

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel**



Thèse de doctorat en sciences
Présentée à la Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electrotechnique

Par

Hocine BOUCHEKHOU

Thème

**Etude d'une machine synchrone à base d'éléments
supraconducteurs**

Thèse soutenue publiquement le Lundi 16 Décembre 2019, devant le jury composé de :

Mr. Hicham ALLAG	Prof. U. Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel	Président
Mr. Mohamed Rachid MEKIDECHE	Prof. U. Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel	Rapporteur
Mr. Rabia MEHASNI	Prof. U. Constantine2, Constantine	Examineur
Mr. Ahmed CHERIET	Prof. U. Mohamed Khider, Biskra	Examineur
Mr. Ali REZIG	Prof. U. Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel	Examineur
Mr. Youcef BOUTORA	MCA U. Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou	Examineur

Avant-propos

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le professeur Mohamed Rachid MEKIDECHE de l'université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel pour avoir dirigé cette thèse. Je tiens particulièrement à le remercier pour la liberté d'action qu'il m'a donnée à chaque étape de cette passionnante « aventure » scientifique et aussi pour la confiance qu'il m'a accordée.

Ma gratitude va à Mr Jean LEVEQUE, professeur à l'Université de Lorraine, pour m'avoir accueilli dans le laboratoire GREEN, et pour ses explications, sa disponibilité et ses conseils.

Je tiens à remercier également Mrs Abderazek REZZOUG, Thierry LUBIN et Smail MAZANI, respectivement professeur émérite et Maitres de conférences (laboratoire GREEN), pour leur aide tout au long de mon stage par des discussions des plus enrichissantes et pour leur bienveillante amabilité.

Mes remerciements vont à chacun des membres du jury d'avoir accepté de juger cette thèse et de s'être déplacés pour assister à la soutenance de ce travail.

Mes remerciements et respects à Mr Hicham ALLAG, Professeur à l'université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette soutenance.

Que Mrs Ahmed CHERIET professeur à l'université Mohamed Khider de Biskra, Rabia MEHASNI professeur à l'université de Constantine, Youcef BOUTORA Maitre de conférence à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou , Ali REZIG professeur à l'université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel : Examineurs de cette thèse, trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux chercheurs, Ehsan Jamshidpour, Rada Elhasan, Bashar Gony et Bastien Dolisy, du laboratoire GREEN.

Un grand merci à ma famille, en particulier, mes parents aujourd'hui disparus ; paix à leur âme, à ma femme pour son soutien indéfectible, et à mes frères Abdelwahab, Abderazek et mes chères sœurs pour leur amour fraternel.

Pour finir je tiens à remercier l'ensemble de mon entourage, en particulier, mes collègues enseignants de l'université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel.

Que tous ceux qui, de près ou de loin ont apporté une contribution aussi minime soit-elle à ce travail, soient ici vivement remerciés.



Table des matières

Table des matières

Introduction Générale.....	1
<u>Chapitre I.....</u>	4
Table des matières du chapitre I.....	5
I. Introduction.....	6
I.1 Supraconductivité	6
I.2 Caractéristiques des supraconducteurs	9
I.2.1 Grandeurs critiques.....	9
I.2.2 Effet Meissner.....	10
I.2.3 Théorie BCS	12
I.3 Types des supraconducteurs	13
I.3.1 Type I.....	13
I.3.2 Type II	14
I.4 Températures critiques des supraconducteurs de type II.....	15
I.4.1 Supraconducteurs à basse température critique (SBTC).....	15
I.4.2 Supraconducteurs à haute température critique (SHTC).....	17
I.5 Fabrication du ruban en BSCCO (1G)	20
I.6 Mécanismes d'écrantage et de piégeage du champ dans les supraconducteurs.....	22
I.6.1 Piégeage du champ magnétique dans les SHTC	22
I.6.2 Mécanisme d'écrantage du champ magnétique.....	24
I.7 Modèles macroscopiques des supraconducteurs.....	26
I.7.1 Modèle de la loi en puissance.....	26

I.7.2	Modèle de Bean	27
I.7.3	Modèle de Kim	28
I.7.4	Modèle exponentiel	29
I.8	Applications des supraconducteurs à haute température critique.....	29
I.8.1	Réseaux électrique	29
I.8.2	Transport.....	33
I.8.3	Machines électriques	34
I.8.4	Stockage de l'énergie	35
I.8.5	Applications dans les laboratoires	36
I.9	Conclusion	38
Chapitre II	38
Table des matières du chapitre II	39
II.1	Introduction	41
II.2	Machines synchrones supraconductrices	41
II.2.1	Machines synchrones avec rotors supraconducteurs.....	41
a.	Machines synchrones à pôles saillants.....	42
b.	Machines synchrones à réluctance variable.....	44
II.2.2	Machines synchrones avec stators supraconducteurs.....	50
II.2.3	Machines synchrones entièrement supraconductrices.....	51
II.3	Machine supraconductrices de nouvelles topologies.....	52
II.4	Pertes AC dans les machines supraconductrices.....	54
II.5	Technologie des matériaux et de la cryogénie.....	55
II.6	Objectif de la thèse	56

II.7 Conclusion	57
<u>Chapitre III</u>	59
Table des matières du chapitre III	60
III.1 Introduction	61
III.2 Eléments de base de la conception du MSR_V	61
III.2.1 Type de matériau et bobinage du stator	62
III.2.2 Type de matériaux dans le rotor.....	62
III.2.1 Température de refroidissement	63
III.3 Principe de base de la pastille supraconductrice de rotor	64
III.4 Structure totale du Moteur supraconducteur	64
III.3 Dimensionnement du Moteur supraconducteur	66
III.3.1 Topologie de stator supraconducteur	67
a- Dimensionnement de la bobine supraconductrice	67
b- Topologie de rotor supraconducteur	68
III.5 Simulation du modèle de la machine	69
a- Modèle numérique du moteur supraconducteur	70
b- Résultats de simulations	71
c- Choix de l'entrefer de la machine.....	74
III.6 Approximation des pertes AC	75
III.7 Conclusion	77
<u>Chapitre IV</u>	79
Table des matières du chapitre IV	80

