



**HAL**  
open science

## Conception d'un aimant vectoriel supraconducteur produisant 3 T dans une sphère de diamètre 100 mm

Rafael-Antonio Linares-Lamus, Kévin Berger, Melika Hinaje, Bruno Douine,  
Jean Lévêque

► **To cite this version:**

Rafael-Antonio Linares-Lamus, Kévin Berger, Melika Hinaje, Bruno Douine, Jean Lévêque. Conception d'un aimant vectoriel supraconducteur produisant 3 T dans une sphère de diamètre 100 mm. La Revue 3E.I, 2015, 82, pp.10-16. hal-01224691

**HAL Id: hal-01224691**

**<https://hal.science/hal-01224691>**

Submitted on 10 Nov 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Conception d'un aimant vectoriel supraconducteur produisant 3 T dans une sphère de diamètre 100 mm

R. Linares, K. Berger, M. Hinaje, B. Douine, J. Lévêque

Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy – Université de Lorraine  
 Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France  
*rafael-antonio.linares-lamus@univ-lorraine.fr*

**RÉSUMÉ** - Les bobines supraconductrices à basse température critique sont conçues pour produire des champs magnétiques intenses à la température de fonctionnement de l'hélium liquide. Certaines d'entre elles ont été créées pour produire des champs magnétiques puissants et homogènes dans l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Malheureusement, les paramètres critiques et mécaniques du matériau supraconducteur limitent les performances des bobines. La plupart du temps, les bobines sont également construites pour produire une induction magnétique homogène dans une seule direction  $|B| = |B_x|$ . Par conséquent, il est nécessaire de tourner le patient ou l'échantillon si une étude en fonction de l'orientation du champ magnétique est souhaitée. Cela n'est pas adapté à des expériences spécifiques ou des applications biomédicales où le patient aurait besoin d'être tourné. Pour trouver une réponse à ce problème, nous avons conçu une configuration des bobines qui saura satisfaire à ces exigences. Par conséquent, nous travaillons sur l'orientation à travers trois axes d'une forte induction magnétique. La conception a été faite en utilisant un logiciel électromagnétique 3-D afin de calculer les performances du système de bobines, d'optimiser l'homogénéité et de trouver une solution minimisant la quantité de fil. Les premiers résultats sont présentés pour un système de trois bobines de Helmholtz où chaque axe est placé suivant les coordonnées cartésiennes :  $x, y, z$ . Ce système est conçu pour 3 T d'induction magnétique au centre des bobines et une valeur maximale sur la bobine autour de 7.9 T, pour un courant de fonctionnement de 110 A par bobine.

**ABSTRACT** - The LTS superconductor coils are designed to produce strong magnetic fields at the working temperature of liquid Helium. Some kinds of them have been created to produce strong and homogeneous magnetic fields (MRI). Furthermore, the critical and mechanical parameters of superconducting material limit the performances of the coils. Most of the time, the LTS coils are also build to produce a homogeneous magnetic flux density in one single direction  $|B|=|B_x|$ . Consequently, it is necessary to rotate the subject or the sample, if we want to make a study depending of the magnetic field orientation. This cannot be suitable for special kinds of experiments or biomedical applications where the subject would need to be rotated. To find an answer to this problem we have designed a coil setup that will satisfy these requirements. Hence, we are working on orientation along 3 axes of a strong magnetic flux density. The design has been made using a 3-D electromagnetic software in order to calculate the performances of the coils system, to optimize the homogeneity and to find a cost effective solution. The first results reported are for a three Helmholtz coils system where each axis is placed following the Cartesian coordinates:  $x, y, z$ . This system is designed for 3 T of magnetic flux density at the center of the coils and a peak value on the coils around 7.9 T, for an operating current of 110 A in each coil.

**MOTS-CLES** – Bobine supraconductrice, aimant vectoriel, conception, Helmholtz, application des supraconducteurs.

## 1. Introduction

La recherche des solutions pratiques aux problèmes de gestion d'énergie est en plein développement. Concernant la supraconductivité, on souhaite rendre accessible son application dans plusieurs domaines car la supraconductivité a un avantage pour les économies d'énergie : ses faibles pertes électriques. Les supraconducteurs sont majoritairement employés pour la production de champs magnétiques élevés. Ce qui permet de produire des aimants très puissants, utilisés par exemple dans la recherche sur les matériaux ou dans la recherche biomédicale. Dans ces domaines, il est parfois nécessaire d'avoir un champ magnétique intense qui peut être orienté sans avoir besoin de modifier la position de l'échantillon.

