

# Performances de ruban TRBCO sous haut champ magnétique

Tara Benkel<sup>1,2</sup>, Yasuyuki Miyoshi<sup>2</sup>, Xavier Chaud<sup>2</sup>, Arnaud Badel<sup>1</sup>, Pascal Tixador<sup>1</sup>

<sup>1</sup>G2Elab/Institut Néel, CNRS, 38042 Grenoble, France

<sup>2</sup>LNCMI, CNRS, 38042 Grenoble, France

**RESUME**—Les améliorations récentes des supraconducteurs à haute température critique (SHTC) font de ces derniers des candidats très prometteurs pour la fabrication d'une nouvelle génération d'aimants à champ magnétique intense. Ces conducteurs étant récemment disponibles dans des longueurs suffisantes, de nombreux projets ont vu le jour dans le monde, dont NOUGAT (NOUvelle Génération d'Aimant pour générer des Tesla à bas coût). Ce projet a pour objectif de dessiner et fabriquer un démonstrateur d'aimant SHTC générant 10 T à l'intérieur d'un aimant résistif de 20 T. Dans cette configuration, l'insert sera soumis à des forces mécaniques colossales et ses extrémités à un champ transverse non négligeable. Or, les SHTC ont des propriétés fortement anisotropes qui doivent donc être étudiées dans des conditions de fonctionnement similaires à celles du démonstrateur final. Ce papier présente à la fois le projet NOUGAT, le contexte dans lequel il s'inscrit ainsi que les résultats obtenus sur des échantillons courts de ruban SHTC soumis à un champ magnétique allant jusqu'à 23 T avec différentes orientations. Ces mesures ont permis de valider la marge de fonctionnement en courant du dispositif final. La réalisation d'un premier prototype bobiné est présentée. Celui-ci a été testé sous 200 A jusqu'à 16 T.

*Mots-clés*—Dépendance angulaire, courant critique, aimants à haut champ magnétique, ruban TRBCO.

## 1. INTRODUCTION

Le Laboratoire National de Champ Magnétique Intense (LNCMI) de Grenoble offre la possibilité à des chercheurs du monde entier de travailler sous des inductions magnétiques pouvant atteindre jusqu'à 36 T. Celle-ci n'est atteignable pour l'instant qu'avec des électro-aimants en cuivre, au prix d'une consommation énergétique considérable, jusqu'à 24 MW au LNCMI. Ce type d'installation est rare car complexe et coûteuse, d'autant que la dissipation d'une telle puissance nécessite également un refroidissement continu à très fort débit (300 l/s au LNCMI).

Ainsi, avec la constante augmentation du coût de l'énergie et la nécessité de travailler à des champs toujours plus élevés, d'autres matériaux sont sérieusement considérés : les supraconducteurs, qui présentent des propriétés exceptionnelles [1], [2], notamment à très basse température où ils n'opposent aucune résistance au passage du courant.

Il existe deux types de supraconducteurs : ceux dits conventionnels aussi appelés supraconducteurs à basse température critique (SBTC) qui sont aujourd'hui bien maîtrisés. Ils sont déjà présents dans l'industrie pour la fabrication d'IRM,

ainsi que dans des installations au service de la physique fondamentale : ils sont notamment utilisés pour fabriquer les aimants du LHC au Cern en Suisse. Néanmoins, en termes de génération de champ magnétique, ils ont une limite, qui a déjà été atteinte avec le record de la bobine RMN Bruker de 23,5 T [3].

Les seconds, qui nous intéressent plus particulièrement ici, sont les supraconducteurs à haute température critique (SHTC) dits de seconde génération. La constante amélioration de ces derniers les place au centre des recherches pour la génération de champs magnétiques intenses. En effet, ils peuvent supporter des courants considérables sous des inductions magnétiques supérieures à 30 T, et possèdent également une très bonne tenue mécanique. Ces conducteurs étant depuis peu commercialisés dans des longueurs suffisantes pour des applications d'envergure, ils sont à présent au cœur de nombreux projets de recherche dans le monde.

Ainsi, le Laboratoire National de Champ Magnétique Intense de Tallahassee en Floride (National High Magnetic Field Laboratory of Tallahassee) a dessiné et réalisé un aimant entièrement supraconducteur générant 32 T en son centre. L'aimant extérieur est en SBTC et génère 15 T. Un insert en SHTC, composé de deux bobines imbriquées l'une dans l'autre, ajoute 17 T supplémentaires [4]. Un deuxième projet d'aimant lui-aussi entièrement supraconducteur est en cours de réalisation à l'Université de Tohoku au Japon pour générer 25 T [5] grâce à un insert SHTC de 11,5 T. Un troisième aimant supraconducteur de 25 T est étudié à l'Académie des Sciences de Chine (Chinese Academy of Sciences) [6]; l'insert SHTC devrait permettre de générer un champ magnétique de 7,5 T en son centre. De même, le Laboratoire d'Aimant Francis Bitter à Boston (Francis Bitter Magnet Laboratory, FBML) fabrique un insert en SHTC de 18.8 T qui devra fonctionner à l'intérieur d'un aimant de RMN en SBTC de 11,7 T déjà existant au FBML [7].