IV.1 Introduction	81
IV.2 Méthode de calcul par l'approche bidimensionnelle des conducteurs longs magnétiquement couplés	81
IV.2.1 Formulation du problème de base	82
IV. 2. 2 Calcul des paramètres électriques	84
a- Calcul des résistances de la bobine en cuivre et de la pastille SHTC	84
b- Calcul des inductances propres et mutuelles pour les éléments de la bobine et de la pastille supraconductrice	85
c- Calcul des composantes de la densité de flux et du champ magnétique	86
IV.2.3 Représentation matricielles des paramètres électriques	87
IV.3 Applications de la méthode	89
IV.3.1 Application pour des longs conducteurs seuls alimentés en tension	89
a- Calcul des paramètres électriques	89
b- Résolution en harmonique	92
IV.3.2 Application de la méthode pour le problème de base (bobine et pastille)	93
IV.3.3 Application de la méthode au MSR.V	95
IV.4 Conclusion	104
Conclusion Générale	106
Bibliographie	109

Introduction Générale

Introduction Générale

Avec la découverte de la supraconductivité et les nombreux progrès des systèmes cryogéniques, les chercheurs et les fabricants n'ont jamais cessé de vouloir utiliser les supraconducteurs dans des dispositifs de pointe afin de réaliser des tâches innovantes difficile à accomplir avec des matériaux ordinaires. Parmi les domaines d'exploitation des supraconducteurs, on peut citer l'Imagerie par Résonance Magnétique, la lévitation des trains ou de spécimens de laboratoires, les câbles de transport d'électricité, les actionneurs électriques et autres. Tout le bien-être que nous a apporté la supraconductivité, revient à Heike Kamerlingh Onnes qui a découvert en 1911 l'absence de toute résistivité électrique du mercure refroidi à l'hélium liquide ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 4.2K) lors de ses études sur la liquéfaction de l'hélium. Il nomme cette nouvelle situation que subit le matériau, l'état supraconducteur.

Après plusieurs investigation et recherches qui s'étalaient sur plusieurs années, on peut constater que du point de vue électrotechnique, le supraconducteur peut être utilisé pour piéger un champ magnétique à cause de la présence des vortex largement définis en microscopie. Il est par conséquent considéré, comme un dispositif d'écrantage du champ. Avec le même aspect, on peut fabriquer ce qu'on appelle des aimants supraconducteurs capables de délivrer des champs nettement supérieurs à ceux de tous les aimants permanents traditionnels. Un autre rôle que peut jouer un supraconducteur est le diamagnétisme parfait, pour lequel il repousse toute sorte de pénétration des champs magnétiques extérieurs. Cette caractéristique est connue par le nom de l'effet Meisner.

Dans le domaine qui nous intéresse tellement dans cette thèse, celui de la conversion électromécanique de l'énergie (moteur et générateur), les supraconducteurs conduisent à des gains significatifs en termes de puissance massique et volumique. Suite aux topologies conventionnelles, l'utilisation des supraconducteurs dans les machines électriques permet un véritable saut technologique. Les supraconducteurs utilisés sous forme de fil au niveau des machines électriques permettent d'augmenter l'amplitude de l'induction magnétique dans l'entrefer. Par ailleurs, le développement des supraconducteurs massifs, notamment grâce à la découverte des supraconducteurs à haute température critique (SHTC) en 1986, permet d'envisager de nouvelles perspectives et de nouvelles topologies de machines électriques avec des températures relativement élevées. Depuis plusieurs années, des laboratoires spécialisés s'intéressent toujours à l'intégration des matériaux (SHTC) dans les machines électriques tournantes. Leur but étant d'augmenter la compacité du moteur, c'est-à-dire, de diminuer le rapport poids-puissance. C'est dans ce contexte que ce travail de thèse ait été proposé.

De ce fait, notre travail porte sur l'étude d'une structure de moteur entièrement supraconductrice à réluctance variable, dont la partie fixe (inducteur) est dotée de bobines supraconductrices créant le champ magnétique du stator, et la partie tournante (l'induit) utilisant des pastilles supraconductrices (formes massives) comme écrans magnétiques pour but d'écranter les lignes de champ.

Dans cet optique, le premier chapitre mène progressivement le lecteur de la période de la découverte de la supraconductivité jusqu'aux recherches les plus récentes. Cela est réalisé, en détaillant les différentes applications des matériaux supraconducteurs dans le domaine d'électrotechnique selon leurs formes (massives ou filaires), leurs propriétés, les différents types ainsi que les modèles mathématiques proposés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les machines synchrones supraconductrices notamment les machines à réluctances variables. Il y est mentionné en détail, les différentes topologies existantes selon l'emplacement et le rôle de chaque élément supraconducteur utilisé. Cette partie est consolidée par une présentation des techniques technologiques englobant toutes les étapes de construction et de refroidissement.

Au troisième chapitre, nous proposons et étudions notre propre topologie de moteur supraconducteur à réluctance variable (MSRV). Pour ce faire, nous élaborons le dimensionnement du prototype en commençant par l'inducteur puis l'induit sans oublier le choix des éléments supraconducteurs en respectant ce qui existent dans le marché industriel. Dans ce même chapitre, une critique sévère est réalisée à l'issu des choix abordés et des résultats obtenus.

L'étude d'une pastille SHTC soumise à un champ magnétique variable issu d'une bobine de cuivre de taille relativement importante, fera l'objet de la première partie du quatrième chapitre. Dans cette partie précise, nous adoptons une méthode semi-analytique décrivant les interactions propres et mutuelles entre conducteurs ordinaires et supraconducteurs. Tandis que dans la deuxième partie nous traitons l'interaction entre bobines supraconductrices et supraconducteurs massifs. Le but de cette approche est d'étudier avec précision les pénétrations des courants dans la pastille supraconductrice afin de concevoir les limites du MSRV.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

La Supraconductivité et Ses Applications

Table des matières du chapitre I

I. Introduction	6
I.1 Supraconductivité	6
I.2 Caractéristiques des supraconducteurs	9
I.2.1 Grandeurs critiques.....	9
I.2.2 Effet Meissner.....	10
I.2.3 Théorie BCS	12
I.3 Types des supraconducteurs	13
I.3.1 Type I.....	13
I.3.2 Type II	14
I.4 Températures critiques des supraconducteurs de type II	15
I.4.1 Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)	15
I.4.2 Supraconducteurs à haute température critique (SHTC).....	17
I.5 Fabrication du ruban en BSCCO (1G)	20
I.6 Mécanismes d'écrantage et de piégeage du champ dans les supraconducteurs	22
I.6.1 Piégeage du champ magnétique dans les SHTC	22
I.6.2 Mécanisme d'écrantage du champ magnétique.....	24
I.7 Modèles macroscopiques des supraconducteurs	26
I.7.1 Modèle de la loi en puissance.....	26
I.7.2 Modèle de Bean	27
I.7.3 Modèle de Kim	28
I.7.4 Modèle exponentiel	29
I.8 Applications des supraconducteurs à haute température critique	29
I.8.1 Réseaux électrique.....	29
I.8.2 Transport.....	33
I.8.3 Machines électriques	34
I.8.4 Stockage de l'énergie	35
I.8.5 Applications dans les laboratoires	36
I.9 Conclusion	38

I. Introduction

Un Matériau suffisamment refroidi perd sa résistivité et devient un conducteur magique..., c'est un nouvel état de la matière qui a été découvert par les physiciens. Cette observation historique est connue sous le nom de la supraconductivité.