### 1.1 Brève description des fils supraconducteurs LTS

La supraconductivité a été découverte par hasard en 1911 par Kammerling Onnes. Depuis cette première découverte, de nombreux matériaux ont été identifiés comme étant des supraconducteurs. Néanmoins, il a fallu attendre le début des années 1960 pour avoir leur utilisation en génie électrique. Le supraconducteur à basse température Niobium-Titane NbTi a été découvert par Matthias Kunzler, à la température de 4,2 K. La supraconductivité est seulement possible sous certaines conditions de température, de champ magnétique et de densité de courant. Les trois paramètres critiques  $T_c, B_c, J_c$ , peuvent être représentés dans un espace tridimensionnel comme sur la Figure 1(a), où ils définissent une surface critique. Sous la surface, le matériau est à l'état supraconducteur et au-dessus, il est à l'état normal. Une autre propriété intéressante des supraconducteurs est leur densité de courant critique très élevée  $J_c$ , elle peut atteindre 3000 A/mm<sup>2</sup>.

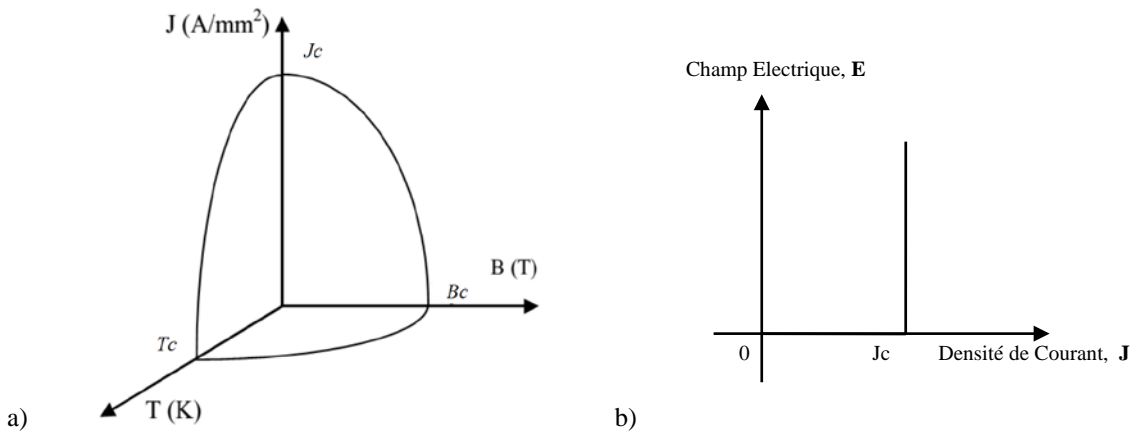


Figure 1 : a) Surface critique d'un supraconducteur. b) Modèle de Bean pouvant être utilisé pour les supraconducteurs.

Le premier fil supraconducteur a été réalisé en NbTi [1]. Pour plusieurs raisons dont la stabilité thermique et électromagnétique, il est fait de filaments d'un diamètre inférieur à 20 micromètres dans une matrice de cuivre. Le nombre de filaments peut être très élevé, dans les années 1990 un fil supraconducteur de 0,2 mm de diamètre avec plus de 200 000 filaments à l'intérieur a été réalisé.

Le modèle de Bean est la représentation la plus simple des supraconducteurs à basse température critique. Dans ce modèle, le courant dans le supraconducteur ne peut prendre que deux valeurs de densité de courant critique et une valeur nulle :

$$J = \pm J_c \text{ ou } J = 0.$$

La Figure 1(b) présente le comportement du champ électrique en fonction de la densité de courant d'un supraconducteur dans le cadre du modèle de Bean. La caractérisation des matériaux supraconducteurs permet de trouver la relation entre le champ électrique  $\mathbf{E}$  et la densité de courant  $\mathbf{J}$ . Le principe de mesure est relativement simple et consiste à mesurer la tension aux bornes d'un échantillon supraconducteur qui transporte du courant. La densité de courant critique  $J_c$  est usuellement définie pour un critère de champ électrique de 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ .

## 1.2 Aimants supraconducteurs

Les aimants terres rares peuvent produire des champs magnétiques de l'ordre d'un Tesla dans un petit volume. Dès qu'on a besoin d'un volume et d'un champ magnétique plus important, le champ magnétique doit être produit avec des électro-aimants. Les électro-aimants sont composés d'une bobine faite d'un fil conducteur, généralement de cuivre enroulé sur un axe. Il est donc nécessaire de faire circuler un courant électrique à travers la bobine pour produire un champ magnétique. Cependant tout fil conducteur comporte une résistance électrique, ce qui se traduit par des pertes électriques importantes si le courant est élevé et s'en suit l'échauffement de l'aimant. Pour résoudre cet inconvénient un fil supraconducteur peut être utilisé, sa résistance est nulle et les pertes sont réduites significativement. En somme, le fil supraconducteur permet de faire circuler une grande densité de courant pour générer des champs magnétiques élevés avec de faibles pertes.

Les grands aimants supraconducteurs sont principalement composés de bobines faites de fil supraconducteur à basse température critique. Ces bobines ont besoin d'être refroidies, généralement à la température de l'Hélium liquide, afin d'acquérir l'état supraconducteur du matériau. La principale application de ce type d'aimant est dans l'imagerie médicale dans les hôpitaux et dans des laboratoires de physique-chimie, pour caractériser des matériaux, pour stocker de l'électricité et dans les accélérateurs de particules. La forme de la bobine peut varier selon le type d'application et la plus utilisée est le solénoïde.

