



# **Etude d'une nouvelle structure d'inducteur de moteur supraconducteur**

Rada Alhasan

## **► To cite this version:**

Rada Alhasan. Etude d'une nouvelle structure d'inducteur de moteur supraconducteur. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. <hal-01083943>

**HAL Id: hal-01083943**

**<https://hal.science/hal-01083943v1>**

Submitted on 18 Nov 2014

**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.



HAL Authorization

# Etude d'une nouvelle structure d'inducteur de moteur supraconducteur

Rada ALHASAN

Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Université de Lorraine  
Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506 Vandoeuvre lès Nancy  
*rada.alhasan@univ-lorraine.fr*

**RESUME** – Dans cet article, nous présentons un nouveau type d'inducteur supraconducteur de machine synchrone. Cet inducteur est composé de deux bobines supraconductrices placées sur un même axe et alimentées par des courants ayant la même direction. Un écran supraconducteur est utilisé pour réaliser une variation du champ dans l'entrefer. Cet inducteur nous permet d'obtenir une machine électrique avec deux pôles ayant une valeur importante du champ magnétique dans l'entrefer.

**ABSTRACT** – In this paper we present a new kind of superconducting inductor for the synchronous machine. This inductor composed of a two superconducting coils have the same axis and fed by a currents which have the same direction. A superconducting bulk is used for achieving a variation in the flux density. This bulk is surrounded by a ferromagnetic material in order to improve the distribution of the radial induction. This studied inductor permit us to obtain machine electric with two poles having an important value of a magnetic field..

**MOTS-CLES** – Supraconducteur à haute température critique, moteurs supraconducteur, inducteur.

## 1. Introduction

L'amélioration des performances des machines électriques est un grand défi depuis plusieurs décennies. L'un des paramètres les plus importants pour améliorer les performances des machines est la génération d'un champ magnétique inducteur élevé. Les matériaux supraconducteurs sont très intéressants en raison de leur absence de pertes par effet Joule, en courant continu, et en raison des densités de courant très élevées. Pour ces raisons, ils ont pour avantages de permettre de construire des machines électriques plus légères avec un meilleur rendement que les moteurs classiques. Il est aussi possible de se servir des matériaux supraconducteur sous forme massive pour écranter le champ magnétique ou canaliser les lignes de flux [1, 2, 3, 5, 6, 7].

De nombreuses applications ont été proposées pour l'étude d'un inducteur supraconducteur, soit avec des fils supraconducteurs soit avec des matériaux supraconducteurs massifs. De nombreuses études expérimentales et théoriques ont montré l'aptitude des matériaux supraconducteurs (fils et/ou massif) à être utilisé comme inducteur pour les moteurs synchrones [4, 8].

Lorsqu'un matériau massif supraconducteur est refroidi dans un champ magnétique nul, il se comporte comme un écran magnétique. En effet, des courants induits peuvent se développer à l'intérieur du supraconducteur, et s'opposer ainsi à un champ magnétique externe selon la loi de Lenz. Ce comportement peut être utilisé pour canaliser le flux, l'écranter ou le mettre en forme [8, 9, 10, 11, 12]. Un exemple est donné figure 1.

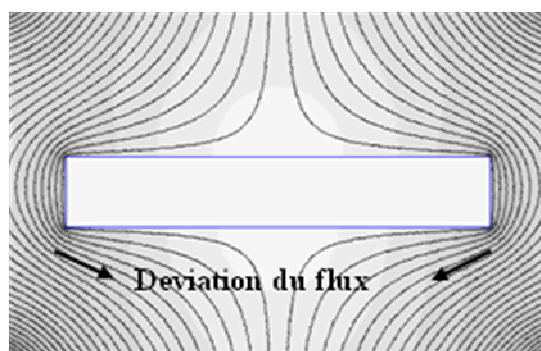


Figure 1 : Principe de l'écrantage magnétique

Dans ce travail, nous proposons une structure originale d'inducteur supraconducteur. L'inducteur utilise une topologie formée de deux bobines de champ supraconductrice et d'un supraconducteur massif qui joue le rôle d'écran magnétique conduisant à une densité de flux dans l'entrefer élevée.

