

Etude de l'aimantation d'une pastille supraconductrice par un champ magnétique pulsé : influence de la forme de l'inducteur

Bashar Gony, Rafael-Antonio Linares-Lamus, Qunxu Lin, Kévin Berger, Bruno Douine, Jean Lévêque

▶ **To cite this version:**

Bashar Gony, Rafael-Antonio Linares-Lamus, Qunxu Lin, Kévin Berger, Bruno Douine, et al.. Etude de l'aimantation d'une pastille supraconductrice par un champ magnétique pulsé : influence de la forme de l'inducteur. Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE'2013), Jun 2013, Saint-Nazaire, France. 10 p. hal-00827938v2

HAL Id: hal-00827938
https://hal.science/hal-00827938v2

Submitted on 5 Jun 2013

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.

Manuscrit auteur, publié dans "Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE'13), Saint-Nazaire : France (2013)"

JCGE 2013
jeunes chercheurs en Génie Électrique

Etude de l'aimantation d'une pastille supraconductrice par un champ magnétique pulsé : influence de la forme de l'inducteur

Bashar GONY, Rafael LINARES, Qunxu LIN,

Kévin BERGER, Bruno DOUINE et Jean LEVEQUE

GREEN - Université de Lorraine,
Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy

bashar.gony@univ-lorraine.fr

Résumé - Dans cet article, on étudie la forme de l'inducteur pour aimanter une pastille supraconductrice par la méthode PFM (Pulsed Field Magnetization). Nous avons testé deux inducteurs: une bobine vortex et un système de 3 bobines, et nous avons trouvé le meilleur résultat aves le système de 3 bobines. Puis, on présente deux procédés pour aimanter la pastille : aimantation directe et aimantation successive, et nous avons trouvé des résultats proches pour les deux procédés. En fin, on montre l'évolution temporelle du champ piégé dans la pastille. Nous avons trouvé qu'il faut environ (5-10) minutes, après l'aimantation avec une impulsion optimale, pour que le champ piégé se stabilise.

Abstract – In this paper, we study the form of the inductor for producing a magnetic field in a superconductor bulk by using a method of PFM (Pulsed Field Magnetization). We tested two inductors: a vortex coil and a systeme of three coils, and we found the best results with the systeme of three coils. After that, we presente two process for trapping a magnetic field in the bulk: direct magnetization and successive magnetization where we found the similar results. Finally, we show the temporal evolution of the trapped field in the bulk, and we found that it takes about (5-10) minutes after the magnetization with an optimal pulse for the trapped field stabilizes.

MOTS-CLES- Aimantation, pastille YBCO, supraconducteur

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

1. Introduction

Jusqu'à aujourd'hui, la valeur maximale d'induction magnétique rémanente dans un aimant permanent est moins de 1.5 Tesla pour le Néodyme-Fer-Bore. Mais en utilisant le principe de piégeage du champ magnétique par des courants induits dans un supraconducteur à Haute Température Critique (HTC), il est possible d'obtenir des inductions sur la surface d'une pastille massive de 30 mm de diamètre de 4 T à 77 Kelvin (à l'azote liquide) et de 17 T à 29 K [1].

En général, il existe un intérêt à augmenter la valeur de l'induction. Par exemple, pour une application ayant vocation à transmettre un effort, augmenter la valeur de l'induction, revient à augmenter la valeur de l'énergie magnétique dans l'entrefer et donc du couple électromagnétique. Notre objectif est donc d'optimiser l'aimantation de la pastille supraconductrice et de maitriser ce procédé.

Il existe plusieurs méthodes d'aimantation mais nous avons choisi la méthode la plus pratique à mettre en œuvre, *in situ* , il s'agit de la méthode PFM « Pulsed Field Magnetization ». Le principe général de cette méthode est une décharge de condensateurs dans une bobine que nous appellerons l'inducteur. Cette décharge va générer une impulsion de champ magnétique qui va induire des courants et piéger un champ magnétique dans la pastille supraconductrice. Cette valeur de champ piégé dans la pastille dépend de [2-3] :

1- La densité de courant critique de la pastille *Jc*.
2- Les dimensions de la pastille.
3- La forme de l'impulsion du champ appliqué.

Tout d'abord, nous allons présenter les moyens expérimentaux et le mode opératoire permettant d'aimanter des pastilles supraconductrices. Puis l'étude des deux types d'inducteurs utilisés et la comparaison des différents procédés d'aimantation sont exposées. Enfin, nous allons présenter la conservation du champ magnétique piégé dans la pastille au cours du temps après le cycle d'aimantation.

2. EXPERIMENTATION

2.1 Moyens expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons la pastille supraconductrice, les deux types d'inducteurs puis le circuit électrique d'aimantation enfin la mesure de la carte de champ magnétique piégé. Nous avons effectué le travail à la température constante de 77 K, la température de l'azote liquide.

2.1.1 Pastille supraconductrice

Nous avons effectué toutes les mesures sur une pastille supraconductrice YBCO de température critique 92 K, de diamètre 16 mm, et de hauteur 8 mm Fig.1.

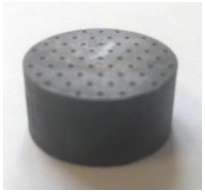


Figure 1 : Pastille YBCO utilisée.

Pour mesurer l'aimantation de la pastille, le champ magnétique au centre de la surface de la pastille est mesuré par une sonde à effet Hall adaptée aux basses températures. La distance de la partie active par rapport à la surface est d'environ 0,5 mm.

2.1.2 Les inducteurs

a) La bobine vortex

Pour aimanter la pastille, nous utilisons une bobine de cuivre comme inducteur avec les paramètres suivants :

Nombre de spires = 8 tours,

Diamètre efficace = 41 mm, et hauteur efficace = 3,7mm,

Pour tenir la bobine, on l'a moulée avec de la résine. La figure 2 montre cette bobine et sa position par rapport à la pastille.