Le projet NOUGAT en cours à Grenoble a pour objectif de réaliser un insert SHTC générant 10 T en son centre, qui devra fonctionner à l'intérieur d'un aimant résistif de 20 T déjà existant au LNCMI afin d'obtenir un champ maximum de 30 T au milieu de l'assemblage [8]. Le principal but de ce projet n'est pas de surpasser en valeur de champ les aimants résistifs déjà existants mais plutôt de rendre compte de la faisabilité d'une nouvelle génération d'aimants réalisés avec des conducteurs SHTC. De même l'utilisation d'un aimant extérieur en cuivre et non en SBTC est une étape intermédiaire, permettant de se focaliser sur l'insert SHTC sans avoir à gérer les problèmes d'interaction

entre aimants SHTC et SBTC. Cette étude s'inscrit également dans la dynamique de recherche autour des SHTC qui pourrait, dans un avenir proche, être appliqués à d'autres domaines du génie électrique, comme le stockage et le transport de l'énergie [9].

## 2. CONTEXTE

### 2.1. Les rubans TRBCO

Les SHTC utilisés dans ce projet sont des rubans dits TRBCO. Il s'agit d'un acronyme désignant un oxyde mixte de baryum, de cuivre et d'une terre rare. La plus connue des terres rares utilisée pour fabriquer des TRBCO est l'Yttrium car l'YBCO est le premier supraconducteur découvert dont la température critique dépasse 77 K, soit la température de l'azote liquide, avec à la clé la promesse d'une réduction considérable du coût de fonctionnement des applications supraconductrices. La température critique d'un supraconducteur étant la température au-dessus de laquelle le matériau transite, c'est-à-dire retourne à l'état résistif. Le conducteur étudié dans ce papier est fabriqué à base d'Yttrium mais d'autres terres rares sont à présent couramment utilisées dans les matériaux SHTC comme le Gadolinium avec des résultats similaires.

Ces matériaux supraconducteurs de seconde génération sont à l'heure actuelle principalement commercialisés sous forme de rubans dont l'épaisseur varie entre 0,1 mm et 0,2 mm et la largeur entre 4 mm et 12 mm. Ils sont réalisés à partir d'un assemblage de couches minces déposées selon l'exemple donné Fig. 1 [10]. La couche supraconductrice a une épaisseur de 1 µm à 2 µm, elle ne représente généralement pas plus de 1 % de l'épaisseur totale. Le rayon de courbure critique, lié à l'élongation de la couche supraconductrice est autour de 6 mm et à la moindre pliure, le conducteur devient inutilisable.

Les caractéristiques spécifiques du conducteur étudié dans ce projet sont explicitées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Détails des rubans TRBCO SuperOx®

Caractéristiques	
Largeur	4 mm
Épaisseur totale	~ 120 µm
Substrat	60 µm
Couche d'argent	~ 2 µm
Cuivre (x2)	20 µm
Polyimide déposé	10 µm
Supraconducteur	2 µm
Ic min (77 K, champ propre)	120 A

La particularité des SHTC est qu'ils peuvent supporter des courants extrêmement élevés même sous des champs magnétiques très intenses, en particulier à très basse température. Néanmoins, la valeur de leur courant critique diminue avec l'augmentation du champ avec une anisotropie forte en fonction de l'orientation de celui-ci [11]. Ainsi la capacité de transport de courant sous champ transverse au plan du ruban est 1,5 à 4 fois inférieure à celle sous un champ de même amplitude mais orienté dans le plan du ruban. Cette anisotropie doit être prise en compte lors du dimensionnement de l'aimant [12]. Enfin, les conducteurs SHTC sont capables de supporter des contraintes mécaniques très importantes grâce à leur substrat qui est généralement de l'Hastelloy®, un alliage Nickel Tungstène haute performance.

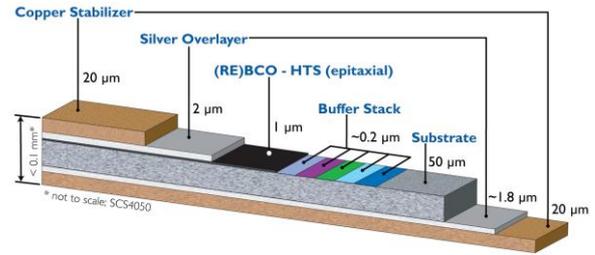


Fig.1 Exemple d'une coupe d'un ruban supraconducteur, issu des données SuperPower® [10].

Pour ces raisons, les SHTC sont au centre des nombreux projets présentés précédemment, dont NOUGAT développé dans le paragraphe suivant.

### 2.2. Projet d'Insert NOUGAT

#### 2.2.1. Contraintes de conception

Le conducteur étant commercialisé sous forme de rubans, l'insert est imaginé comme un empilement de plusieurs modules bobinés à plat : soit en forme de galettes avec un bobinage réalisé en une couche, soit en double-galette, avec un saut de couche sur le diamètre intérieur. La géométrie de l'insert est notamment contrainte par l'aimant résistif extérieur qui impose un diamètre extérieur d'au maximum 110 mm. Cet insert est destiné à préfigurer un futur aimant tout supraconducteur à l'usage des chercheurs. Il faut donc le faire correspondre aux standards des aimants très fort champs déjà existants (résistifs). Ainsi, le rayon intérieur utile pour l'utilisateur est choisi égal à 50 mm. Dans cette configuration, la hauteur maximale est d'environ 150 mm afin de rester dans la zone homogène de champ de l'aimant extérieur. Cette hauteur permet d'insérer 18 doubles galettes bobinées avec du ruban d'une largeur de 4 mm. L'épaisseur du conducteur étant d'environ 0,135 mm, chaque galette possède alors 185 tours de conducteur. Les détails du modèle sont détaillés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Détails du modèle

Caractéristiques	
Diamètre intérieur	110 mm
Diamètre extérieur	50 µm
Hauteur	150 µm
Nombre de doubles galettes	18 µm
Largeur du conducteur	4 µm
Nombre de tours par galette	185 µm

Deux solutions sont possibles pour la réalisation de ces galettes : l'utilisation d'un conducteur isolé électriquement et une solution où le conducteur n'est que partiellement isolé, par le co-bobinage d'un ruban métallique résistif (de l'acier).