Dans des travaux précédents [2], l'étude des diverses géométries de bobines a été faite, le but est d'établir des relations importantes pour la production des champs magnétiques homogènes. Par exemple, le système de bobines de Merritt qui est composé de quatre bobines carrées concentriques, permet d'obtenir un grand volume homogène, ce qui suscite beaucoup d'intérêt pour diverses applications.

Le principal objectif de nos travaux est de trouver une géométrie capable de combiner homogénéité, fort champ et coût réduit. Dans cet article, on se propose de concevoir un aimant vectoriel capable de produire un fort champ magnétique orientable dans n'importe quelle direction avec une homogénéité du champ importante. Le vecteur de l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  est composé de trois composantes ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) capables de fournir des champs individuels de 1.73 T et un module de 3 T.

Par la suite, nous envisageons d'alimenter ces bobines avec une pile à combustible [3].

## 2. Matériels et Méthodes

### 2.1 Description

Dans un premier temps, le cahier des charges a été défini en fonction des tests envisagés sur des échantillons supraconducteurs à haute température critique. L'induction magnétique et le volume de travail ont été définis respectivement à 3 T et une sphère de diamètre 100 mm. Le champ magnétique doit comporter trois composantes ce qui permettra la variation de l'orientation du vecteur de  $\mathbf{B}$ . L'accès à l'échantillon dans le volume de travail a été conçu comme un conduit qui passe à travers les bobines, ce système permet d'avoir deux accès au centre. Ensuite, différents types d'arrangements ont été comparés, en fonction de l'homogénéité, du coût et de la facilité de construction. Les types étudiés ont été : Merrit, Lee-Whiting, Helmholtz [4], Sector Coil [5]. Finalement l'arrangement de bobines qui s'adapte le mieux aux contraintes est la configuration de Helmholtz. Sa construction est la moins complexe et la plus rapide, et ses performances magnétiques sont plus qu'acceptables.

Les bobines de Helmholtz sont constituées de 2 bobines circulaires de rayon  $R$  séparées par une distance égale à leur rayon. Elles permettent de produire une homogénéité supérieure à 90 % dans le volume de travail, ce qui remplit les conditions que nous nous sommes fixées pour les tests à réaliser. Les bobines de Helmholtz vont être placées en suivant chacune un axe du repère cartésien. Le système va donc être constitué de six bobines circulaires, deux par axe. Le rayon de chaque bobine de Helmholtz va être différent pour faciliter l'assemblage des bobines tout en respectant les conditions d'homogénéité, Figure 2. Le rayon  $R_y = R$  de la bobine placée suivant l'axe  $y$  est pris comme référence, c'est la bobine de plus petite taille. Les autres rayons sont calculés par rapport à  $R_y$  avec des facteurs ;  $R_x = 1,31 R_y$  pour la bobine Helmholtz suivant  $x$  et  $R_z = 1,644 R_y$  pour la bobine Helmholtz suivant l'axe  $z$ . Ces facteurs ont été calculés en fonction du placement géométrique des bobines.

La section de chaque bobine est de forme carrée car cela produit une zone uniforme plus grande, et sa réalisation est simple. Des calculs numériques ont montré l'influence de la section d'une bobine sur l'uniformité de l'induction magnétique [6].

Le système est placé dans l'air et ne comporte pas de fer dans sa construction. En effet, la saturation magnétique du fer peut limiter l'induction magnétique dans le volume de travail. Les bobines seront soutenues par du G11 dans une structure qui va permettre de maintenir le système le plus parfaitement possible en position. Il est important d'assurer la tenue des bobines car elle affecte directement l'homogénéité. Les contraintes seront donc calculées pour dimensionner les structures de support.

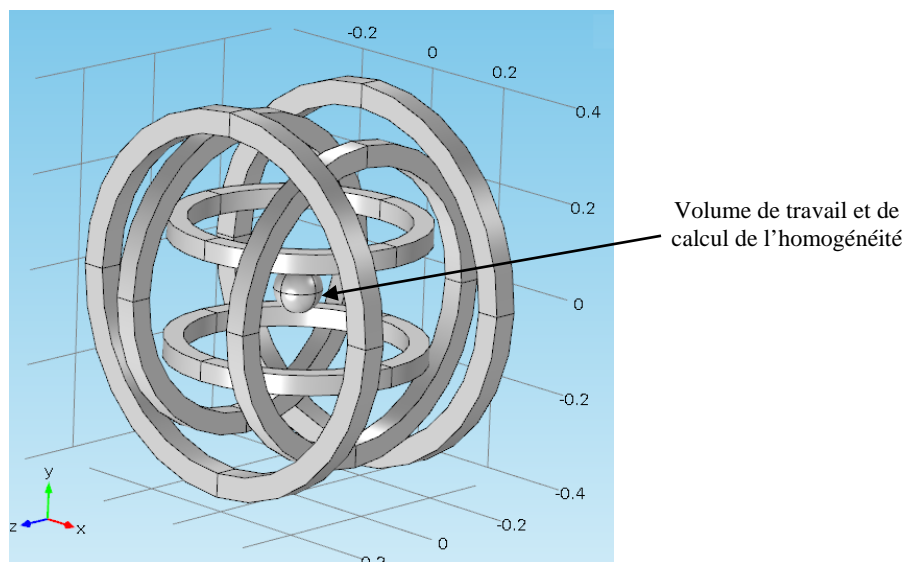


Figure 2 : Aimant vectoriel : système de bobines de Helmholtz à trois axes et volume de travail.