Une analyse en trois dimensions, du champ magnétique, est faite (en utilisant un logiciel d'éléments finis 3D) pour étudier les performances de l'inducteur proposé. L'effet de la culasse du stator sur la répartition du champ magnétique est également étudié.

## 2. Structure du moteur

Après avoir présenté le principe de notre inducteur, nous décrirons les méthodes de calculs utilisées

### 2.1 Description de l'inducteur

La figure.2 montre la structure de l'inducteur proposé. Il est composé de deux bobines supraconductrices coaxiales. Les bobines sont alimentées par des courants électriques ayant la même direction qui génèrent un champ magnétique ( $B_1$ ,  $B_2$ ).

Un supraconducteur massif est placé entre les deux bobines. Le supraconducteur est incliné le long de la longueur de cet inducteur. Ce supraconducteur est utilisé comme une barrière magnétique et est situé entre les deux solénoïdes, créant ainsi un champ magnétique variable tel que mentionné dans la figure1.

Afin d'améliorer la distribution de l'induction radiale, on utilise aussi un matériau ferromagnétique entre les deux bobines. Le supraconducteur est inséré entre les pièces ferromagnétiques comme représenté sur la figure 2. Le fer guidera le champ magnétique vers le centre de l'inducteur et donc réduira le champ de fuite à proximité des bobines.

La structure d'inducteur proposée est en mesure de fournir une machine à deux pôles et peut être assimilée aux machines synchrones à griffes. Cette machine dispose d'un couple électromagnétique élevée en raison de l'augmentation de la densité de flux dans l'entrefer.

L'étude a été réalisée en ajoutant la culasse statorique pour montrer son influence sur le champ magnétique généré par cet inducteur (voir figure 8).

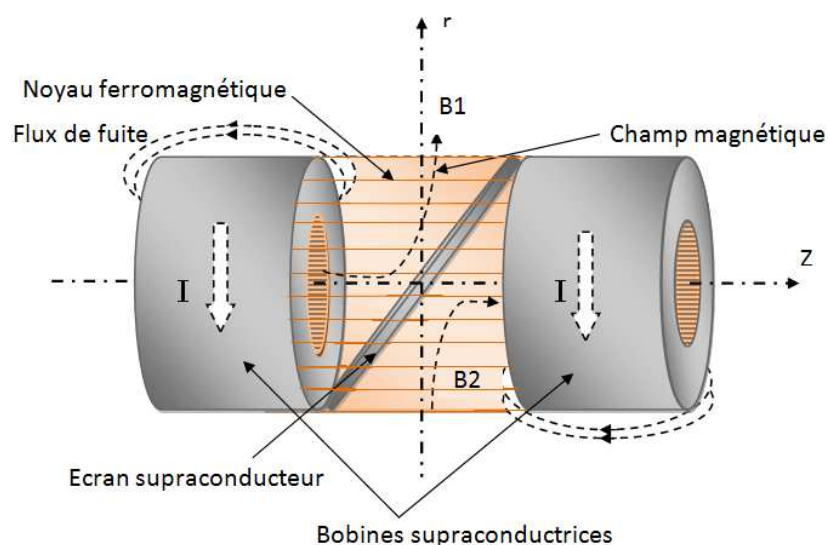


Figure 2 : Structure de l'inducteur

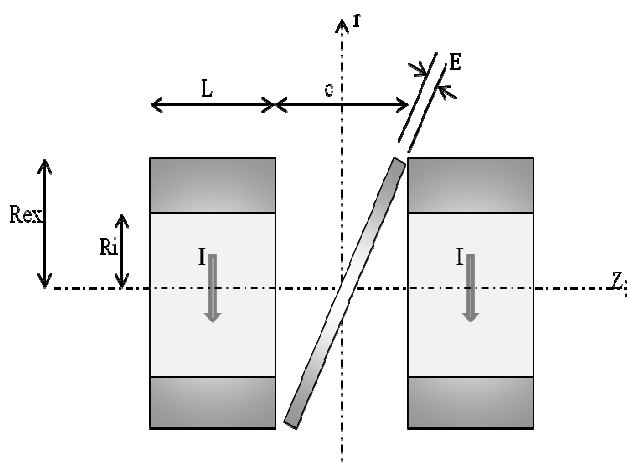
### 2.2 Analyse de la topologie proposée

La simulation est réalisée dans deux cas, le premier, lorsque la structure d'inducteur ne contient pas le fer entre les deux bobines autour de la plaque supraconductrice, le second lorsque du fer est ajouté en vue d'améliorer la distribution de l'induction radiale d'entrefer.