Ce chapitre bibliographique est centré sur le phénomène de la supraconductivité et ses applications aux différentes disciplines ; particulièrement dans le domaine de l'électrotechnique.

Au début du chapitre, on présente une brève histoire sur la découverte de la supraconductivité et ses développements au cours des années. De plus, un fondement sur les caractéristiques des matériaux supraconducteurs et leurs comportement vis -à-vis le champ magnétique, la densité de courant et la température de refroidissement, est mise en revue. Une classification des matériaux supraconducteurs selon la température critique, la forme ainsi que le processus de fabrication est nécessaire aussi pour faire une bonne représentation du phénomène de la supraconductivité.

Ensuite, on détaille les deux caractéristiques spécifiques de piégeage et d'écrantage des supraconducteurs ainsi que les modèles macroscopiques décrivant le comportement de ses matériaux.

A la fin, on termine notre chapitre par une large présentation sur l'utilisation des matériaux supraconducteurs, particulièrement à haute température critique, dans plusieurs domaines tels que les câbles de transport d'électricité, les transformateurs, les trains à lévitation magnétique et autres disciplines.

I.1 Supraconductivité

Le fil de cuivre est le plus souvent utilisé dans les fils conducteurs domestiques car la résistance du cuivre est très faible. Cependant, le cuivre a même une résistance électrique considérable surtout pour le cas d'un long fil. Une résistance électrique absolument nulle est le phénomène surprenant (bizarre) qui a été observé dans certains matériaux, par le physicien néerlandais **Heike Kamerlingh Onnes** en 1911 à l'université de *Leiden*, lorsqu'il refroidit le mercure au-dessous d'une température critique caractéristique. Ce phénomène de la mécanique quantique est appelé *supraconductivité*.

Une représentation de la variation de la résistance en fonction de la température d'un matériau conventionnel (cuivre) et d'un supraconducteur est illustrée à la figure I.1.

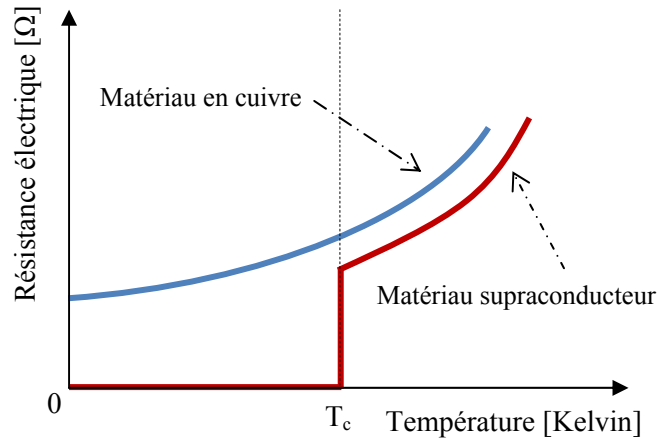


Figure I.1 : Résistance du cuivre et d’un supraconducteur en fonction de la température.

A très basse température (4.2 Kelvin), le mercure présente une faible valeur de résistance d’environ $10^{-5} \Omega$ (Fig. I.2). Il permet de conduire le courant électrique sans résistance à condition que sa température soit inférieure à une certaine valeur appelée **température critique** (T_c). Suite à cette découverte, *Kamerlingh Onnes* reçut le prix Nobel de physique en 1913.

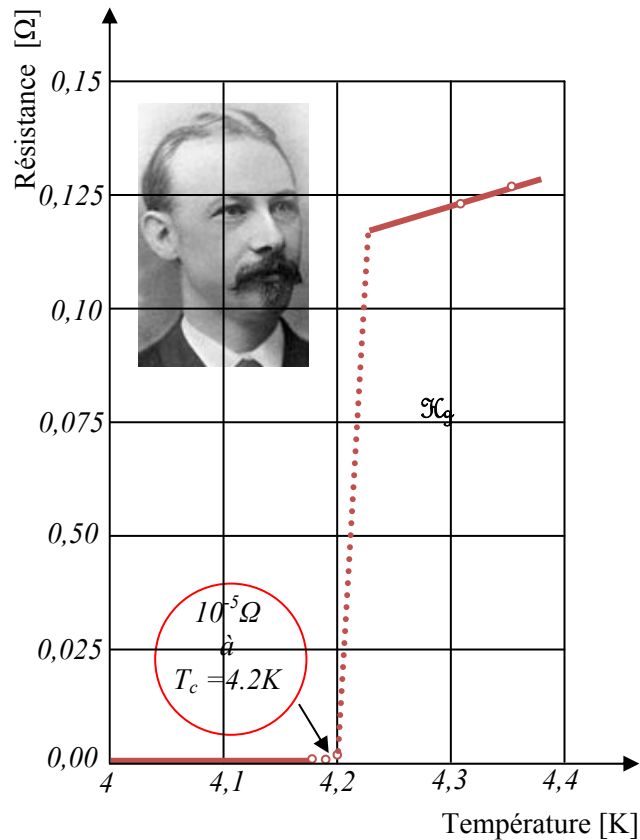


Figure I.2: Courbe de résistance d’un échantillon de mercure en fonction de la température.

En 1987, la supraconductivité a connue un grand saut lors de la découverte de la supraconduction dans les céramiques (cuprates). Un matériau à température critique de 35K a été réalisé par les deux physiciens **Bednorz** (allemand) et **Müller** (suisse). Grace à cette découverte, ils ont reçu le prix Nobel de physique. Ces nouveaux matériaux sont appelés « **supraconducteurs à haute température critique** (SHTC) ».

Depuis, les recherches sur les matériaux céramiques n'ont pas cessées et des matériaux tels que le **BSCCO** ou l'**YBCO**, de températures critiques pouvant approcher les 115 K, permettent d'envisager des applications à l'azote liquide (77 K).