L'uniformité du champ magnétique est un facteur important pour le dimensionnement du système de bobines. Il doit exister un volume de travail, qui est le volume où l'on a besoin d'un champ homogène important. Dans notre cas il a été défini comme une sphère de 100 mm de diamètre et placé au milieu du système de bobines. Dans ce volume on souhaite une homogénéité supérieure à 90 %. Cela est suffisant pour caractériser des échantillons supraconducteurs à haute température critique, mais dans des expériences du type biomédical le volume de travail pourra être réduit significativement afin d'obtenir une homogénéité plus élevée.

L'expression (1) représente l'estimation de l'homogénéité  $H_o$  dans le volume de travail. Elle utilise les valeurs maximale et minimale de l'induction magnétique et sa valeur moyenne dans le volume.

$$H_o = 1 - \frac{\max(|\vec{B}|) - \min(|\vec{B}|)}{\text{moy}(|\vec{B}|)} * 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

On définit également une homogénéité par axe :

$$H_{o[x,y,z]} = 1 - \frac{\max(|\vec{B}_{[x,y,z]}|) - \min(|\vec{B}_{[x,y,z]}|)}{\text{moy}(|\vec{B}_{[x,y,z]}|)} * 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Ce paramètre prend une place significative pour le dimensionnement de la taille finale du système de bobines.

Le fil NbTi SC56S53 de Supercon Inc. [7], a été choisi pour sa grande proportion en matériau supraconducteur (0.9:1) (Sc:Cu). Il peut donc transporter une densité de courant importante. Par contre, sa stabilité thermique est inférieure à d'autres fils. Il possède la caractéristique  $I_c(B)$  montrée dans la Figure 4. Pour éviter la transition de l'état supraconducteur à l'état normal, le système de bobines doit avoir une droite de charge qui ne dépasse pas la caractéristique du fil. Donc pour une valeur de champ sur fil, il existe une valeur de  $I$  à ne pas dépasser. Les supraconducteurs à basse température critique, ont une transition à l'état normal très rapide. Pour cela, une marge de 20% sur la droite  $I_c(B)$  est proposée comme un critère, afin d'éviter une transition accidentelle.

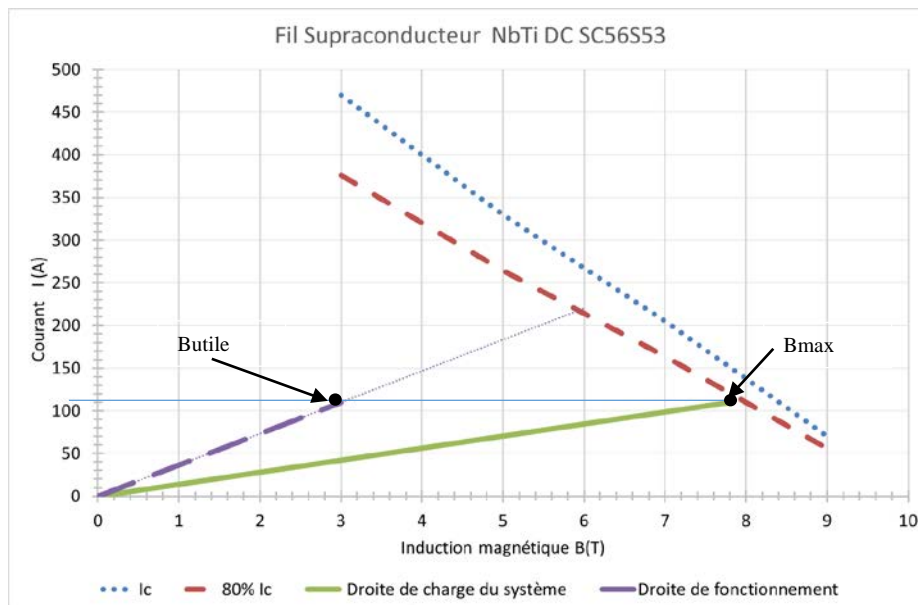


Figure 3 : Caractéristique du fil NbTi SC56S53 de SuperCon Inc., caractéristique avec marge de sécurité de 20% et droites de fonctionnement et de charge de notre système pour  $R = 15$  cm.