Les paramètres géométriques de la structure proposée sont donnés dans le tableau 1. Ces paramètres sont illustrés dans la figure 3, ils représentent une solution réaliste. C'est pourquoi la modélisation des bobines supraconductrices sera définie avec une densité de courant de  $100 \text{ A/mm}^2$ , ce qui est cohérent avec les fils supraconducteurs à haute température critique.

**Tableau 1. Paramètres géométriques**

|                                      |                        |      |
|--------------------------------------|------------------------|------|
| Rayon extérieur                      | R <sub>ext</sub> (m)   | 0,25 |
| Rayon intérieur                      | R <sub>i</sub> (m)     | 0,15 |
| Distance entre les solénoïde         | C (m)                  | 0,15 |
| Longueur du solénoïde                | L (m)                  | 0,15 |
| Epaisseur de l'écran supraconducteur | E (m)                  | 0,01 |
| Densité de courant                   | J (A/mm <sup>2</sup> ) | 100  |



**Figure 3 : Paramètres de l'inducteur**

Les calculs sont basés sur deux types de modèles: le premier est le modèle ampérien pour lequel nous utilisons directement la densité de courant. Les résultats sont obtenus en déterminant le potentiel vecteur **A**.

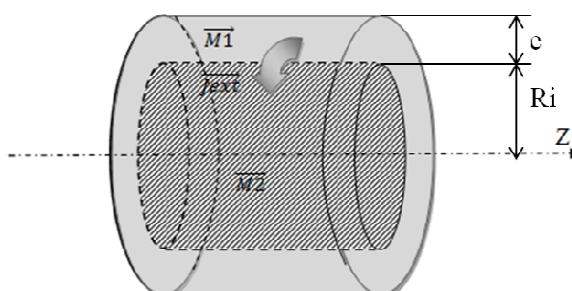
Le deuxième est le modèle coulombien, où le calcul sera effectué par la détermination du potentiel scalaire magnétique. Nous avons choisi le modèle coulombien, car la variable est un scalaire (une variable contre trois pour le potentiel vecteur), de sorte que le temps de résolution est plus rapide. Nous utilisons le logiciel COMSOL-multi-physique pour l'étude de notre inducteur.

La méthode coulombienne est une méthode sans courant, donc une charge magnétique doit être définie pour représenter les bobines. Pour chaque solénoïde, nous imposons l'aimantation équivalente **M**, figure.4, selon les équations suivantes :

$$\begin{aligned} M_1 &= j_{\text{ext}} (R_i + e - r) & \text{si} & (R_i < r < R_{\text{ext}}) \\ M_2 &= j_{\text{ext}} \cdot e & \text{si} & (0 < r < R_i) \end{aligned}$$

avec

- **M<sub>1</sub>** : est l'aimantation où le courant est non nul.
- **M<sub>2</sub>** : est l'aimantation où le courant est nul.
- **J<sub>ext</sub>** : densité de courant dans les bobines.
- **e** : épaisseur de la bobine.



**Figure 4 : Modélisation coulombienne d'un solénoïde**

Dans notre modèle, l'écran supraconducteur a été défini comme un matériau ayant une perméabilité relative très faible,  $\mu_r = 10^{-3}$ . Les bobines supraconductrices ont été dimensionnées en tenant compte de la loi de  $J_c(B)$  du fil supraconducteur.

### 3. Résultats

#### 3.1 Comparaison d'un inducteur avec et sans fer

Nous allons vérifier l'importance de l'ajout d'un matériau ferromagnétique hyper saturé entre les deux bobines supraconductrices autour de l'écran, en comparant les courbes de l'induction radiale de la structure avec et sans fer.