En 2001, un nouveau supraconducteur attira l'attention, c'est le diborure de magnésium (**MgB₂**). Ce supraconducteur situé à mi-chemin des supraconducteurs à basses et hautes températures critiques a l'avantage de proposer un fil facilement réalisable, grâce à sa structure et son processus de fabrication *PIT* (Powder In Tube) [Glow01]. Il permet d'envisager des applications à des températures d'environ 20K, où il présente des caractéristiques intéressantes (matériel médical, moteur électrique, transformateur...) [Tom07].

En 2003, un prix Nobel a été délivré à **Ginzburg** et **Abrikosov** grâce à leurs travaux de caractérisation macroscopique des supraconducteurs à l'aide de l'équation de *Schrödinger*. L'évolution de la température critique des matériaux supraconducteurs en fonction du temps est représentée à la figure I.3.

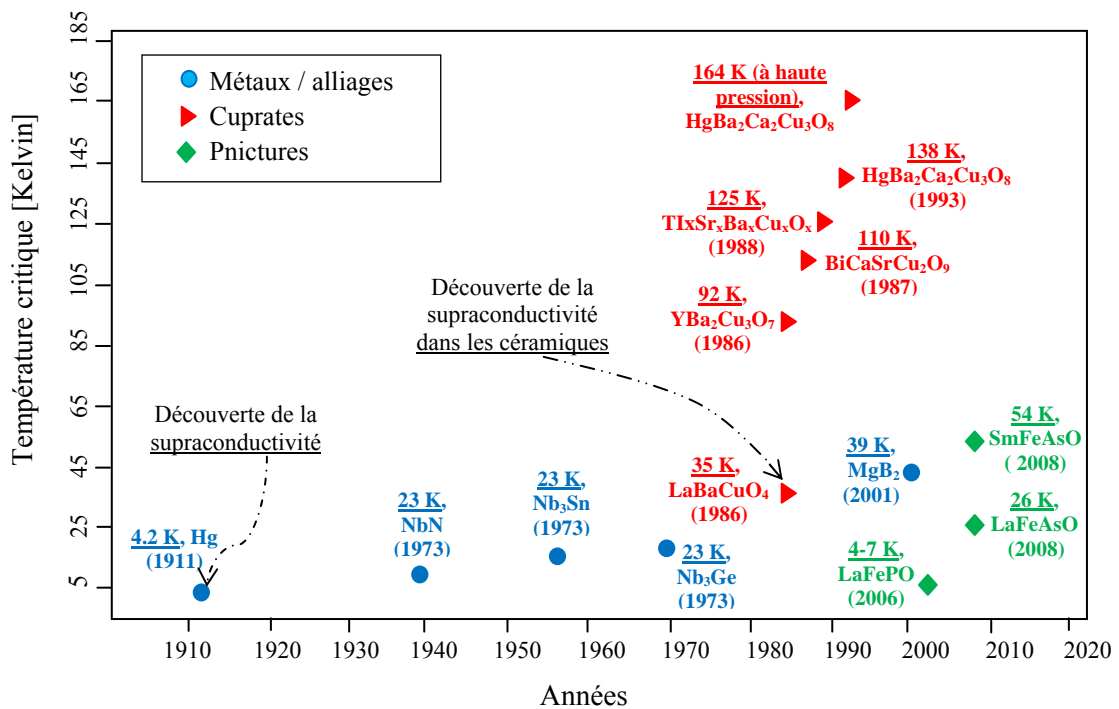


Figure I.3 : Evolution de la température critique des supraconducteurs au cours des années.

I.2 Caractéristiques des supraconducteurs

I.2.1 Grandeurs critiques

Les supraconducteurs conservent leurs caractéristiques supraconductrices lorsqu'ils fonctionnent sous un régime lié à trois matières interdépendantes: densité de courant, température de fonctionnement et champ magnétique, comme illustré à la figure 1.5. On peut définir ces trois grandeurs comme suit :

- ◆ **Température critique (T_c)** : c'est la valeur la plus élevée de la température à laquelle un matériau ne possède pas de résistivité électrique. Cette température diffère d'un matériau supraconducteur à autre et elle dépend des deux autres grandeurs (densité de courant et champ magnétique appliqué).
- ◆ **Densité de courant critique (J_c)** : c'est la limite supérieure de la capacité de matériau de transport de courant. La valeur de la densité critique de courant J_c est déterminée expérimentalement à partir de la courbe $E(J)$ en imposant une valeur arbitraire du champ électrique critique $E_c = 1\mu V/cm$, figure I.4.

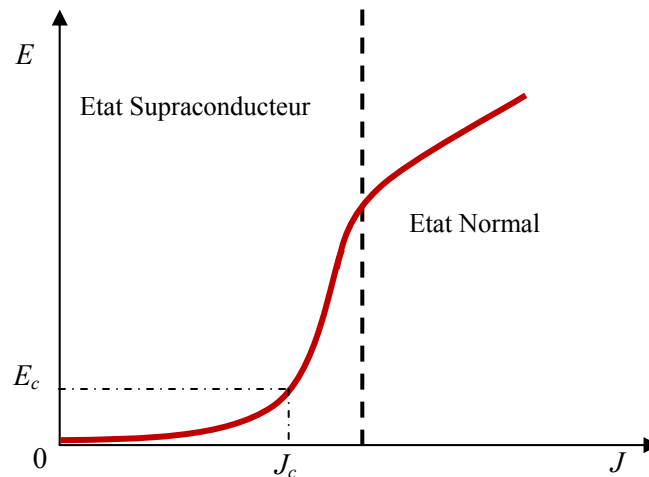


Figure I.4 : Courbe de la caractéristique électrique $E(J)$ d'un SHTC .

- ◆ **Champ magnétique critique (H_c)** : c'est celui au-dessus duquel le matériau cesse d'être un supraconducteur. La valeur de champ magnétique critique varie d'un matériau supraconducteur à autre.

Le matériau supraconducteur conserve ses propriétés lorsqu'il fonctionne au dessous de ces limites (température critique (T_c), champ magnétique critique (H_c) et densité de courant critique (J_c)). Il revient à son état normal (non supraconducteur) si l'une de ces limites est dépassée, figure I.5.