Il est important de définir la droite de charge du système de bobines. Pour cela, une étude paramétrique est effectuée pour plusieurs valeurs de courant d'alimentation  $I$  et de tailles de bobine  $R$ . Comme le fil NbTi est composé d'un nombre important de filaments supraconducteurs à l'intérieur d'une matrice en cuivre, cela le rend plus fragile qu'un fil massif de cuivre. On doit donc tenir compte des limitations mécaniques afin d'éviter des dommages sur le fil. Son rayon minimal de courbure ne doit pas excéder deux fois le diamètre du fil.

Les critères pour réaliser une optimisation du système ont été basés sur la production de 3 T dans le volume de travail défini. On s'intéresse à obtenir la même droite de fonctionnement pour chaque bobine de Helmholtz. Comme la bobine de Helmholtz placée dans l'axe  $y$  est la bobine la plus petite, on la prend comme référence. Pour le calcul de l'induction magnétique maximale  $B_{max}$  sur le fil, le nombre de spires de chaque groupe de bobines  $N_x, N_y, N_z$  est défini afin d'obtenir la même norme de  $\mathbf{B}$  produite par groupe de bobines pour la même valeur de courant d'alimentation. Cela engendre différentes valeurs de spires  $N_x, N_y, N_z$ . Il en résulte également que les sources de courant destinées à alimenter chaque bobine de Helmholtz vont avoir les mêmes caractéristiques électriques.

## 2.2 Simulations

Dans un premier temps, on a créé un modèle sur Comsol pour le système de bobines. Comsol est un logiciel de calcul 3D électromagnétique par éléments finis. Dans ce modèle, il a été nécessaire de réaliser une étude paramétrique pour trouver

les valeurs des dimensions physiques et électriques de la bobine. Avec les contraintes évoquées en 2.1, on peut trouver des solutions qui correspondent à notre cahier des charges.

Les paramètres du modèle  $R = R_y$  et le courant  $I$  vont permettre la mise en œuvre de l'étude sous la contrainte des valeurs critiques  $B_c$  et  $I_c$ . Le modèle géométrique est paramétré en fonction de la valeur du rayon  $R_y$  de la bobine circulaire correspondante à l'axe  $y$ . La géométrie s'adapte automatiquement aux variations de la valeur de  $R_y$ . Cela évite que les bobines se chevauchent entre elles, et assure leur séparation.

La configuration de bobines est représentée dans la Figure 2. Les six bobines ont été connectées en série, cela représente la condition la plus défavorable de fonctionnement. Il a été nécessaire de faire cette première étude afin de trouver la valeur précise et la position du module de l'induction magnétique maximale sur le fil supraconducteur  $B_{max}$ . Cette valeur permet d'estimer le courant critique  $I_c$  nécessaire pour éviter de faire transiter les bobines. Dans la Figure 3, avec la valeur de  $B_{max}$  obtenue dans la simulation pour le système avec  $R = 15$  cm, la valeur de  $I_c$  est clairement déterminée.

Le modèle a été conçu avec le module électromagnétique, les bobines sont placées dans l'air et elles ont été paramétrées avec la fonction Multi-turn coil. Cela permet de gérer un grand nombre de spires et assure l'uniformité dans la distribution spatiale des spires. Un maillage très fin a été mis en place dans tout le système de bobines, si on veut réduire au maximum les perturbations produites par une défaillance dans le maillage. Par contre, un tel niveau de précision demande un temps de calcul beaucoup plus grand. Pour cela, nous avons donc créé un modèle sur un huitième de la totalité de la géométrie. Le problème posé n'étant pas symétrique et pour trouver une solution, nous avons configuré trois systèmes symétriques sur  $1/8$  de la géométrie et nous avons appliqué le principe de superposition car tout est linéaire. Les bobines sont alimentées par un courant continu. Sur la Figure 4, ce modèle est utilisé pour l'évaluation de  $B_{max}$ .

Pour la détermination de l'homogénéité  $H_o$  de  $\mathbf{B}$ , un calcul post-traitement de Comsol a été réalisé.

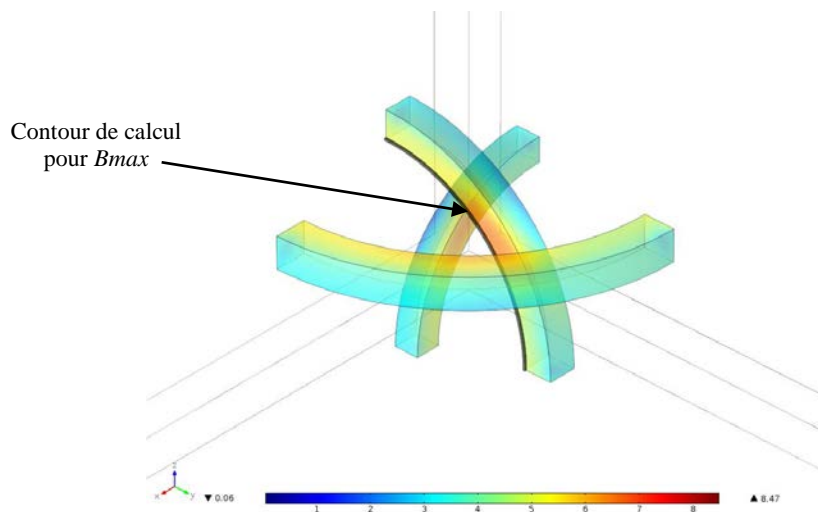


Figure 4 : Représentation de la norme de  $\mathbf{B}$  sur un modèle  $1/8$  du système de bobines avec le contour de calcul pour  $B_{max}$ .