Les valeurs de la composante radiale de la densité de flux  $Br(Z)$  sont prises à 2 cm (pour tenir compte de la partie cryogénique) de l'inducteur le long de la distance  $C$  entre les deux bobines. Les points de calculs sont présentés sur la figure 5. La composante radiale  $Br(\theta)$  est calculée également à 2 cm de l'inducteur sur le diamètre d'alésage de l'induit de distance pour plusieurs valeurs de  $Z$  entre les deux bobines. Ces calculs sont présentés dans les figures 7 (a, b et c).

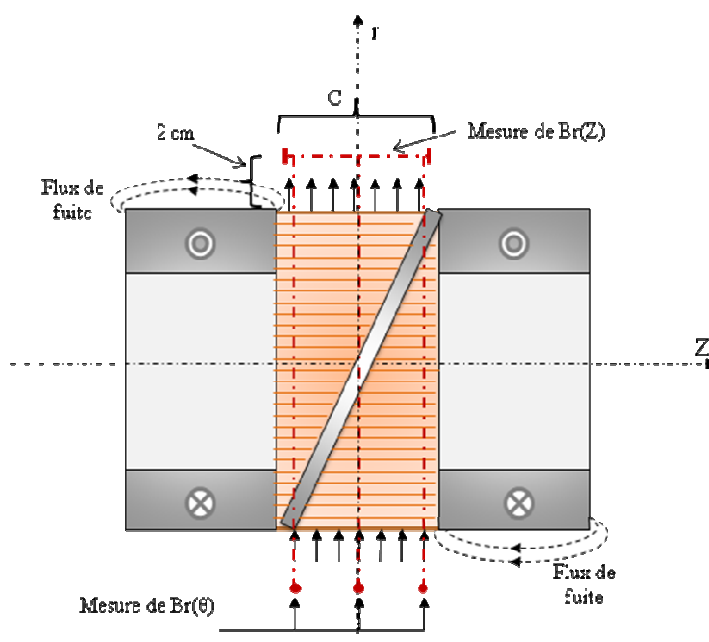


Figure 5 : Points de calcul de l'induction

La figure 6 représente l'évolution de  $Br$  le long de la direction  $Z$  pour la structure d'inducteur sans fer (ligne continue) et avec du fer (ligne avec des cercles). Nous atteignons avec du fer une valeur d'induction dans l'entrefer d'environ 1,9 T au maximum alors que nous n'atteignons que 1,7 T avec une structure sans fer.