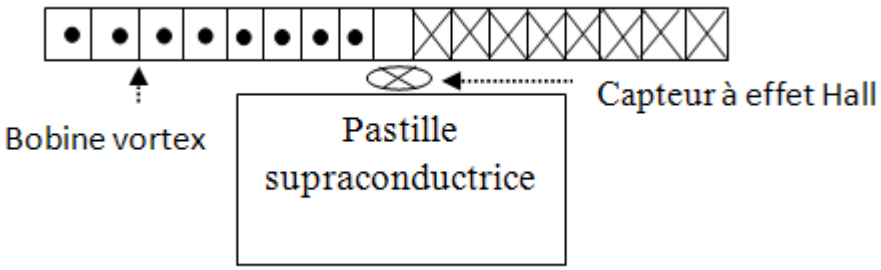


Figure 2 : Aimantation avec la bobine vortex.

b) Le système de 3 bobines

Nous allons utiliser un autre inducteur qui se compose de 3 bobines de cuivre, la bobine 1 en haut de la pastille, la bobine 2 autour de la pastille, la bobine 3 en dessous de la pastille. Les trois bobines sont connectées en série et le champ vu par la pastille sera la somme des champs crées par les 3 bobines qui ont les paramètres suivants :

Bobine 1, et 3 : Nombre de spires = 40 tours,

Diamètre efficace = 52 mm, et hauteur efficace = 20mm,

Bobine 2 : Nombre de spires = 32 tours,

Diamètre externe = 52 mm, diamètre interne= 16,5 mm, et hauteur = 11,4 mm,

La figure 3 montre ce système d'inducteur avec la pastille aimantée.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

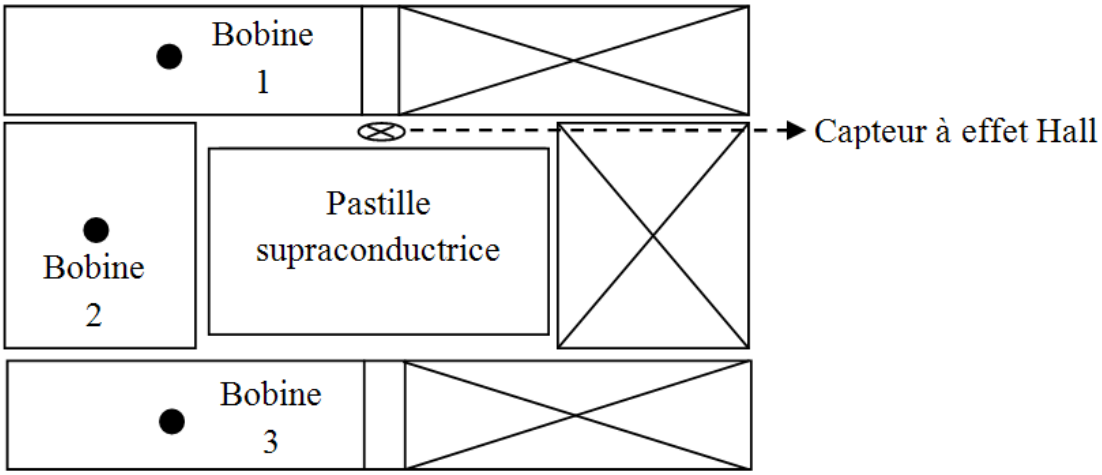


Figure 3 : Système de trois bobines autour de la pastille supraconductrice.

2.1.3 Circuit d'aimantation et mode opératoire

Pour aimanter une pastille supraconductrice nous utilisons un circuit électrique (Fig.4) qui se compose principalement d'un transformateur variable 0-350 V, d'un redresseur AC/DC, de 10 condensateurs en parallèle (Capacité totale de 33 mF), d'un thyristor pouvant supporter un courant Imax de 8000 A, d'une diode D, d'une bobine (ou inducteur), d'appareils de mesure (oscilloscope, voltmètre, et ampèremètre).

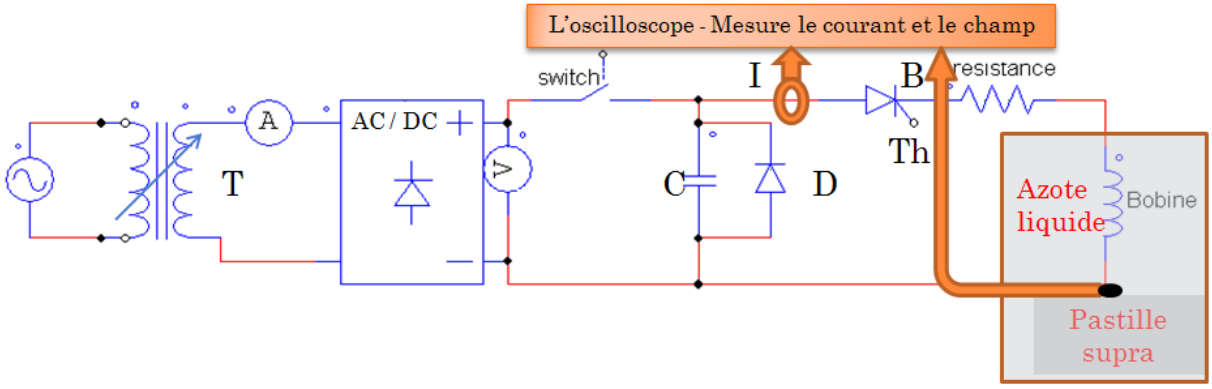


Figure 4 : Circuit permettant l'aimantation.