Cette dernière technique permet de pallier aux problèmes de protection en cas de retour partiel à l'état normal du bobinage, qui sont un point faible identifié des bobines SHTC, et afin d'obtenir une meilleure stabilité thermique. [13], [14]. Elle est privilégiée dans le cadre du projet pour permettre d'effectuer des tests non destructifs. Néanmoins, cette méthode, si elle augmente la fiabilité de la bobine, a des effets négatifs non seulement sur la dynamique de la bobine, mais aussi sur l'homogénéité et la stabilité de l'induction magnétique produite.

Nous menons donc en parallèle des études sur des bobinages complètement isolés électriquement qui ont une meilleure linéarité magnétique [15] et une dynamique plus grande, ce qui est également un point important dans une configuration future avec une bobine extérieure SBTC, car alors si la bobine

extérieure vient à transiter, il faut que l'insert soit capable de se décharger en un minimum de temps pour éviter les sur-courants liés au couplage [16]. C'est la configuration d'une bobine isolée électriquement qui est envisagée dans cet article.

La géométrie de l'insert étant très contraignante, l'une des priorités pour atteindre les objectifs du projet est d'utiliser au mieux l'espace disponible. Ainsi l'isolant doit être choisi le plus fin possible. Du polyimide déposé a donc été sélectionné plutôt que du ruban isolant entourant le conducteur. La surépaisseur sera d'environ 10  $\mu\text{m}$  plutôt que de 25  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$  pour la deuxième solution [17]. L'étude présentée ici est réalisée avec un conducteur fourni par la compagnie Superox<sup>®</sup> dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 1 (§ 2.1).

### 2.2.2. Distribution du champ magnétique et conséquences

La distribution du champ magnétique due à l'addition des champs magnétiques générés par l'aimant interne SHTC (10 T) et l'aimant résistif externe (20 T) est présentée sur le graphique ci-dessous (Fig. 2). Le champ magnétique généré par l'aimant résistif (à droite de la ligne en pointillée sur le graphe) est calculé et mesuré par le LNCMI. Le champ généré par l'insert SHTC (en trait plein) est calculé grâce au logiciel FLUX<sup>®</sup>, G2Elab/Cedrat [18]. Le rendu final est également calculé par FLUX<sup>®</sup>. Le champ maximum au centre de l'assemblage de l'aimant supraconducteur et de l'aimant résistif doit être de 30 T.

Sur cette distribution, le champ maximum transverse se trouve sur les extrémités du bobinage comme la configuration le laissait prévoir [12]. Il est au maximum de l'ordre de 3,5 T, pour un module égal à environ 20 T. La direction du champ n'est donc plus parallèle à la surface du ruban SHTC à cet endroit du bobinage. On appelle angle d'incidence, l'angle formé entre la surface du conducteur et la direction du champ magnétique. Dans la suite, on considèrera un angle d'incidence égal à 0° pour un champ parallèle au ruban et à 90° pour un champ perpendiculaire à celui-ci. Ici, dans la zone de plus haut champ transverse, le champ est désorienté d'environ 14° par rapport à la surface du ruban.

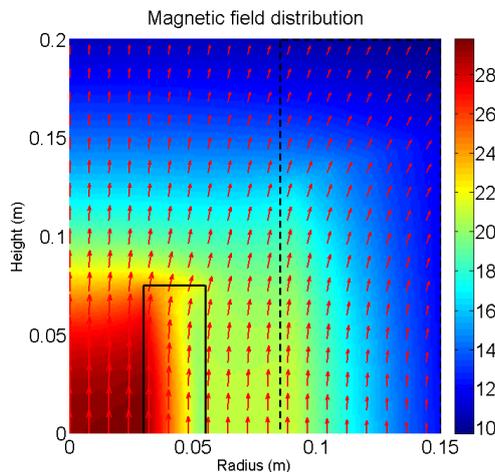


Fig.2 Distribution du champ magnétique dans l'assemblage insert SHTC 10 T dans l'aimant extérieur résistif 20 T, graphique issu du logiciel FLUX<sup>®</sup>.

Afin d'obtenir 10 T au centre de l'insert et répondre aux contraintes géométriques imposées, le bobinage doit avoir un courant nominal de 200 A, soit une densité de courant d'environ 370 A/mm<sup>2</sup> parcourant le conducteur, tout en gardant des marges de fonctionnement suffisantes pour ne pas risquer un retour partiel à l'état résistif.

Le conducteur doit donc être étudié dans des conditions similaires à celles imposées par la configuration du

démonstrateur final, soit sous des champs magnétiques compris entre 18 T et 30 T avec une faible désorientation, l'angle d'incidence devant atteindre jusqu'à une quinzaine de degrés. Afin d'avoir l'allure des performances du conducteur, il sera tout de même étudié jusqu'à 90°.