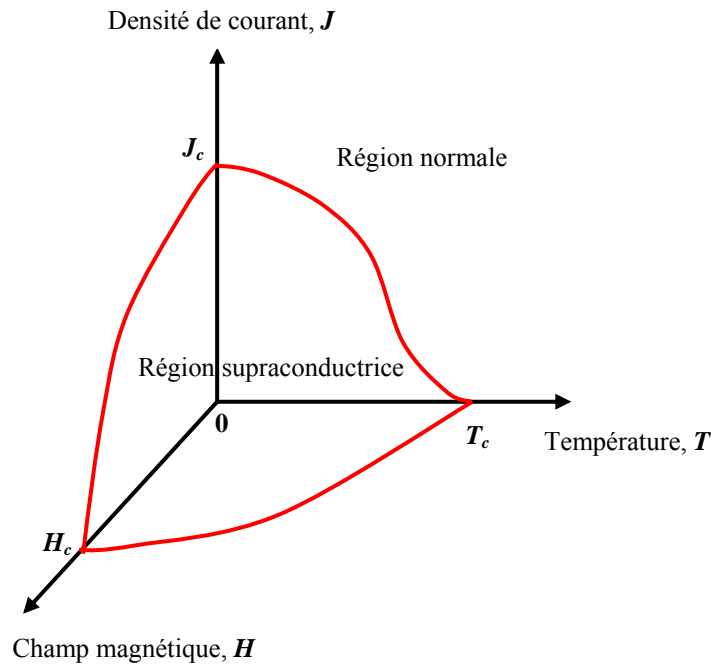


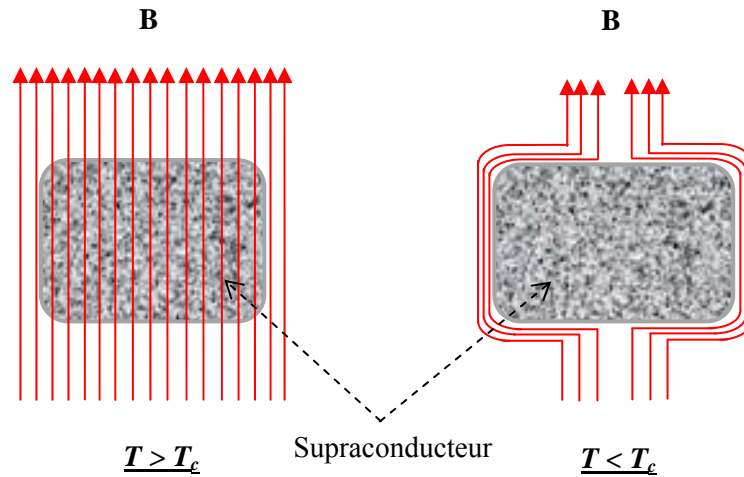
Figure I.5 : Grandeurs limitant la surface supraconductrice.

I.2.2 Effet Meissner

A température inférieure à la température critique, certains matériaux supraconducteurs possèdent la propriété de conduire le courant électrique sans résistance. De plus, ils repoussent les lignes de champ magnétique de l'intérieur des supraconducteurs (*Effet Meissner*). Cette dernière propriété a été découverte par les deux chercheurs allemands *Walter Meissner* et *Robert Ochsenfeld* en 1933.

Selon eux, un supraconducteur présente une propriété diamagnétique parfaite (la susceptibilité est de -1), c'est-à-dire qu'il n'y a pas de champ magnétique à l'intérieur du matériau supraconducteur. Cette propriété reste valable lorsque le champ appliqué est faible, c'est-à-dire inférieur au champ magnétique critique (H_c) et qu'il est refroidi au-dessous de sa température critique (T_c) [Tink04]. Cela est dû à la mise en place de courants électriques près de sa surface. Le champ magnétique créé par ces courants de surface annule le champ magnétique appliqué à la masse du supraconducteur.

Sur la figure I.6, le matériau supraconducteur se comporte de deux manières différentes suivant la valeur de la température T . Dans le cas où $T > T_c$, le matériau trouve son état normal et il est complètement traversé par les lignes de champ B . Si $T < T_c$, le matériau garde sa propriété supraconductrice et empêche toute pénétration de lignes de champ magnétique (effet meissner), notons bien que le B appliqué est inférieur au champ critique.



B : champ magnétique appliqué inférieur au champ critique.
 T : température de fonctionnement
 T_c : température critique

Figure I.6: Diamagnétique parfaite de la propriété supraconductrice (effet Meissner).

Si un conducteur supraconducteur est placé au-dessous d'un aimant en mouvement, un courant est induit dans le conducteur ce qui provoque la création d'un champ magnétique égal et opposé au champ magnétique de l'aimant obligeant ce dernier de se repousser. En revanche, on peut ainsi faire léviter un aimant au dessus d'un matériau supraconducteur refroidi à une température inférieure à sa température critique (T_c), figure I.7.

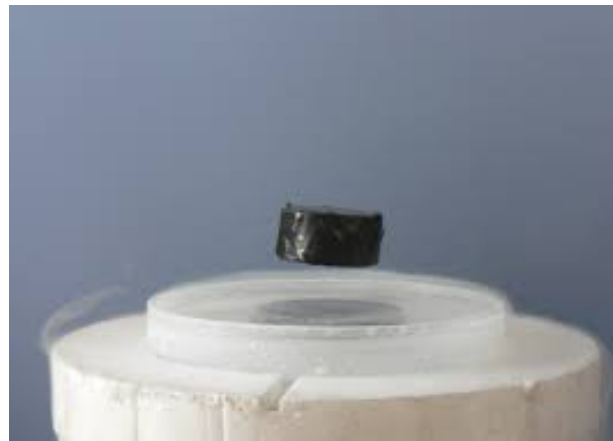


Figure I.7: Aimant lévitant au dessus d'un matériau supraconducteur.
 « Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Supraconductivité> »

Après la découverte de *Meissner* et *Ochsenfeld* (Environ 53 ans), la supraconductivité n'à connue que des applications en très basse température critique à l'aide d'un refroidissement à base de l'hélium liquide (environ 4.13 k).

I.2.3 Théorie BCS

Un courant électrique traversant un supraconducteur ne provoque aucun échauffement dans le matériau (résistance nulle), de plus ce courant ne perdra pas d'énergie grâce à l'organisation des atomes dans le matériau. Cette caractéristique a été expliquée par la théorie BCS qui fut proposée en 1957 par *John Bardeen*, *Leon Neil Cooper*, et *John Robert Schrieffer*. La théorie BCS est la plus populaire expliquant la supraconductivité dans les métaux, qui stipule qu'à basse température les électrons traversent les supraconducteurs deux à deux (s'associent par paire) et évitent ainsi la plupart des collisions dans les conducteurs qui génèrent une chaleur indésirable.