On définit le champ magnétique optimal comme le champ magnétique maximal appliqué à la pastille supraconductrice froide pour aimanter celle-ci avec un champ piégé maximal. On peut ainsi définir l'impulsion liée à ce champ comme l'impulsion optimale. Pour trouver l'impulsion optimale expérimentalement, nous avons choisi le mode opératoire suivant qui se compose de deux parties principales :

A) Charger le condensateur :

1- Fixer une valeur initiale de tension *Ut* à la sortie du transformateur variable.

2- Fermer de l'interrupteur ''Switch'' pour charger le condensateur avec une tension continue grâce au redresseur AC/DC.

Remarque : Le thyristor Th est toujours ouvert dans cette partie.

B) Décharger le condensateur dans l'inducteur :

3- Ouvrir l'interrupteur ''Switch'' après la charge des condensateurs C.

4- Fermer le thyristor Th en appliquant une impulsion à sa gâchette qui produit :

Une impulsion de courant passant dans le circuit électrique qui crée une impulsion du champ magnétique sur la pastille refroidie. Si ce champ est assez élevé pour pénétrer dans la pastille, il va piéger un champ magnétique dans la pastille. On mesure et sauvegarde le champ appliqué, le champ piégé, et le courant en utilisant l'oscilloscope.

5- Répéter les quatre étapes précédentes en augmentant la tension de transformateur *Ut*, jusqu'à arriver au champ magnétique optimal.

Remarque : Appliquer l'impulsion optimale 2-3 fois améliore un peu le champ maximum piégé.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

2.1.4 Mesure de la carte du champ magnétique piégé.

Après l'aimantation, et pour connaitre la distribution de champ magnétique piégé sur la surface de la pastille aimantée, nous mettons la pastille sur une table XYZ qui nous permet de prendre une matrice des valeurs de champ magnétique dans un plan parallèle X0Y à une distance △Z = 0,5 mm de la surface de la pastille. Nous avons choisi un pas de mesure △X = △Y = 2,22 mm. La figure 5 montre cette démarche. Malheureusement pour mesurer cette carte de champ magnétique il faut sortir la pastille supraconductrice de l'inducteur, puis la déplacer le plus rapidement possible sur la table XYZ pour mesurer la carte de champ. Ce déplacement se fait à l'air libre, à température ambiante donc l'aimantation de la pastille diminue légèrement lors de ce déplacement. Ceci est encore plus critique dans le cas du système à trois bobines car l'extraction de la pastille des trois bobines prend encore plus de temps que dans le cas de la bobine vortex.

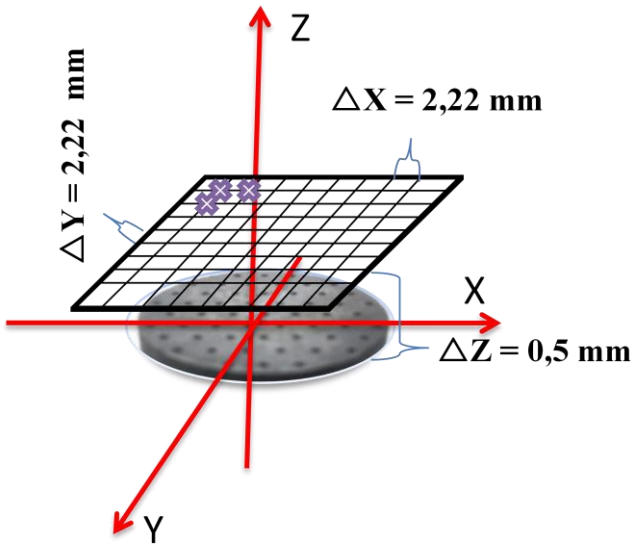


Figure 5 : Représentation de la mesure de la carte de champ.

2.2 Les différents procédés d'aimantation

Pour les deux procédés suivants nous allons utiliser le système de 3 bobines.

2.2.1 Procédé d'aimantation directe

Dans ce procédé (Fig. 6), on applique deux impulsions à un niveau initial de tension et on sauvegarde le champ maximal appliqué et le champ piégé 30 min après la fin de la deuxième impulsion. Puis on annule le champ piégé en chauffant la pastille. On répète cette démarche en augmentant la tension du condensateur (i.e. le champ appliqué) jusqu'à arriver au champ magnétique optimal. Autrement dit la pastille est vierge de tout champ magnétique à chaque fois qu'une aimantation est réalisée avec un champ plus élevé.

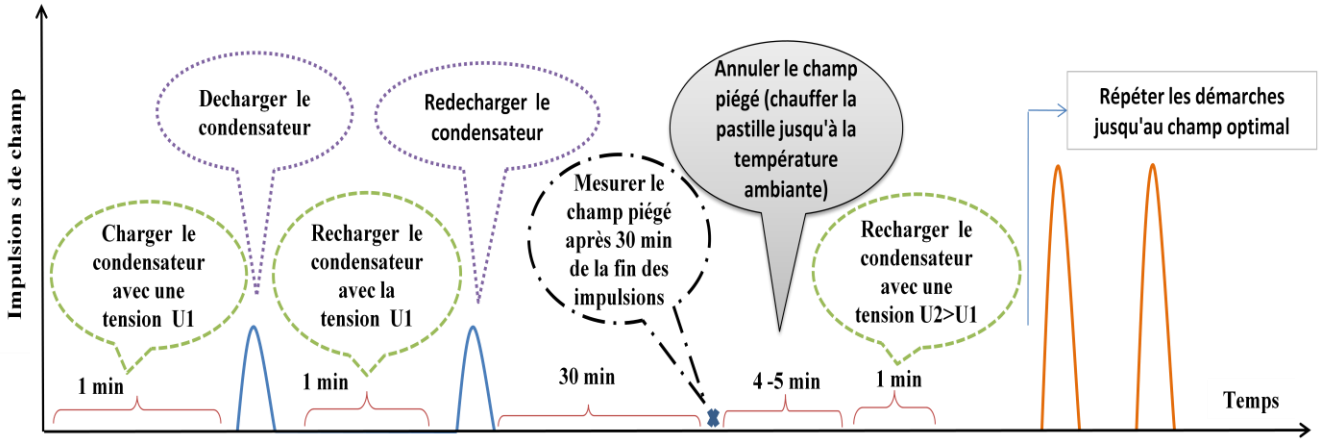


Figure 6 : Procédé d'aimantation directe.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