## 3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE MESURE SUR ECHANTILLON COURT

Les rubans SHTC doivent être étudiés dans des conditions de fonctionnement au plus proches de celles du démonstrateur final afin de valider leur adéquation aux exigences du projet.

### 3.1. Mise en place et canne de mesure

Des mesures de courant critique de différents conducteurs sous différents champs sont très bien renseignées dans la littérature mais principalement pour certaines orientations données, notamment en champ parallèle et perpendiculaire [19]. D'autres mesures sont néanmoins effectuées à d'autres orientations du champ magnétique mais la largeur des rubans étudiés est alors la plupart du temps réduite afin de correspondre aux limites des cannes de mesure [20], [21]. En effet, des rubans de seulement 4 mm de largeur ont désormais à 4,2 K (bain d'Hélium liquide), un courant critique de plus de 1000 A en champ parallèle [22]. Or, les trous de champ étant souvent de diamètre réduit, les cannes de mesures ne sont bien souvent pas dimensionnées pour supporter plus 1000 A à basse température. Cependant, les réductions de largeur de supraconducteur peuvent venir altérer le matériau et donc leurs performances [23].

Au LNCMI, une canne de mesure a été conçue pour supporter jusqu'à 2000 A à 4,2 K. Elle a été dessinée dans le but d'étudier la dépendance angulaire d'échantillon supraconducteur. L'extrémité de la canne, où est placé l'échantillon, est présentée sur les photographies (a) et (b) de la Fig. 3. Le schéma (c) montre de quelle manière est installé le conducteur (en rouge) dans la partie rotative de la canne de mesure. Les parties en cuivre sont figurées en orange opaque et la fibre de verre en blanc transparent.

Les échantillons étudiés mesurent 25 mm. La canne de mesure permet de les faire tourner à 360° dans le champ magnétique extérieur avec un pas de 2,5°, la précision étant de 1°. La mesure de tension est effectuée sur le milieu du ruban où les deux prises de potentiel sont des fils de cuivre soudés sur le conducteur à un intervalle de 10 mm. Le seuil de tension  $E_c$  pour détecter le courant critique est choisi à 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ .

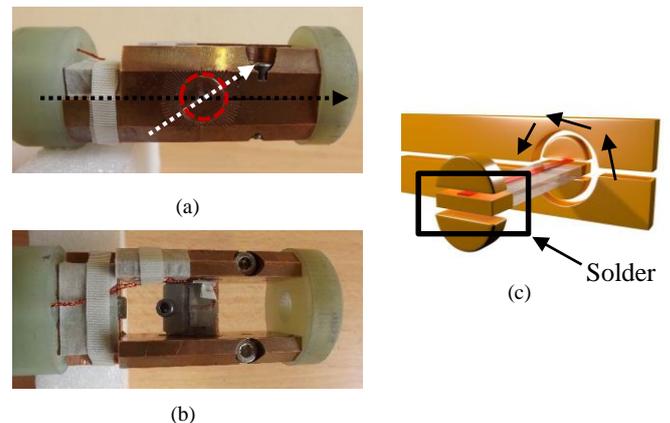


Fig.3 (a) Extrémité de la canne de mesure vue de côté. (b) Extrémité de la canne de mesure vue de haut. (c) Schéma explicatif détaillé de l'extrémité de la canne vue de biais.

La canne de mesure est surveillée en température grâce à des sondes Cernox<sup>®</sup> et en tension le long des amenées de courant.

Elle permet également de travailler à différentes températures grâce à un module de résistances chauffantes qui peut être ajouté sous l'échantillon, mais ceci ne sera effectué que dans un second temps. Seuls les résultats obtenus sur des échantillons étudiés en bain d'hélium, à 4,2 K sont présentés dans le paragraphe suivant.

### 3.2. Résultats

#### 3.2.1. Présentation des résultats

Les tests présentés ici ont été réalisés sur du ruban SuperOx® de largeur 4 mm, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1 du paragraphe 2.2.

Le conducteur a été testé jusqu'à 12 T dans un premier temps. Ensuite, les mesures ont été étendues jusqu'à 23 T. Le conducteur a donc été étudié de 0° (champ parallèle) à 90° (champ transverse) jusqu'à un champ magnétique de 23 T avec les orientations intermédiaires suivantes : 5°, 10°, 15°, 30° et 60°. Les résultats sont présentés sur le graphique suivant (Fig. 4). Les courants critiques mesurés sont donnés en fonction de l'angle d'incidence pour différentes valeurs de champs magnétiques.

Lorsque l'échantillon est tourné de 0° à 15°, les valeurs de courant critique diminuent d'environ 30% alors que pour des valeurs d'angles supérieures à 50°, les performances du conducteur n'évoluent quasiment plus. Or, d'après 2.2, ce sont les performances du conducteur à de faibles valeurs d'angles qui sont importantes pour la fabrication du démonstrateur. Cette diminution de 30% est donc une préoccupation majeure afin de calculer le courant critique qui viendra limiter le fonctionnement du démonstrateur final [4].

