [5] T. Benkel *et al.*, "REBCO performance at high field with low incident angle and preliminary tests for a 10 T insert", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. Under review, 2015.
- [6] Y. Miyoshi, *et al.*, "HTS coil test facility in a large bore 20 T resistive magnet at LNCMI", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 23, no. 3, June 2013.