2.2.2 Procédé d'aimantation successive

Dans ce procédé (Fig. 7), nous appliquons aussi deux impulsions pour un niveau de tension choisi mais nous n'allons pas annuler le champ piégé entre deux niveaux différents de tension. C'est-à-dire que la pastille possède déjà une aimantation non nulle lorsqu'une nouvelle aimantation est réalisée (la pastille est maintenue dans l'azote liquide). Nous mesurons le champ piégé 1min après la fin de la deuxième impulsion sauf quand on arrive au champ optimal où l'on mesure le champ piégé après 30 min.

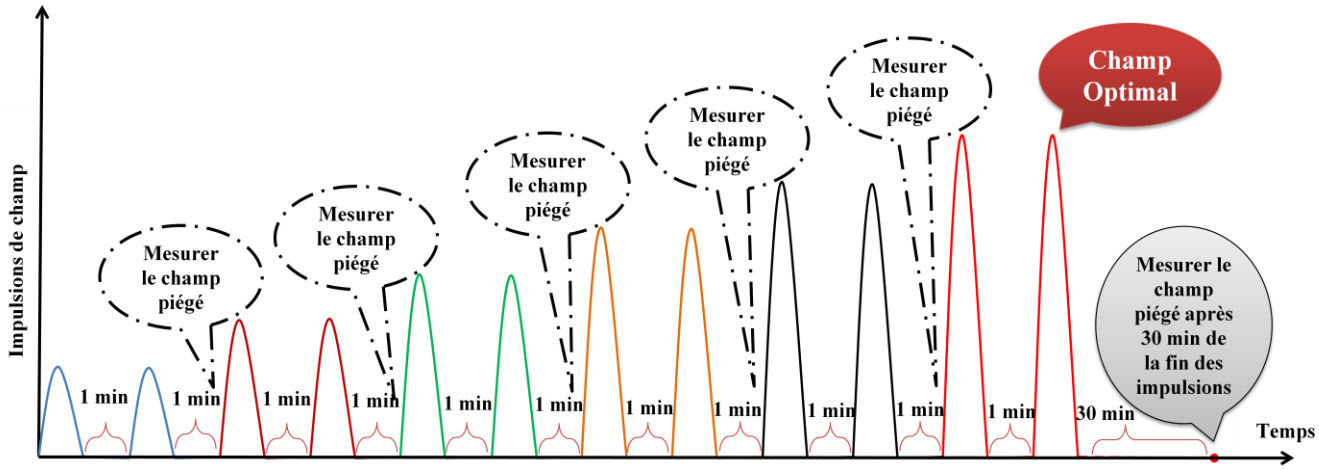


Figure 7 : Procédé d'aimantation successive.

Dans les deux procédés, on sauvegarde la valeur de champ maximum appliqué et le champ piégé dans la pastille.

3. Résultats et discussion

3.1 Etude du rôle de la forme de l'inducteur

Pour la bobine vortex, la troisième impulsion optimale de champ mesuré par la sonde à effet Hall et l'impulsion de courant dans le circuit d'aimantation sont représentées sur la figure 8. On y trouve les informations suivantes :

Courant max = 6000 A, durée de l'impulsion = 2,7 ms, champ optimal mesuré =1,24 T,

B_{Pmax} champ magnétique piégé dans la pastille à la fin de l'impulsion = 0,25 T.

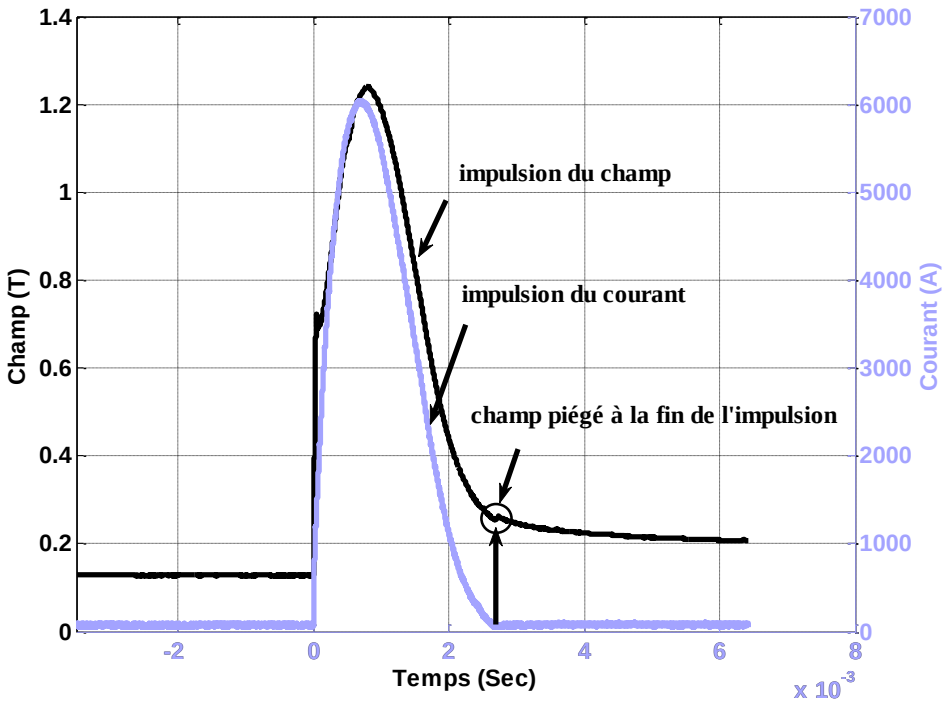


Figure 8 : Impulsion optimale du champ et son courant dans l'inducteur.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