Néanmoins, ces mesures, notamment à de faibles valeurs d'angle, sont complexes à mettre en place d'où l'absence de résultats pour des angles inférieurs à 15° à des champs d'intensité supérieure à 12 T. En effet, pour ces angles, le courant parcourant l'échantillon est très important et allié au champ magnétique extérieur va créer des forces mécaniques élevées. Le ruban a donc de plus grands risques d'être endommagé. Ainsi, pour certains angles notamment pour les faibles valeurs, les mesures ont dues être menées sur différents échantillons. Les résultats présentés graphiquement sont alors les moyennes des valeurs obtenues pour ces différents échantillons du conducteur. Les points de mesure qui n'ont pas pu être obtenus expérimentalement, devront être extrapolés numériquement (§ 4.1.).

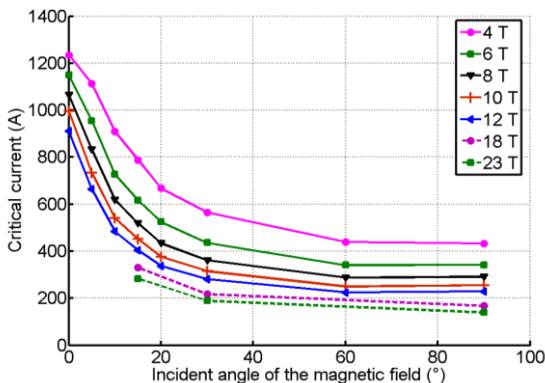


Fig.4 Distribution du champ magnétique dans l'assemblage insert SHTC 10 T dans l'aimant extérieur résistif 20 T.

De plus, d'après la distribution du champ magnétique donné par la Fig. 2, l'insert SHTC fonctionnera sous un champ magnétique allant jusqu'à 30 T. Etant donné que ces mesures n'ont pu être réalisées expérimentalement, il faudra donc

également extrapoler les mesures numériquement jusqu'à 30 T. Les résultats de toutes les mesures effectuées aux valeurs de champs intermédiaires ainsi que leur extrapolation et la justification de celle-ci sont donnés dans le paragraphe 4.1.

#### 3.2.2. Calcul du coefficient n de la loi de puissance

La loi de puissance (1) est classiquement utilisée pour représenter la loi de comportement  $E(J)$  dans les supraconducteurs.

$$E(J) = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

$E$  est le champ électrique, exprimé en V/m.  $E_c$  est le même que dans 3.1.  $J$  est la densité de courant et  $J_c$  la densité de courant critique, toutes deux exprimées en A/mm².  $n$  est l'exposant (adimensionnel) de cette loi. La Fig. 5 représente un exemple de courbe  $E(J)$  obtenu expérimentalement, et permettant de déterminer à la fois  $J_c$  et  $n$ .

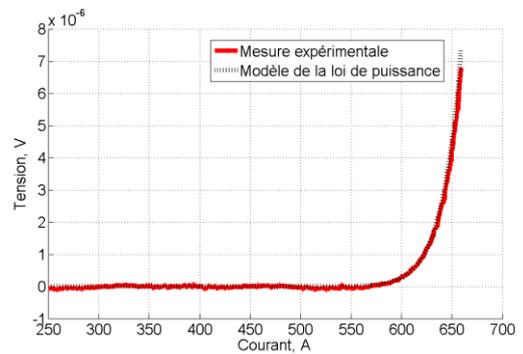


Fig.5 Transition d'un échantillon TRBCO de son état supraconducteur à son état dissipatif sous 8 T avec angle d'incidence de 10°, résultat expérimental et modèle appliqué sur la mesure.

La Fig. 6 représente les valeurs du facteur de puissance estimées grâce aux résultats expérimentaux du paragraphe 3.2.1.

A des valeurs proches de 0 T, le facteur de puissance est élevé et diminue jusqu'à 4 T où il n'évolue quasiment plus jusqu'à 12 T. Il semble également diminuer au fur et à mesure que la désorientation du champ avec la surface du conducteur augmente. Ce calcul de la valeur du facteur de puissance est primordial pour la modélisation du comportement des supraconducteurs. Les valeurs de  $n$  sont en accord avec la littérature [24].

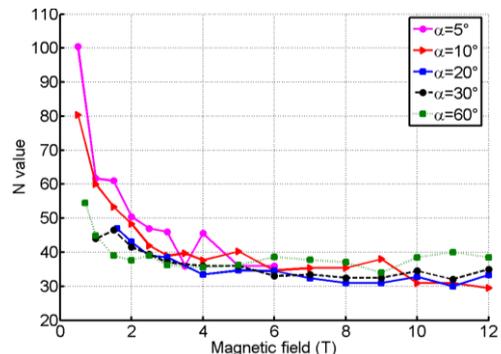


Fig.6 Valeur du facteur de puissance en fonction du champ magnétique pour différents angles d'incidence.

## 4. TRAITEMENTS DES RESULTATS

La disponibilité des installations et la difficulté à mettre en place un échantillon fonctionnel, a rendu impossible de continuer les mesures au-delà de 23 T. Néanmoins, le

démonstrateur final ayant pour objectif de travailler sous 30 T en son centre, les résultats précédents doivent être extrapolés afin d'évaluer les marges de fonctionnement.