### 3. Résultats

Les simulations faites avec Comsol en 3D ont aidé à la détermination des valeurs critiques pour le bon fonctionnement des bobines. Une des principales valeurs à trouver était l'induction magnétique maximale  $B_{max}$  sur le fil supraconducteur, l'homogénéité  $H_o$  du module de  $\mathbf{B}$  dans le volume de travail. Dans la Figure 5, on voit les courbes correspondant à différentes valeurs d'induction magnétique pour une valeur de  $R_y = 15$  cm et un courant de 110 A. Les courbes qui représentent les composantes du vecteur  $\mathbf{B}$  ont été relevées sur une ligne suivant l'axe correspondant à la composante, i.e.  $B_x$  suivant l'axe  $x$  soit  $B_x(x)$ . Le champ maximal a été relevé sur le bord intérieur de la bobine circulaire suivant  $x$ , où le module de  $\mathbf{B}$  prend sa valeur maximale de tout l'ensemble Figure 6. Les résultats obtenus pour  $B_{max}$  d'après l'étude paramétrique sont également montrés dans le Tableau 1.

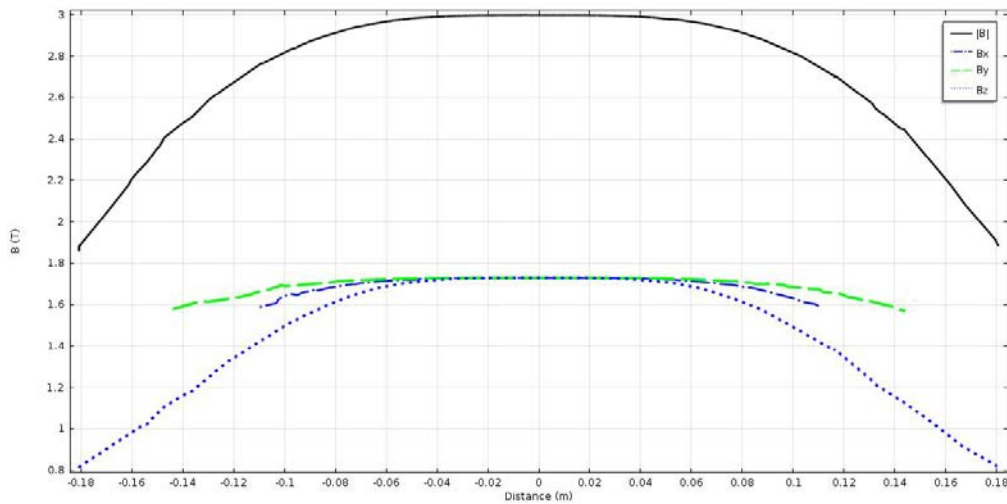


Figure 5 : Valeurs de  $B_x(x)$ ,  $B_y(y)$ ,  $B_z(z)$  et  $|B|(y)$  produit par notre système de bobines après optimisation, pour une valeur de  $R = 15$  cm et  $I = 110$  A.

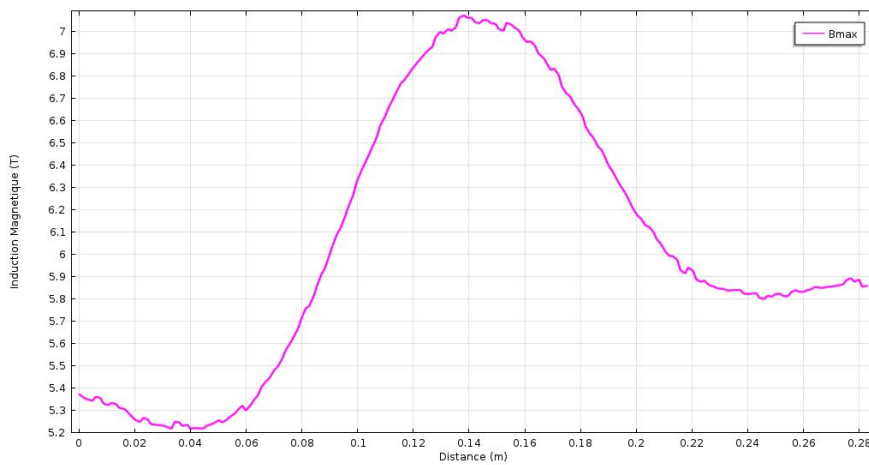


Figure 6 : Valeurs de  $B_{max}$  sur le bord intérieur de 1/8 de la bobine suivant  $x$  après optimisation, pour une valeur de  $R = 15$  cm et  $I = 110$  A.