La figure 9 représente la carte de champ mesurée après 30 minutes après le cycle d'aimantation, à l'aide de la table XYZ. On constate que la valeur maximale du champ piégé est égale à 0,2 Tesla. Ce champ est au milieu de la pastille. Nous trouvons aussi des valeurs négatives au bord de la pastille liées à la fermeture des lignes du champ.

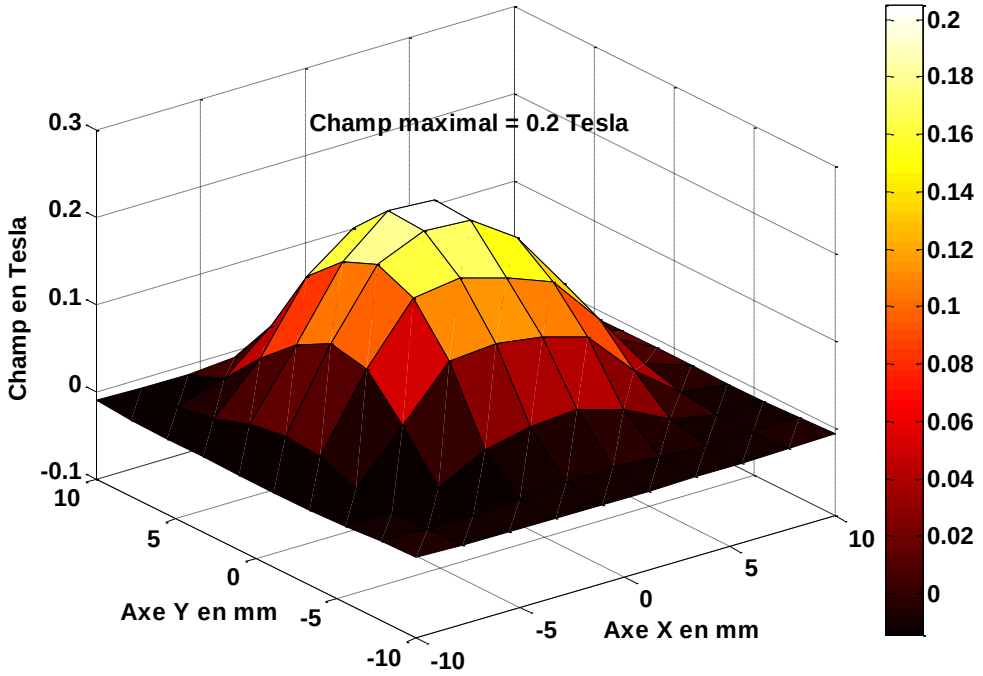


Figure 9 : Carte du champ 30 min après l'aimantation par la bobine vortex.

Pour le système de 3 bobines, la figure 10 nous montre la deuxième impulsion optimale de champ mesuré par la sonde à effet Hall et l'impulsion de courant dans le circuit d'aimantation, on trouve les informations suivantes :

Courant max = 1034 A, durée de l'impulsion = 20 ms, champ optimal mesuré =1,34 T,

B_{P1} champ magnétique piégé à la fin de l'impulsion = 0,7 Tesla,

B_{P2} champ magnétique piégé après 30 min = 0,45 Tesla.

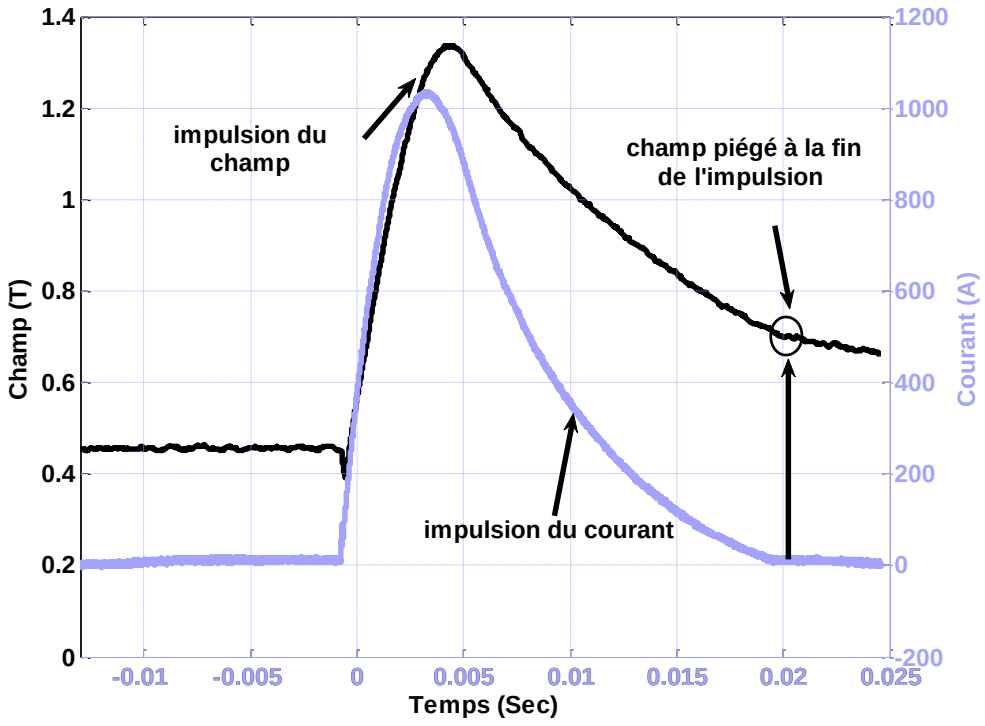


Figure 10 : Impulsion optimale du champ et son courant dans l'inducteur.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

Ce champ piégé est comparable à celui mesuré à la surface d'un aimant permanent, placé dans l'air, de type Néodyme-Fer-Bore, avec une induction rémanente de 1,2 T.