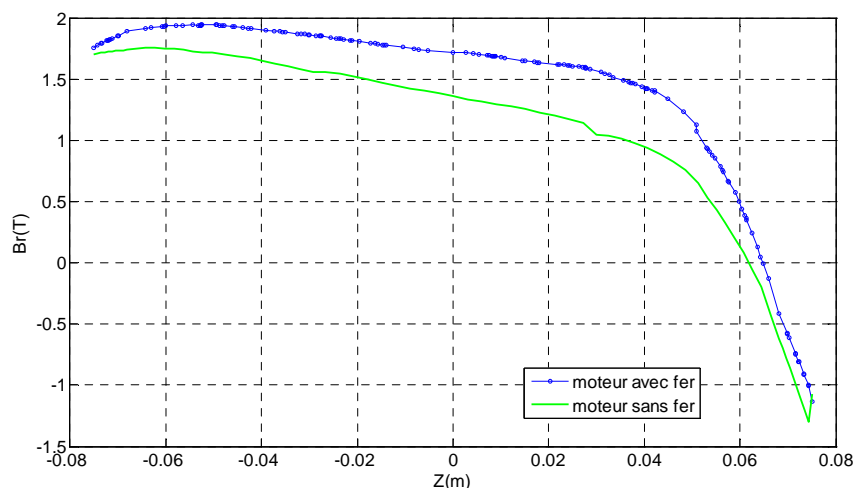
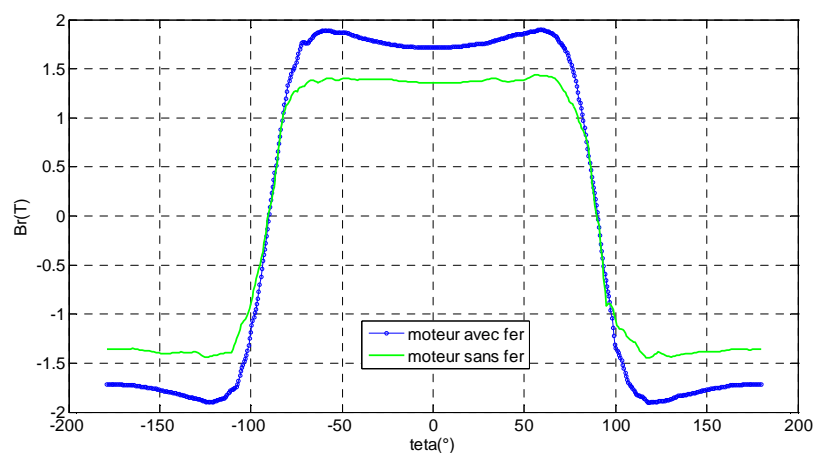
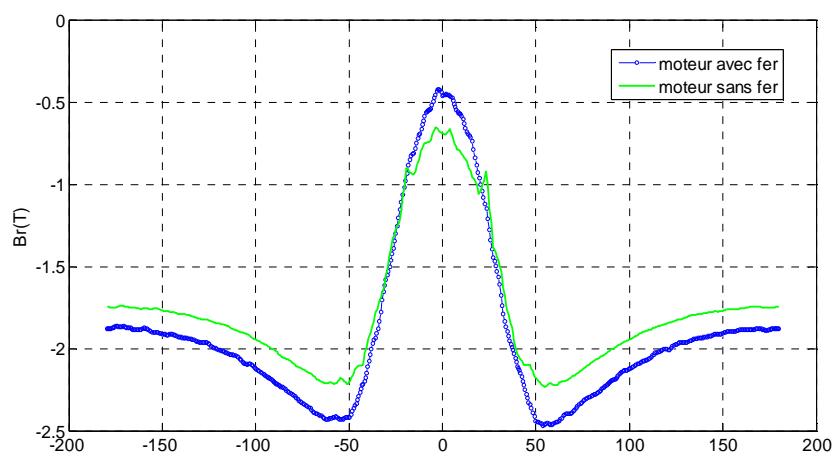


Figure 6 : Composante radiale du champ magnétique le long de l'axe z

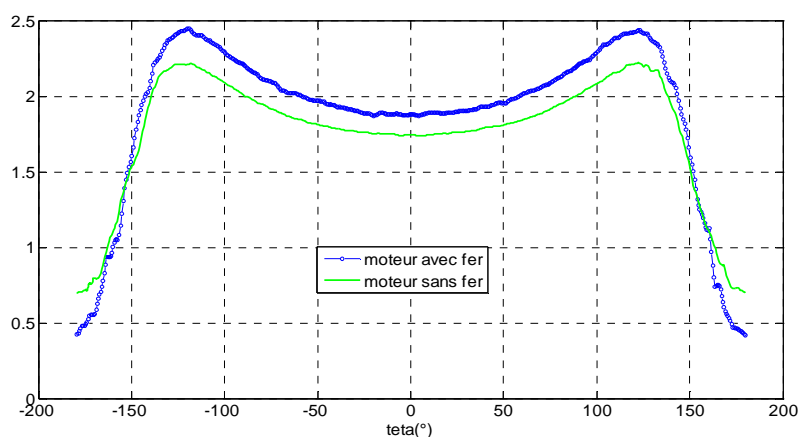
Comme le montre la figure 7a nous obtenons une induction variable dans l'entrefer (2 pôles). La différence avec une machine classique est la forte dépendance de la distribution de l'induction radiale dans l'entrefer le long de l'axe z comme le montre les figures 7b et 7c. Cette variation d'induction à  $Z = 0$  est comprise entre  $-B_{\max} = -1.9T$  et  $+B_{\max} = 1.9T$ , ceci est visible sur la figure 7a.