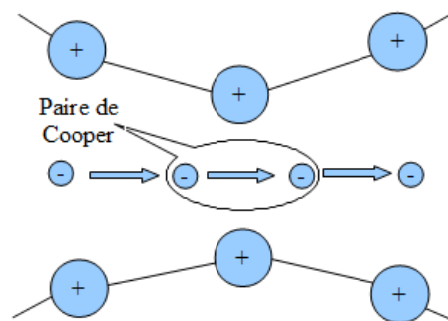


Figure I.8: Représentation de paire de Cooper dans un supraconducteur.

« Source : <https://tpe-supraconducteurs.webs.com> »

La superposition de toutes les paires d'électrons forme une onde quantique macroscopique (ou condensat) occupe tout le matériau. Cette onde collective impose à chacun de ses participants d'avancer à la même vitesse, de plus, elle est insensible aux défauts du matériau qui sont trop petits pour la freiner donc la résistance électrique a disparu. En effet, les électrons peuvent passer en ligne droite dans le matériau comme le montre la figure I.9.

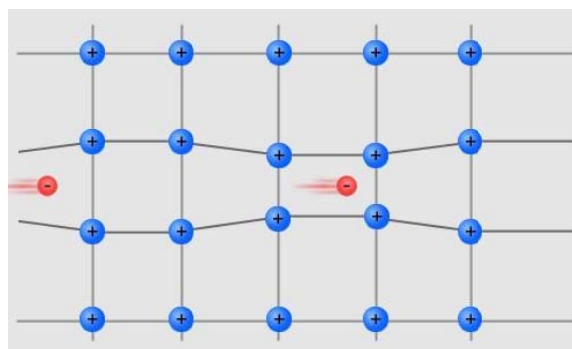


Figure I.9: Passage des électrons dans un supraconducteur selon la théorie BCS.

« Source : <https://tpe-supraconducteurs.webs.com> »

I.3 Types des supraconducteurs

Les supraconducteurs peuvent être classés généralement suivant les valeurs critiques des deux grandeurs ; la température (T_c) et le champ magnétique (H_c). Ces valeurs représentent les seuils de transition de la phase du matériau supraconducteur à l'état normal. Cette transition du matériau peut être directe (rapide) ou bien progressive. Cependant, deux classes sont actuellement définies : supraconducteur de *type I* et de *type II*.

I.3.1 Type I

Les supraconducteurs de type I sont constitués de métaux purs ayant une température critique inférieure à 10 K. L'effet Meissner ou diamagnétisme parfait caractérise le comportement des supraconducteurs de type I en dessous du champ magnétique critique H_c et aussi de la température critique (T_c). Au-dessus de T_c ou bien H_c , le matériau supraconducteur devient normal et ne présente aucun empêchement vis-à-vis les lignes de champ magnétique externe (Fig. I.10).

Les supraconducteurs de type I sont bien décrits par la théorie *BCS* définie précédemment. Ces types de supraconducteurs ont eu une utilité pratique limitée car les champs magnétiques critiques sont très faibles et l'état supraconducteur disparaît soudainement à la température critique.

Le courant maximal pouvant être transporté par un supraconducteur de type I est appelé intensité de courant critique I_c .

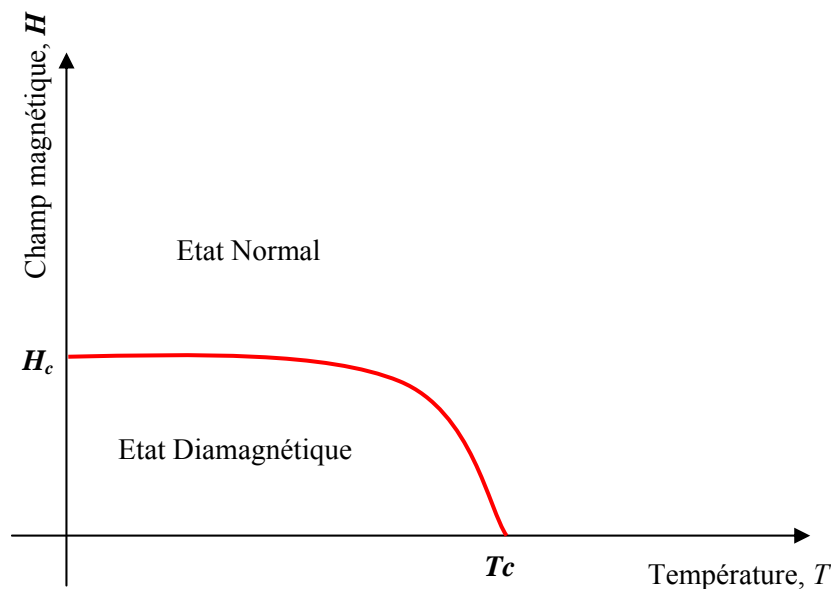


Figure I.10 : Supraconducteur de type I

I.3.2 Type II

Les supraconducteurs de type II ont deux champs magnétiques critiques, H_{c1} et H_{c2} , figure I.11. Les supraconducteurs de type II expulsent complètement le champ magnétique de l'intérieur lorsque $H < H_{c1}$ (effet Meissner). Lorsque la valeur du champ appliqué H est dans l'intervalle entre H_{c1} et H_{c2} ($H_{c1} < H < H_{c2}$), des tubes à flux magnétique ou vortex pénètrent l'échantillon (Fig. I.12). Lorsque H est supérieur à H_{c2} , l'échantillon revient complètement à l'état normal, à l'instar du supraconducteur de type I.