La figure 11 montre la carte de champ mesurée une heure après la fin du cycle d'aimantation (= 30 min dans l'inducteur + 30 min pour libérer la pastille et l'installer dans la table XYZ). On observe une valeur maximale du champ piégé de 0,36 T inférieure à la valeur mesurée de 0,45 T à cause des problèmes techniques liés à la mesure de la carte de champ exposés dans la partie 2.1.4.

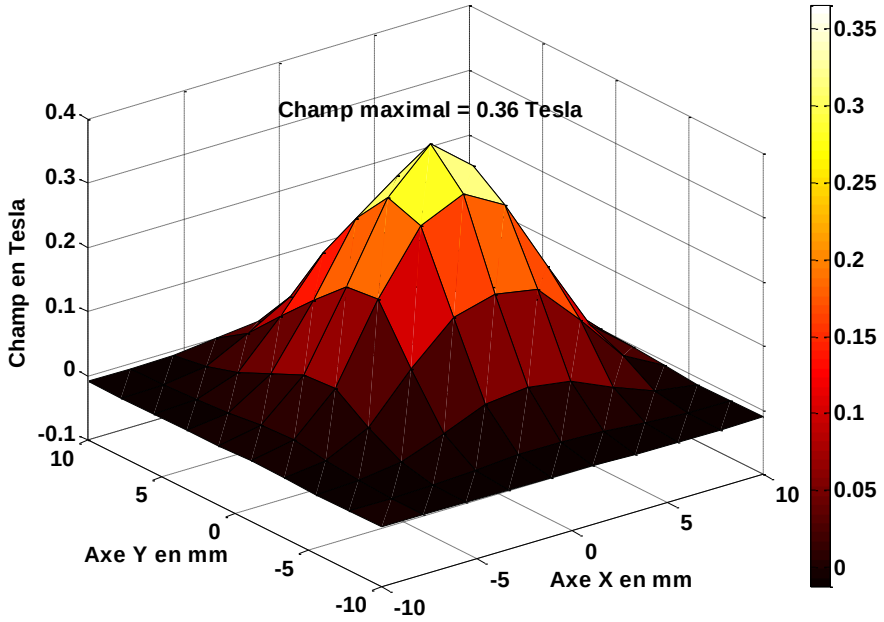


Figure 11 : Carte du champ après l'aimantation par le système de 3 bobines.

En comparant les deux champs piégés dans la pastille en utilisant les deux types d'inducteur, nous avons trouvé qu'il est plus intéressant d'utiliser le système de 3 bobines car le champ piégé est plus fort. Mais la mise en place et le montage de l'expérimentation avec ce système est plus difficile que celui de la simple bobine vortex.

3.2 Etude de différents procédés d'aimantation

La figure 12 montre l'évolution du champ piégé dans la pastille en fonction du champ maximal appliqué en utilisant le procédé d'aimantation direct. On trouve que le champ maximal piégé est de 0,47 T avec un champ optimal appliqué de 1,34 T et que pour des valeurs plus importantes de champ appliqué la pastille va saturer.

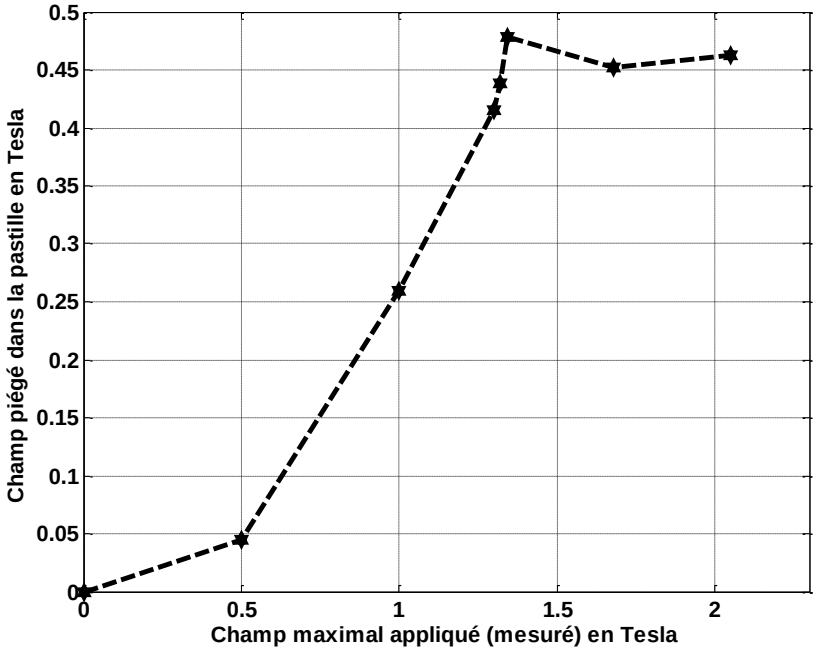


Figure 12 : Champ piégé en fonction du champ maximal appliqué.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

La figure 13 montre l'évolution du champ piégé dans la pastille en fonction du champ maximal appliqué en utilisant le procédé d'aimantation successive. Nous constatons que le champ maximal piégé est de 0,45 T avec un champ optimal appliqué de 1,34 T.