Tableau 1.  $B_{max}$  sur le fil supraconducteur de la bobine suivant  $x$  en fonction du courant et du rayon de la bobine de Helmholtz suivant l'axe  $y$ .

$B_{max}$										
	$R_y$ (cm)									
$I$ (A)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
100	6,52	6,65	6,64	6,93	7,03	7,34	7,66	7,66	7,77	7,81
110	7,25	7,31	7,31	7,62	7,73	8,08	8,43	8,43	8,55	8,60
120	7,90	7,98	7,97	8,31	8,43	8,81	9,19	9,20	9,33	9,38
130	8,58	8,64	8,64	9,01	9,14	9,55	9,96	9,96	10,11	10,16

$I$  est le courant de l'alimentation en ampères,  $B_{max}$  est l'induction magnétique maximale sur le fil supraconducteur.

La valeur du module de  $\mathbf{B}$  au centre du système est présentée dans le tableau 2 :

Tableau 2. Module de  $\mathbf{B}$  au centre du système en fonction du courant et du rayon de la bobine Helmholtz suivant l'axe  $y$ .

$ \mathbf{B} $										
	$R_y$ (cm)									
$I$ (A)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
100	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
110	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
120	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27
130	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54

L'homogénéité du champ magnétique mesuré dans le volume de travail en forme de sphère de diamètre 100 mm est représentée dans la Figure 7.

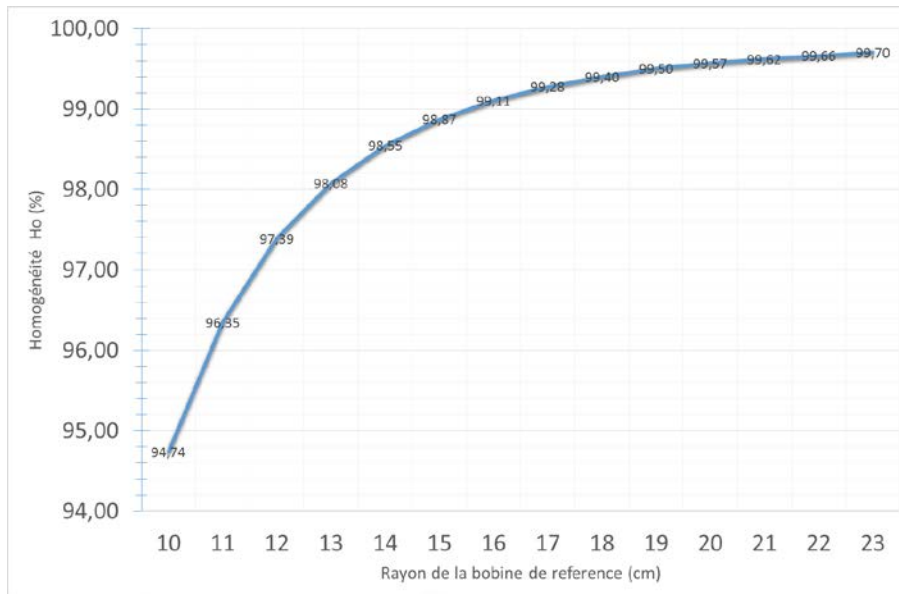


Figure 7 : Valeurs de l'homogénéité dans le volume de travail, en fonction du rayon  $R_y$  de la bobine de référence suivant  $y$ .

Tableau 3. Longueur, masse et coût du fil SC56S53 en fonction du rayon  $R_y$ .

Rayon $R_y$ (cm)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Longueur de fil (km)	11,9	14,4	17,1	20,1	23,3	26,8	30,5	34,4	38,6	43,0
Masse de fil (kg)	12,3	14,9	17,7	20,8	24,1	27,7	31,5	35,5	39,8	44,4
Coût (k€)	6,0	7,2	8,6	10,1	11,7	13,4	15,2	17,2	19,3	21,5

## 4. Discussion

Les résultats de la Figure 5 montrent que la première étape d'optimisation a réussi à produire des champs individuels  $B_x$ ,  $B_y$  et  $B_z$  d'une valeur égale pour une même valeur de courant. En outre, la caractéristique de fonctionnement du système est unifiée et cela va rendre plus simple le contrôle du vecteur  $\mathbf{B}$ . Par ailleurs, les valeurs des composantes de  $\mathbf{B}$  sont très homogènes dans la zone de travail.