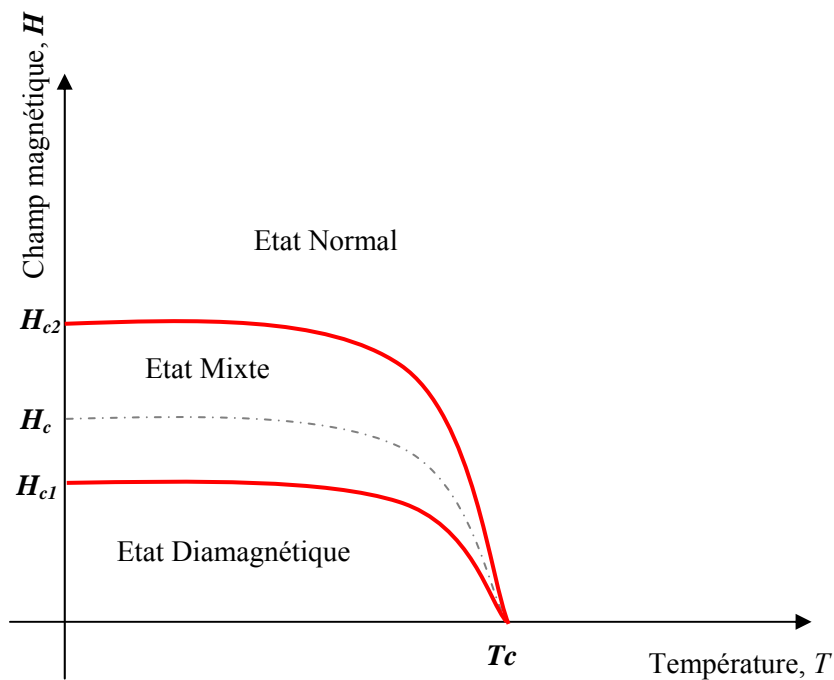


Figure I.11: Supraconducteur de type II.

La figure I.12 explique le mécanisme de pénétration des lignes d'un champ magnétique externe dans un supraconducteur de type II, dans le cas où $H_{c1} < H < H_{c2}$. Pour cet intervalle du champ, l'échantillon possède des régions normales et supraconductrices au même temps. Ces régions normales cylindriques, appelées vortex ou fluxons, sont distribuées selon un motif régulier appelé réseaux de fluxons. Chaque tourbillon laisse passer le champ magnétique appliqué et est protégé des régions supraconductrices voisines par un vortex de courants induits appelés super-courants. Les vortex peuvent être décrits comme de petits tubes de flux magnétique pénétrant dans le matériau, ramenant le matériau dans son état non supraconducteur où ils pénètrent. Tandis que le diamagnétisme parfait est maintenu par les courants de surface sur les bords du matériau et par les vortex.

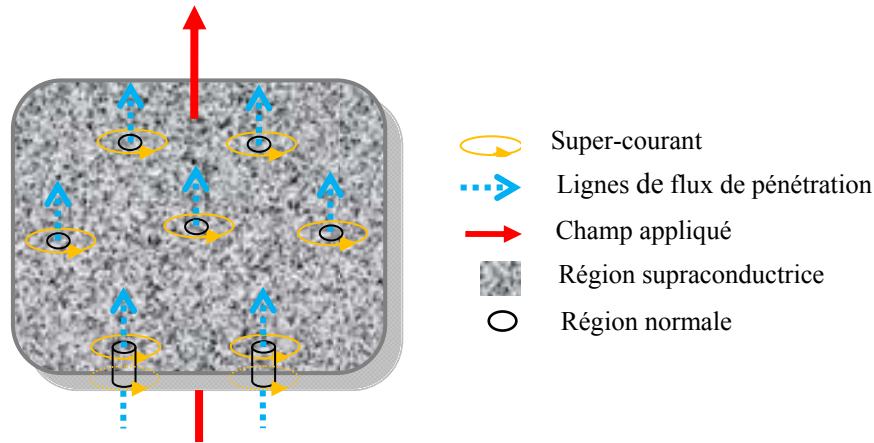


Figure I.12: Etat mixte dans un matériau supraconducteur « création des vortex ».

Les supraconducteurs de type II sont également caractérisés par une nouvelle phase appelée état mixte entre le champ magnétique critique H_{c1} et H_{c2} , comme le montre au dessus (Fig. I.12). Donc, ils possèdent un certain nombre de phénomènes qui intéressent aussi bien les physiciens que les mathématiciens appliqués.

I.4 Températures critiques des supraconducteurs de type II

Selon la valeur de la température critique, les matériaux supraconducteurs sont classés en deux familles ; les supraconducteurs à basse température critique (SBTC) et les supraconducteurs à haute température critique (SHTC).

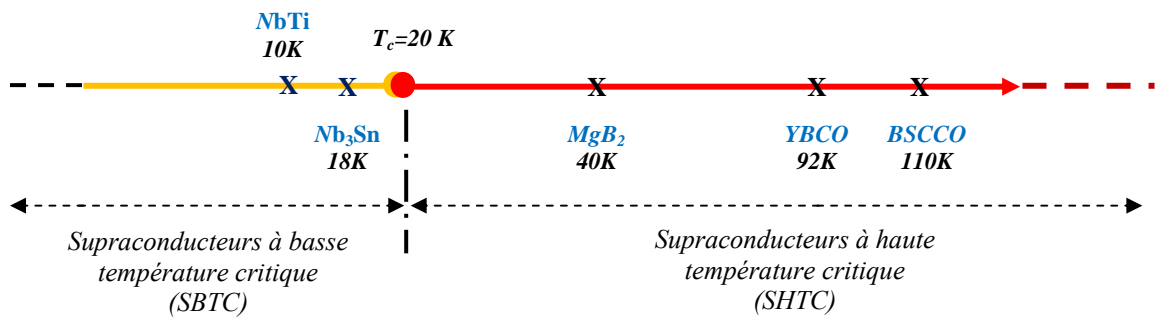


Figure I.13: Schéma de classement des supraconducteurs les plus connus industriellement selon la température critique.

I.4.1 Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)

Les supraconducteurs à basse température sont généralement des matériaux supraconducteurs dont le refroidissement se fait à base d'hélium liquide. Ils sont caractérisés par des températures critiques inférieures à 20 K. Les matériaux SBTC qu'on trouve dans les

applications industrielles sont le *NbTi* (alliage métallique ductile de niobium et de titane) et le *Nb₃Sn* (composé intermétallique poly-cristallin de niobium et d'étain).

- *NbTi* :

Le *NbTi* est parmi les matériaux SBTC les plus utilisés dans ce groupe [Gre92], [Lee94], [Wil96]. Ce matériau présente une bonne propriété mécanique et il est bien adapté à la production d'inductions magnétiques dans la gamme de 2 à 10T s'il est refroidi à une température inférieure à 5 ou 6 K. Environ 1500 tonnes/an, est la production mondiale de *NbTi* sous forme de fils composites multi-filamentaires stabilisés au cuivre (Fig. I.14). Ce fil est principalement utilisé pour la réalisation d'aimants d'Imagerie par Résonance Magnétique (*IRM*), en particulier pour l'imagerie médicale (des bobines refroidies à 4.2 K sont nécessaires pour des inductions magnétiques de 0.5 à 4 T) [Mor00].