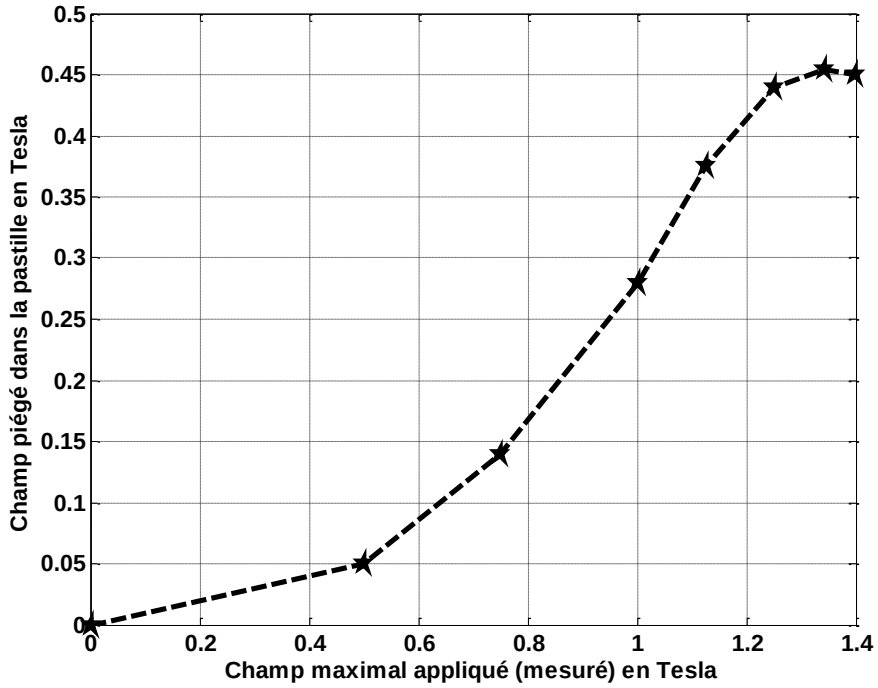


Figure 13 : Champ piégé en fonction du champ maximal appliqué.

En comparant les résultats des deux procédés d'aimantation, nous n'avons pas trouvé de différences significatives. Donc, nous proposons d'utiliser le procédé le plus simple. Si l'on connaît déjà le champ optimal pour la pastille, alors c'est le procédé d'aimantation directe qui doit être appliqué.

3.3 Evolution temporelle du champ piégé

Dans cette partie nous allons étudier l'évolution temporelle du champ magnétique piégé dans la pastille, c'est-à-dire la conservation de l'aimantation au cours du temps. Dans ce cas l'aimantation a été réalisée avec deux impulsions optimales directes et en utilisant le système de 3 bobines.

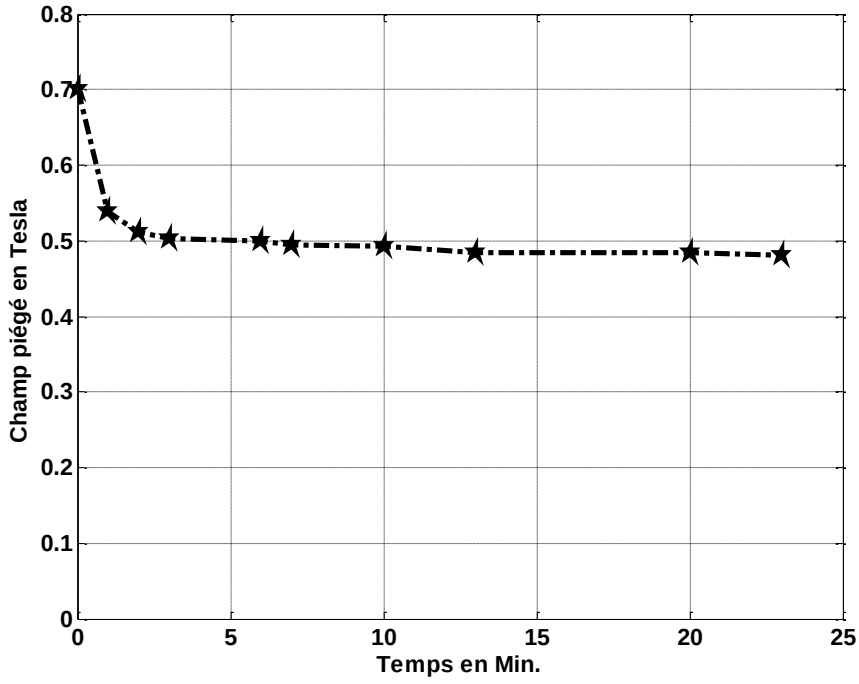


Figure 14 : Evolution temporelle du champ piégé.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

Sur la figure 14, nous constatons la descente du champ piégé avec le temps, puis une stabilisation du champ piégé après quelques minutes. Sans perturbations extérieures ce champ piégé peut rester stable pendant des années. C'est pourquoi nous conseillons de prendre les mesures des valeurs du champ piégé après quelques minutes (5-10) min. On peut apporter quelques éclaircissements concernant cette évolution du champ piégé :

1- Effets thermiques : La simulation montre que nous n'avons pas beaucoup d'effets thermiques, donc on peut négliger cet effet et proposer que la température reste constante à 77 K.
2- Effets électromagnétiques : La simulation montre qu'à la fin de l'impulsion optimale, le courant induit maximal ($\approx 2 * 10^8$ A/m^2) dépasse le courant critique ($J_c = 1 * 10^8$ A/m^2), Fig.15.