Les valeurs de rayon qui ont suscitées le plus d'intérêt pour nous sont celles compris entre 12 et 15 cm car des valeurs supérieures impliquent une longueur du fil supérieure et l'apport sur la valeur de  $|\mathbf{B}|$  n'est pas très élevé. Le rayon de 15 cm offre une géométrie qui permet, sans trop de contraintes, le placement d'un cryostat au milieu du système. Les valeurs inférieures à 15 cm limitent le placement du cryostat. Dans ce cas, à moindre coût, la taille la plus favorable correspond au rayon de 15 cm. La Figure 6, représente l'allure de  $B_{max}$  sur le bord intérieur d'une des bobines suivant  $x$ . C'est sur ce contour que la valeur de  $|\mathbf{B}|$  va être toujours maximale, il s'agit d'une région où les bobines sont proches entre elles.

Les résultats affichés dans le Tableau 1 et le Tableau 2 correspondent à  $B_{max}$  et  $|\mathbf{B}|$ . Pour comprendre les valeurs montrées dans ces tableaux, prenons cet exemple : on souhaite produire  $\sim 3$  T. Avec un système de bobines  $R_y = 15$  cm, un courant de 110 A, permet d'atteindre 3 T. Au-delà, la valeur  $B_{max}$  dépasse la valeur correspondant à 80 % de  $B_c$  de la caractéristique du fil. Dans les systèmes de rayon inférieur, on peut continuer à augmenter le courant jusqu'à atteindre le  $B_{max}$  de chaque système. Les paramètres en vert sont les seules valeurs qui vont assurer le fonctionnement correct du système. La figure 7, montrent les résultats du calcul de  $H_o$ . Pour le rayon de 15 cm, on a une valeur d'homogénéité de 98,87 %. Ces résultats montrent le comportement de  $H_o$  en fonction des dimensions du système.

Comme il est nécessaire de refroidir les bobines à la température de l'Hélium liquide, le calcul de la masse des bobines est indispensable. Le Tableau 3 montre également la quantité de fil en kilomètres pour construire l'ensemble des bobines, sa masse et le coût correspondant. Dans la conception de ce système, la prise en compte des coûts est nécessaire pour la réalisation totale de l'expérience. La configuration retenue avec bobine suivant  $y$  de rayon de 15 cm a un coût total de 13,4 k€ pour environ 27,7 km de fils supraconducteurs. Il faut encore ajouter le coût du cryostat environ 16 k€ et les coûts des autres éléments pour le fonctionnement complet du système.

## 5. Conclusion

L'objectif de ce travail a été d'étudier la conception d'un aimant vectoriel supraconducteur, capable de produire une induction magnétique élevée, orientable et uniforme. Les résultats ont montré qu'un système de bobines composées par



des bobines de Helmholtz peut s'adapter à ces exigences. Un point important est que sa construction être moins compliquée que d'autres systèmes et permet une étape de calcul et de modélisation plus simple. L'absence de fer dans la structure produit un comportement linéaire du système, il reste à étudier les effets d'un écran magnétique externe, pour réduire la pollution magnétique autour du système (courbe des 5 Gauss).

La présence de trois composantes  $B_x$ ,  $B_y$  et  $B_z$  de l'induction magnétique sur le fil supraconducteur réduit significativement ses performances à la différence d'un aimant soumis à une seule composante. Le  $B_{max}$  devient une variable très importante pour sa conception.

L'uniformité de l'induction magnétique a un comportement non linéaire sur le volume de travail défini. Les valeurs trouvées pour la configuration composée de trois bobines de Helmholtz, ont une homogénéité très bonne pour des applications dans le génie électrique. Si l'on a besoin d'une homogénéité plus importante, la taille des bobines augmente et cela élève le coût du fil supraconducteur, qui représente une partie non négligeable du prix total.

## Références

- [1] J.K. Hulm and R.D. Blaugher, "Superconducting solid solution alloys of the transition elements", *Physical Review*, vol. 123 n° 5, pp. 1569-1580, (1961).
- [2] J. L. Kirschvink, "Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems," *Bioelectromagnetics*, vol. 13, pp. 401–411, (1992).
- [3] M. Hinaje, K. Berger, J. Lévêque, B. Davat, "Superconducting Coil fed by PEM Fuel Cell", *International Journal of Hydrogen Energy* vol. 38 n° 16, pp. 6773-6779, (2013).
- [4] E.L. Bronaugh, "Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Symposium Record, (1995).
- [5] L. Rossi, Ezio Todesco, "Electromagnetic design of superconducting dipoles based on sector coils", *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, vol. 10, pp. 112401, (2007).
- [6] T. Johansson, P. Jensen C. Krag, "Helmholtz coils for characterization of magnetic sensors", 10061 Fagpakkeprojekt (Teknisk Fysik), (2003).  
[http://www.nanotech.dtu.dk/~media/Institutter/Nanotech/Research/Research-groups/magnetic\\_systems/publications/other%20reports/fpp\\_2003\\_tj\\_pj\\_ck.ashx?la=da](http://www.nanotech.dtu.dk/~media/Institutter/Nanotech/Research/Research-groups/magnetic_systems/publications/other%20reports/fpp_2003_tj_pj_ck.ashx?la=da)
- [7] Supercon INC. <http://www.supercon-wire.com/>