#### 4.1. Extrapolation des résultats

Afin d'extrapoler les résultats, le modèle de Kim [25] est appliqué sur les mesures explicitées au paragraphe précédent.

$$J_c(B) = \frac{J_c(0)}{1 + \frac{|B|}{B_0}}, \quad (2)$$

$J_c(0)$  est la valeur hypothétique que prendrait  $J_c$  si elle atteignait le champ magnétique nul. En effet, étant donné, les valeurs de courant critique pour un ruban lorsque le champ extérieur est proche de zéro, il n'est dans l'absolu plus possible de négliger le champ magnétique généré par le ruban lui-même. En effet, le courant critique sans champ extérieur est ici environ égal à 1450 A.  $J_c$  est donc calculé numériquement.  $B_0$  est le champ magnétique au-delà duquel la densité de courant critique commence à saturer doucement [26]. Le résultat du modèle de Kim appliqué aux mesures du 3.2.1 est représenté sur la Fig. 7. Les constantes sont déterminées grâce aux résultats expérimentaux avec moins de 4% d'erreur pour les angles d'incidence inférieurs à 20° et avec un peu plus de 10% d'erreur pour les angles supérieurs. On peut en effet s'apercevoir que les courbes numériques ne suivent plus les valeurs expérimentales pour des champs magnétiques extérieurs inférieurs à 10 T, pour des angles supérieurs à 20°.

Néanmoins, pour obtenir le courant limitant de la bobine finale, l'intérêt est porté sur les valeurs de courant critiques aux faibles valeurs d'angle et à des champs magnétiques élevés donc le modèle de Kim est suffisant pour cette étude.

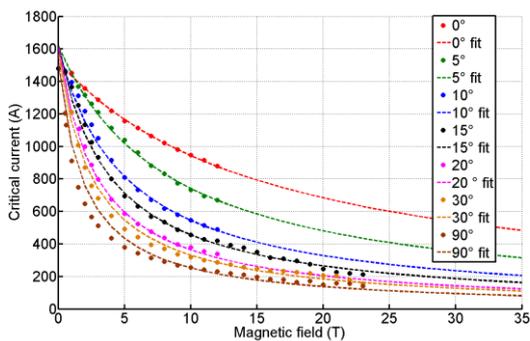


Fig.7 Distribution du champ magnétique dans l'assemblage insert SHTC 10 T dans l'aimant extérieur résistif 20 T.

#### 4.2. Calculs des marges

Grâce à l'extrapolation des résultats avec le modèle de Kim, il est possible de reprendre le calcul numérique de la distribution du champ magnétique sur l'insert présenté en 2.2 et d'y appliquer les valeurs de courants critiques trouvés expérimentalement et étendues numériquement. Ainsi, la distribution des courants critiques sur l'insert a pu être calculée selon la valeur et l'orientation du champ magnétique appliqué et son intensité sur l'intégralité du bobinage. La distribution finale est présentée sur la Fig. 8 (a). Le courant critique limitant de la bobine est donc d'environ 350 A et se trouve sur les extrémités du bobinage, conformément au § 2.2. Ainsi, le courant nominal étant de 200 A, le démonstrateur final fonctionnera dans cette configuration à environ 57% du courant critique limitant. On parle, ici de courant critique limitant et non du courant critique

de l'aimant car seul le courant critique du ruban en un point localisé du bobinage a été choisi [4].

Le courant nominal du prototype étant validé, il va servir au calcul de la contrainte mécanique radiale  $\sigma$  qui s'applique sur le bobinage. En faisant l'hypothèse pessimiste que les spires agissent indépendamment les unes des autres [27], on peut appliquer la formule (3) sur le bobinage.

$$\sigma = J \times B_z \times r \quad (3)$$

R est ici le rayon du bobinage et J la densité de courant nominale. La distribution de cette force mécanique est représentée sur la Fig. 8 (b). Elle atteint un maximum de 420 MPa sur les tours extérieurs du bobinage.

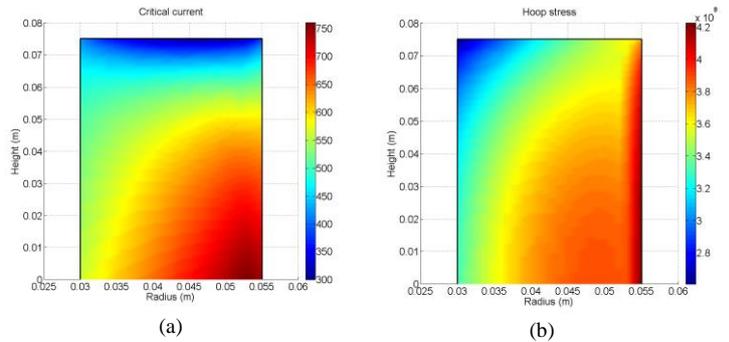


Fig.8 Distribution du champ magnétique dans l'assemblage insert SHTC 10 T dans l'aimant extérieur résistif 20 T.

## 5. PREMIERS PROTOTYPES BOBINÉS

Au vu des résultats précédents, des prototypes ont commencé à être bobinés et étudiés. Le premier est une double galette bobinée avec le ruban SuperOx® de 4 mm étudié dans les paragraphes précédents. Le but de ce test est non seulement de se familiariser avec le processus de bobinage très complexe, étant donné la fragilité du conducteur (§ 2.1) mais aussi de rendre compte de la faisabilité réelle des différents modules qui viendraient ensuite former un aimant complet.

L'intérêt principal de ce prototype est de montrer qu'il peut supporter 200 A sous 20 T parallèle à la surface du ruban mais également dans les mêmes contraintes de chaque module du démonstrateur final selon sa position dans la hauteur du trou de champ de l'aimant extérieur.