(a)



(b)



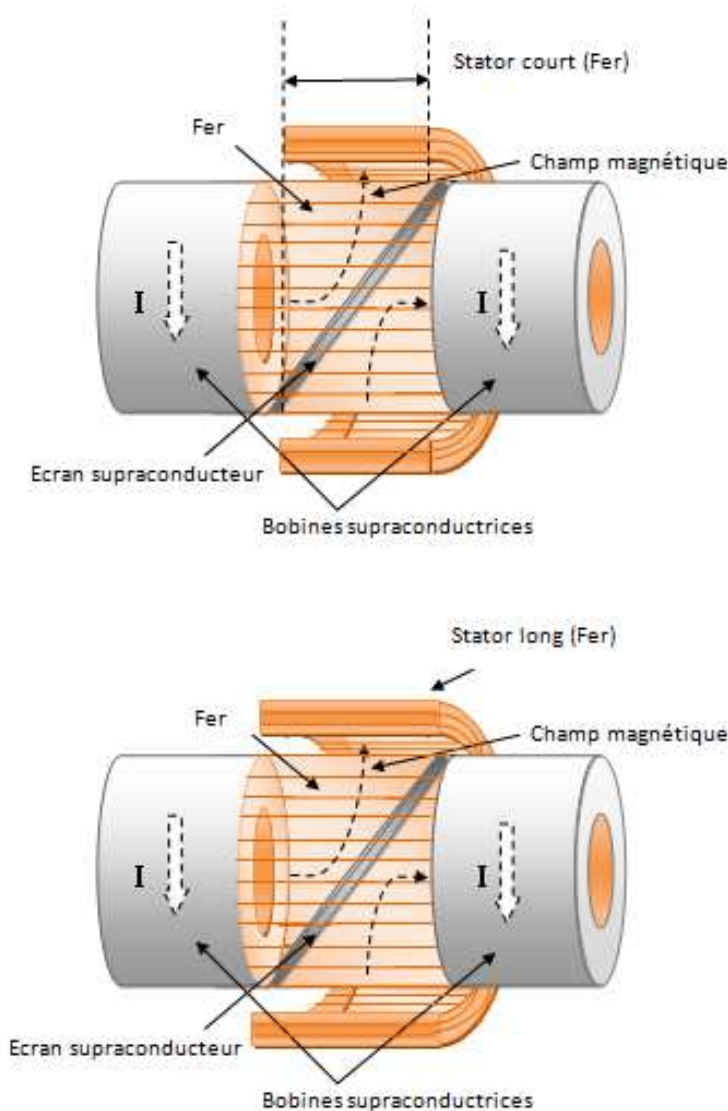
(c)

**Figure 7 : Composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm**

Selon les résultats, on conclut que, pour le même ensemble de paramètres et les mêmes conditions, la valeur moyenne de l'induction magnétique radiale de l'inducteur avec du fer est meilleure que celle de l'inducteur sans fer, et donc on adopte la structure de l'inducteur avec un matériau ferromagnétique dans l'étude suivante.

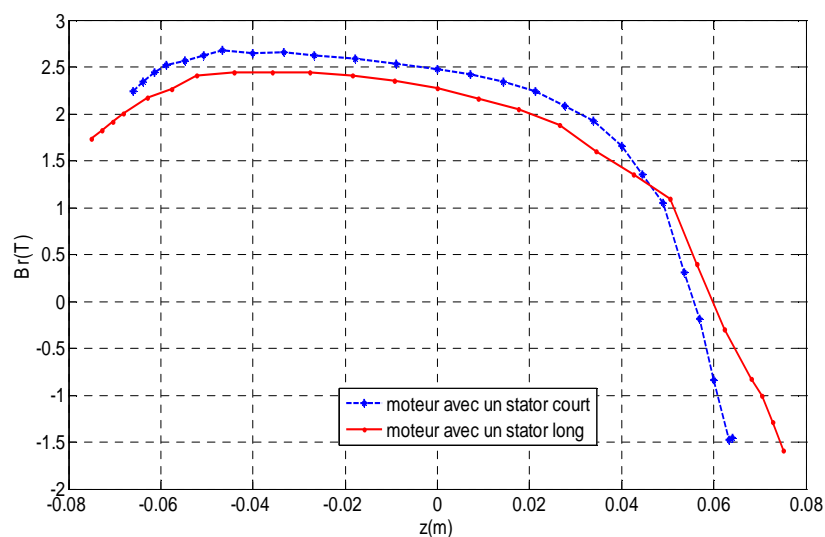
### 3.2 Effet de la culasse statorique sur le champ inducteur