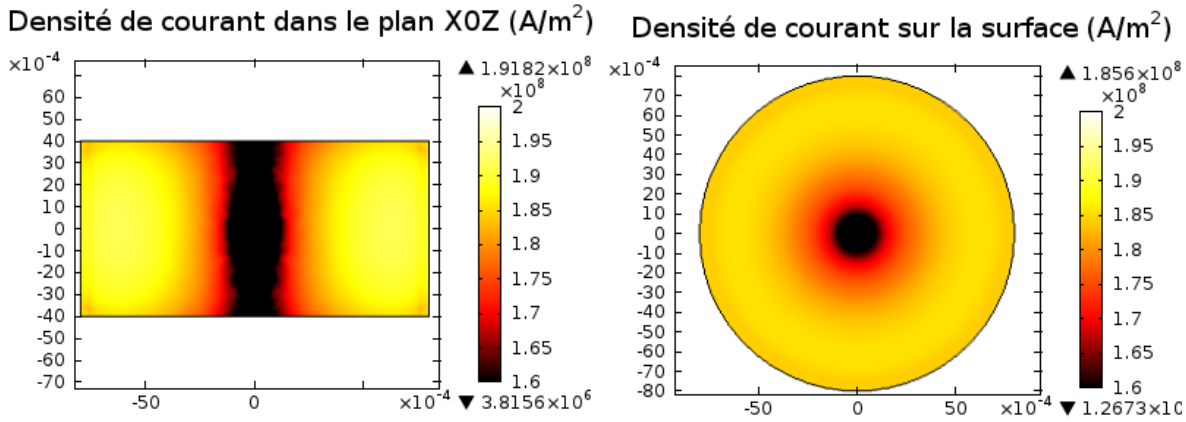


Figure 15 : Densité de courant dans la pastille à la fin de l'impulsion optimale de champ appliqué.

Si on regarde en parallèle la loi en puissance qui définit les matériaux supraconducteurs, Fig. 16 :

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

Où E, et J sont le champ électrique et la densité de courant respectivement. E_c, et J_c sont le champ électrique critique et la densité de courant critique respectivement.

Nous pouvons diviser théoriquement la courbe à deux zones : Zone 1 où il n'y pas des pertes, et Zone 2 où il y a des pertes. Dans notre cas, le courant dans la pastille est un courant induit donc les pertes importantes dans la Zone 2 vont diminuer le courant dans la pastille jusqu'à arriver à la Zone 1. Cette diminution de courant dans la pastille diminue le champ piégé.

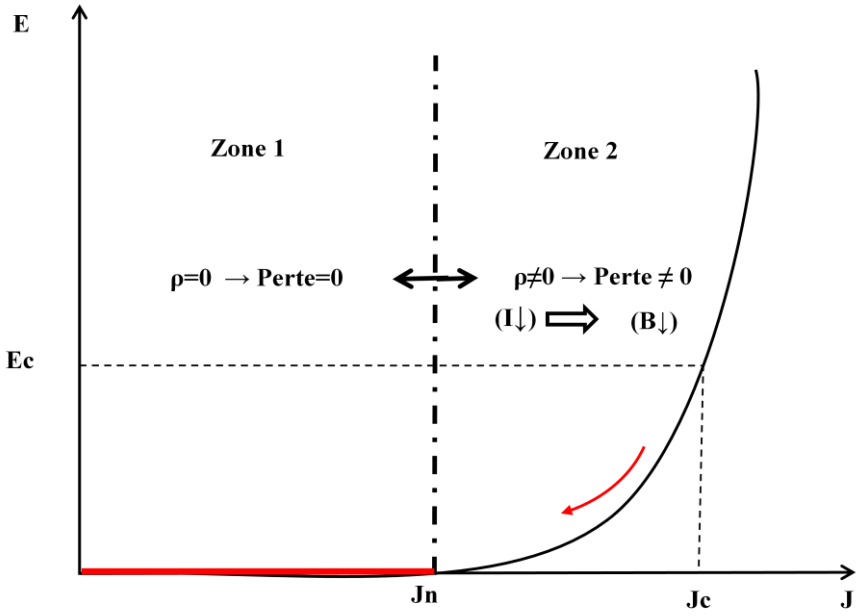


Figure 16 : Loi *E*(*J*) d'un supraconducteur permettant d'expliquer l'évolution temporelle du champ piégé dans une pastille.

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013

4. Conclusion

A travers nos résultats expérimentaux et les simulations effectuées, nous avons montré clairement les avantages apportés par le système formé de 3 bobines en série. Nous avons présenté également les résultats fournis par l'analyse des 2 procédés d'aimantation utilisés. Enfin, nous avons précisé le temps au bout duquel l'induction magnétique piégée n'évolue plus dans cette pastille YBCO. Ces travaux sur l'aimantation par PFM à l'azote liquide nous permettront de discuter des choix technologiques à envisager pour aimanter une (des) pastille(s) supraconductrice(s) dans une application de type moteur ou accouplement magnétique à des températures de fonctionnement plus basses.

Références

[1] M. Tomita, and M. Murakami, « High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K », *Nature*, Vol. 421 (6922), pp. 517-520, (2003).

[2] L. Chen, Y.S. Cha, H. Claus, H. Zheng, B. W. Veal, and F. Z. Peng, « Optimization of Pulsed-Current Profile for Magnetizing High Tc Bulk YBCO Superconductors », *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 34 (5), pp. 1702-1708, (2006).

[3] K. Berger « Etude des phénomènes couplés magnétothermiques dans les Supraconducteurs à Haute Température », *http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00348299*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, (2006).

hal-00827938, version 1 - 29 May 2013