### 5.1. Double galette et processus de bobinage

Comme expliqué précédemment, le premier prototype bobiné a été réalisé avec un ruban isolé, issu de la même longueur que les échantillons mesurés dans les conditions de fonctionnement similaires à celles du démonstrateur final. Les caractéristiques de la double galette sont détaillées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Détails de la double galette

Caractéristiques	
Diamètre intérieur	54 mm
Diamètre extérieur	120 mm
Galette haute	240 tours
Galette basse	234 tours
Inductance mesurée	11,14 mH
Champ propre	2 T

Le montage de la bobine avant frettage est montré sur la photographie de la Fig. 9 (a). Il s'agit d'une double galette sans joint au milieu du bobinage, c'est à dire qu'elle est bobinée avec une seule longueur de conducteur. Le milieu de la longueur de ruban nécessaire est donc bobiné directement sur le mandrin, une moitié du ruban étant bobiné sur un satellite qui suivra la rotation du mandrin du prototype, voir Fig. 9 (b).

L'assemblage est présenté sur la Fig. 9 (a). Le mandrin est en fibre de verre et recouvre un mandrin en cuivre (A). La première extrémité de ruban est pincée sur le cylindre de cuivre inférieur (E). Ce même cylindre est serré sur le mandrin de cuivre (A) qui permet de conduire le courant jusqu'au disque supérieur également en cuivre (C) et donc de rejoindre l'amenée de courant B. La deuxième extrémité du bobinage est cette fois soudée sur le cylindre intermédiaire en cuivre (F) afin de rejoindre la deuxième amenée de courant (D).

Finalement, les deux derniers tours sont soudés sur eux-mêmes afin de reprendre une partie des efforts mécaniques. Puis, le bobinage est ensuite fretté, c'est-à-dire qu'il sera recouvert de fibre de verre imprégnée de résine époxy. Cet assemblage est ensuite monté sur une canne de mesure capable de conduire 2000 A à 4,2 K [20].

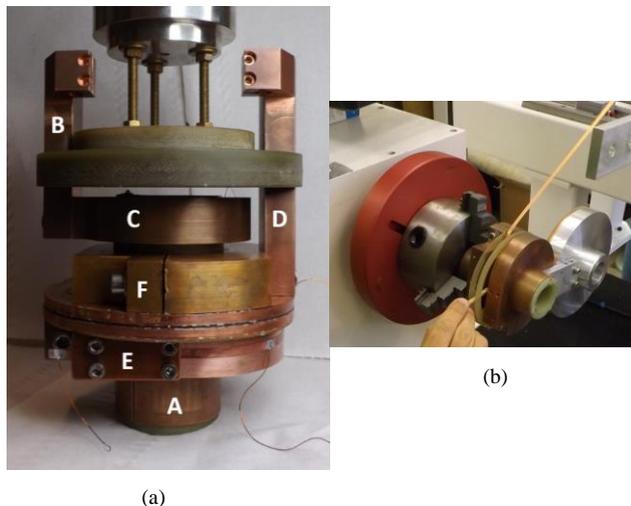


Fig.9 (a) Bobinage de la première galette en présence du satellite pour la deuxième galette. (b) Montage à blanc de la double galette avant frettage.

## 5.2. Résultats expérimentaux

La double galette est testée en bain d'hélium liquide, à 4,2 K. Elle a pu être alimentée sous 200 A, comme attendu, jusqu'à 16 T. Lors d'un test sous 200 A et 16 T, l'amenée de courant qui était soudée sur le ruban a brûlée. Aucun signal de tension ou d'échauffement n'a pu être détecté pour prévenir l'évènement. Néanmoins, il semble que la brûlure soit due à la force mécanique appliquée sur une soudure trop faible, réalisée sur une masse de cuivre trop importante plutôt qu'à l'intérieur du bobinage. La brûlure s'est propagée radialement d'une spire à l'autre sur une quinzaine de tours. Pour plus de sûreté et afin de parvenir au diamètre maximum prévu pour le démonstrateur final, une trentaine de tours a été retirée sur les deux galettes. Le diamètre extérieur est donc désormais de 108 mm.

Une fois la bobine complètement réparée et les soudures renforcées, elle sera à nouveau testée dans les mêmes conditions qu'explicitées précédemment. Afin d'améliorer l'acquisition de tension et de minimiser au maximum l'influence de la tension inductive, qui peut venir masquer l'apparition d'une transition, le protocole expérimental sera différent. Un courant inférieur au

courant critique attendu du prototype sera maintenu dans le bobinage et la température du bain d'hélium sera augmentée [28]. Ainsi, la tension liée à l'inductance de la bobine lors d'une rampe de courant sera supprimée.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail s'inscrit dans la dynamique de la recherche sur la supraconductivité. L'utilisation des SHTC demeure complexe et la réalisation d'insert SHTC reste un défi de taille.

Dans cette configuration, le bobinage est soumis à des contraintes mécaniques colossales. Ses extrémités sont exposées à un champ magnétique légèrement désorienté par rapport à la surface du ruban qui réduit considérablement les performances du conducteur à cet emplacement du bobinage et impose un courant critique limitant le démonstrateur extrêmement plus faible. La géométrie, notamment au niveau des extrémités doit donc être optimisée afin de réduire au mieux la valeur maximale de champ transverse qui sera appliqué sur le démonstrateur final.