Nous ajoutons la culasse du stator à l'inducteur comme on le voit sur la figure 8A. Comme il est montré dans la figure 6 la courbe de l'induction radiale ( $B_r$ ) de l'inducteur diminue à mesure que nous nous approchons du solénoïde et on remarque que l'induction devient négative pour  $Z > 6\text{cm}$ . Cette inversion du champ le long de la longueur axiale de la machine n'est pas favorable pour la force électromotrice de l'induit. Pour cela, il est proposé de réduire la longueur axiale à chaque extrémité du stator comme cela est présenté sur la figure 8B.



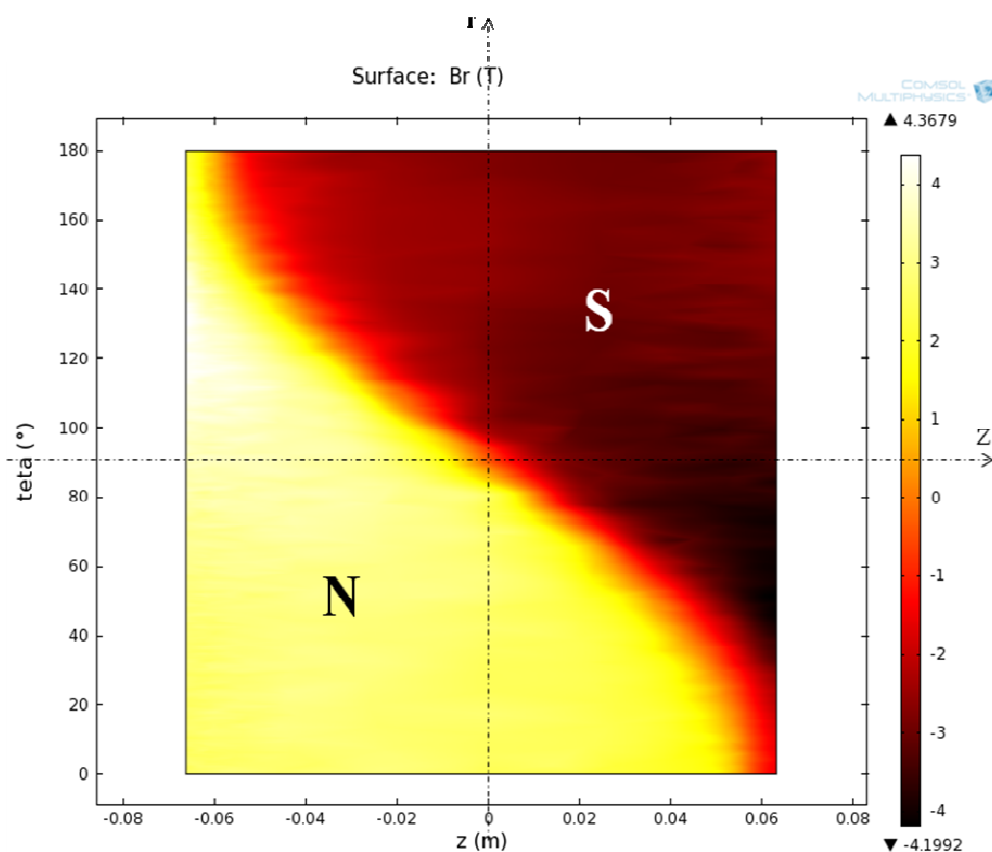
**Figure 8 : Structure du moteur avec la culasse statorique**

La simulation a été répétée pour déterminer quelle longueur de culasse statorique nous donne l'induction radiale maximale. Puis la structures réduite à été comparée à la structure initiale de référence ou l'induit occupe toute la longueur entre les deux solénoïdes. La figure 9 représente deux courbes de l'induction magnétique radiale  $B_r(Z)$ . Après avoir calculé la valeur moyenne de l'induction radiale utile, pour chaque configuration, on obtient une induction de 1,72 T dans la topologie A et 2,06 T pour B (figure 8).