Une marge de fonctionnement en courant a néanmoins pu être calculée inférieure à 60% sans aucune optimisation de géométrie réalisée sur les extrémités du bobinage mais cette valeur manque de précision car elle ne se base que sur les performances du conducteur.

Finalement, un premier prototype bobiné a été testé sous 200 A jusqu'à 16 T. Après avoir été endommagé, il a été réparé et sera bientôt opérationnel pour pousser les tests pour loin et se rapprocher des conditions de fonctionnement du démonstrateur final.

## 7. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier J. Marpaud (préparation mesures), C. Mollard (mécanique), A.-J. Vialle (bobinage) et G. Novitchi (chimie), sans qui cette recherche n'aurait pu être menée.

## 8. REFERENCES

- [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. Disponible sur: <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots>
- [3] Informations disponibles sur : <https://www.bruker.com/fr/products/mr/nmr/magnets/magnets/avance-1000/overview.html?amp%3BL=2>
- [4] W. D. Markiewicz et al., "Design of a superconducting 32 T magnet with REBCO high field coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 4300704, Jun. 2012.
- [5] S. Awaji et al., "New 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet Project at Tohoku University", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 24, No. 3, 2014.
- [6] Q. Wang et al., "High Magnetic Field Superconducting Magnet System Up to 25 T for ExCES", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 23 4300905.
- [7] J. Bascuñán et al., "90-mm/18.8-T all-HTS insert magnet for 1.3 GHz LTS/HTS NMR application: magnet design and double-pancake coil fabrication", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 24, No. 3, 2014.
- [8] F. Borgnolutti et al., "Design Study of a 10 T REBCO Insert Solenoid", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, DOI 10.1109/TASC.2016.2518810
- [9] J. X. Jin, S. X. Dou, C. Grantham, D. Sutanto, "Towards electrical application of high Tc superconductors", *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997. APSCOM-97. Fourth International Conference on (Conf. Publ. No. 450) (Volume:2)*
- [10] Issu de la page internet : <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>
- [11] D. Uglietti, H. Kitaguchi, S. Choi, and T. Kiyoshi, "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.

- [12] 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.
- [13] S. B. Kim *et al.*, "The transient stability of HTS coils with and without the insulation and with the insulation being replaced by brass tape", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013.
- [14] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascuñán, Y. Iwasa, "HTS pancake coils without turn-to-turn insulation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, Jun. 2011.
- [15] T. S. Lee *et al.*, "The effects of co-wound kapton, stainless steel and copper, in comparison with no insulation on the time constant and stability of GdBCO pancake coils", *Supercond. Sci. Technol.*, 2014, 27.
- [16] W. Markiewicz, "Protection of HTS coils in the limit of zero quench propagation velocity", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, Jun. 2008.
- [17] Y. Yanagisawa *et al.*, "An ultra-thin polyimide insulation coating on REBCO conductors by electrodeposition produces a maximum overall current density for REBCO coils", *Physica C* 495 (2013) 15–18.
- [18] <http://www.cedrat.com/en/software/flux.html>
- [19] Y. Miyoshi, X. Chaud, F. Drebray, B. Vincent, P. Tixador, J.-M. Rey, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, G. Nishijima and H. Kitaguchi, "HTS coil test facility in a large bore 20 T resistive magnet at LNCMI", *IEEE trans. Appl. supercond.* vol.. 23, no. 3, June 2013.
- [20] H. W. Weijers, U. P. Trociewitz, W. D. Markiewicz, J. Jiang, D. Myers, E. E. Hellstrom, A. Xu, J. Jaroszynski, P. Noyes, Y. Viouchkov, D. C. Larbalestier, "High field magnets with HTS conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, no. 3, Jun. 2010.
- [21] V. Braccini *et al.*, "Properties of recent IBAD-MOCVD coated conductors relevant to their high field, low temperature magnet use", *Supercond. Sci. Technol.*, 2011, 24.
- [22] Y. Miyoshi *et al.* "High field Ic characterizations of commercial HTS conductors", *Physica C* 516 (2015) 31–35.
- [23] M. Solovyov *et al.*, "Non-uniformity of coated conductor tapes", *Supercond. Sci. Technol.*, 2013, 26.
- [24] G. Nishijima, Y. Tsuchiya, H. Kitaguchi, T. Nishimura, T. Kato, "Ic-B-T evaluation for high-Tc superconductors in pressurized/depressurized liquid nitrogen" *IEEE trans. Appl. supercond.* Vol 23, no 2, June 2013.
- [25] Y. B. Kim, C. F. Hemstead, A. R. Strnad (1962), "Critical persistens currents in hard superconductors", *Phys. Rev. Litt.*, 9, 306-309.
- [26] Z. Jiang *et al.*, "AC loss characteristics of YBCO coated conductors with varying magnitude of critical current", *IEEE trans. Appl. supercond.* vol.. 16, no. 2 June 2006.
- [27] A. Otsuka, T. Kioshi, "High-field magnet design under constant hoop stress", *IEEE trans. Appl. supercond.* vol.. 18, no. 2 June 2008.
- [28] R. Gupta *et al.*, "High-field development for axion dark matter search at CAPP/IBS", *IEEE trans. Appl. supercond.* vol.. 26, no. 4, June 2016