**Figure 9 : Comparaison de l'induction radiale pour deux longueurs de la culasse statorique**

La figure 10 représente la répartition de la composante radiale du champ magnétique sur une surface dans le plan  $(0,z)$ , dans la zone utile de la machine en  $r = R_{\text{ext}} + 2\text{cm}$  dans la coupe  $(\theta, Z)$ .



**Figure 10 : Distribution du champ magnétique dans le plan  $(\theta, Z)$  à  $r = R_{\text{ext}} + 2\text{cm}$**

Cette distribution présente les deux pôles nord et sud obtenus à partir de l'inducteur étudié.



## 4. Conclusion

Un nouveau type de moteurs supraconducteur à griffes a été étudié. Il permet d'avoir une variation d'induction magnétique radiale de 4.12 T, cette valeur a été calculée par des simulations 3D pour deux bobines supraconductrices alimentés avec une densité de courant de 100 A/mm<sup>2</sup>. Cette structure très intéressante doit permettre d'avoir des moteurs très compacts. Il reste une optimisation à faire pour que la longueur de la partie active représente à minima les 2/3 de la longueur totale de la machine. Une expérimentation de ce type d'inducteur est actuellement en cours.

## Références

- [1] P. Tixador, F. Simon, H. Daffix, and M. Deleglise, "50-kW experimental superconducting permanent-magnet motor," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 1205–1208, June 1999.
- [2] D. Netter, J. Leveque, E. Ailam, B. Douine, A. Rezzoug, and Philippe J. Masson, Theoretical Study of a New Kind HTS Motor, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, NO. 2, JUNE 2005.
- [3] S. S. Kalsi, "Development status of superconducting rotating machines," presented at the IEEE PES Meeting New York, Jan. 27–31, 2002.
- [4] G. C. Han, K. Watanabe, S. Awaji, N. Kobayashi, and K. Kimura, "Magnetization and instabilities in melt-textured YBa Cu O at low temperature and high fields up to 23 T," Physica C, vol. 274, pp. 33–38, 1997.
- [5] P. Masson, J. Leveque, D. Netter, and A. Rezzoug, "Experimental study of a new kind of superconducting inductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 2239–2242, Jun. 2003.
- [6] Characteristic study and three dimensional magnetic field analysis of the superconducting synchronous machine. Young-Sik Jo, Taketsune Nakamura, Tsutomu Hoshino, Yoon-Do Chung, Jung-Pyo Hong, Young-Kil Kwon. Physica C 416 (2004) 108–114.
- [7] Eckels, P.W., S. Nitchler, G. 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor Design and Test Results. Naval Engineers Journal, Vol. 117, No. 4. (2005), pp. 31-36.
- [8] E. Ailam, D. Netter, J. Lévêque, B. Douine, Philippe J. Masson, Member, IEEE, and A. Rezzoug, Member, IEEE, Design and Testing of a Superconducting Rotating Machine, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 17, NO. 1, MARCH 2007.
- [9] R. Moulin, J. Lévêque, L. Durantay, B. Douine, D. Netter, and A. Rezzoug, Member, IEEE, Superconducting Multistack Inductor for Synchronous Motors Using the Diamagnetism Property of Bulk Material, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 1, JANUARY 2010.
- [10] P. J. Masson « Etude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs. Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale », Thèse de Doctorat, Université Henri POINCARÉ Nancy I, Nancy 2002.
- [11] T. Kiyoshi, S. Choi, S. Matsumoto, T. Asano, et D. Uglietti, « Magnetic Flux Concentrator Using Gd-Ba-Cu-O Bulk Superconductors », IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, p. 2174-2177, juin. 2009.
- [12] P. Tixador « Superconducting electrical motors », International Journal of Refrigeration 22 (1999) 150–157, CNRS-CRTBT/LEG, B.P. 166, 38 042 Grenoble Cedex 09, France.