- *Nb₃Sn* :

Le *Nb₃Sn* est adapté à la génération d'inductions magnétiques de 10 à 21 T (refroidi à l'hélium liquide). Environ 15 tonnes/an est la production mondiale de ce matériau sous la même forme que *NbTi*. Il est actuellement utilisé pour fabriquer les bobines internes des aimants d'imagerie à Résonance Magnétique Nucléaire (*RMN*). Sur la figure I.14, le *NbTi* est représenté à gauche tandis que le *Nb₃Sn* est à droite.



Figure I.14: Formes des deux matériaux SBTC : *Nb₃Sn* à droite et *NbTi* à gauche.

Généralement, les matériaux SBTC sont sous la forme filaire à l'exception du *NbTi* qui est utilisé aussi sous la forme massive dans des cavités supraconductrices pour accélérateurs des particules [Alh15].

Ces matériaux (*NbTi* et *Nb₃Sn*) sont simples à utiliser pour fabriquer des bobines de fort champ magnétique, de notre côté ils nécessitent beaucoup d'énergie pour les refroidir. Par

contre, ils sont disponibles en grande échelle avec des performances exceptionnelles qui atteignent jusqu'à plus de 2000 A/mm² sous un champ magnétique de 3 T [Alh15], [Ked17].

I.4.2 Supraconducteurs à haute température critique (SHTC)

Contrairement au SBTC, les matériaux SHTC possèdent une température critique supérieure à 20K. En 1986, le monde de la physique était très excité lorsque **Bednorz** et **Muller** ont annoncé avec prudence qu'ils avaient découvert une nouvelle classe de matériaux supraconducteurs. Ces matériaux étaient très intéressants car il ne s'agissait pas de métaux mais de céramiques de la famille des oxydes de cuivre ou des cuprates. **Bednorz** et **Muller** ont découvert la supraconductivité dans le premier matériau qui est l'oxyde de baryum-lanthane-cuivre (*BaLaCuO*) à la température de 35K. Les cuprates sont les matériaux SHTC les plus intéressants. À l'heure actuelle, deux grandes familles de cuprates sont envisagées pour des applications commerciales: l'oxyde de cuivre yttrium-baryum, ou **YBCO**, et Bismuth oxyde de cuivre de calcium de strontium, ou **BSCCO**.

- **YBCO ou YBaCuO (dite de deuxième génération, 2G)**

Les YBCO sont des composés chimiques cristallins de formule $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Ce matériau a été découvert par **Paul Chu** de l'université de **Houston** et **Wu** de l'université de l'**Alabama**, lors de la recherche sur les supraconducteurs à des températures supérieures à la température de l'ébullition de l'azote (77 K). Le YBCO était une céramique dont la température de transition était d'environ 92 K. La forme cristalline de YBCO est illustrée par la figure I.15.

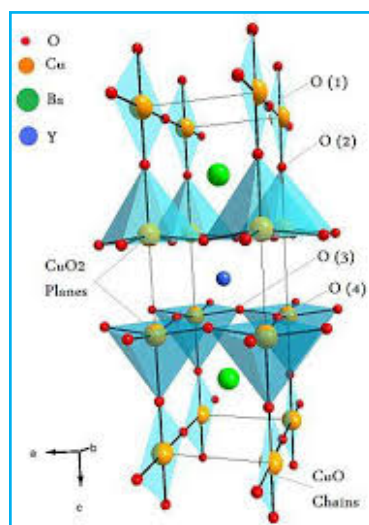


Figure I.15: Maille cristalline et apparence des matériaux *YBaCuO* [Gal13]

• BSCCO ou BiSrCaCuO (dite de première génération, 1G)

Le BSCCO est une famille de SHTC répondant à la formule chimique généralisée $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+x}$ ($n=2$, le composé le plus couramment étudié). Ce matériau a été découvert par **Hiroshi Maeda** et ses collègues à l'Institut national de recherche sur les métaux au **Japon**, vers 1988 [Mae88]. Le BSCCO était le premier SHTC ne contenant pas d'éléments de terres rares. Un des premiers développements clés de ce matériau consistait à remplacer environ 15% du **Bi** par du **Pb**, ce qui a grandement accéléré la formation et la qualité du membre **Bi-2223** ($n=3$) avec une température critique de 110 K. Ce matériau qui a été identifié par **Tallon** et al. [Tal88], attire beaucoup l'attention en tant que matériau commercialement viable depuis sa découverte. Il existe d'autres membres de la famille de BSCCO avec des températures critiques inférieures comme **Bi-2234** (104 K), le **Bi-2212** (96 K) et le **Bi-2201** (33 K). Des rubans en Bi-2223 typiques d'une largeur de 4 mm et d'une épaisseur de 0,2 mm supportent un courant de 200 A à 77 K, ce qui donne une densité de courant critique dans les filaments de 5×10^5 A/cm². La représentation cristallographique des trois phases du BSCCO (2201, 2212 et 2223) est montrée à la figure I.16.

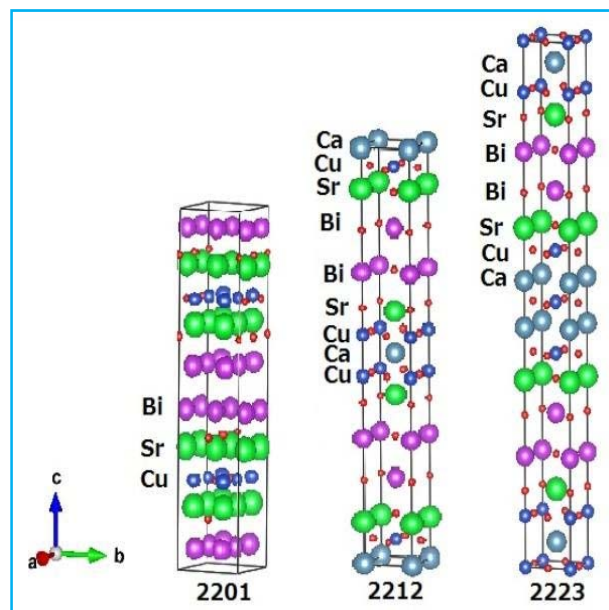


Figure I.16: Illustration des structures cristallines des trois phases de BSCCO [Ima18]

La figure I.17, montre quelques formes de matériaux SHTC en YBCO et BSCCO. Les pastilles sur la figure I.17a possèdent plusieurs formes ; carré, rectangulaire, cylindrique...

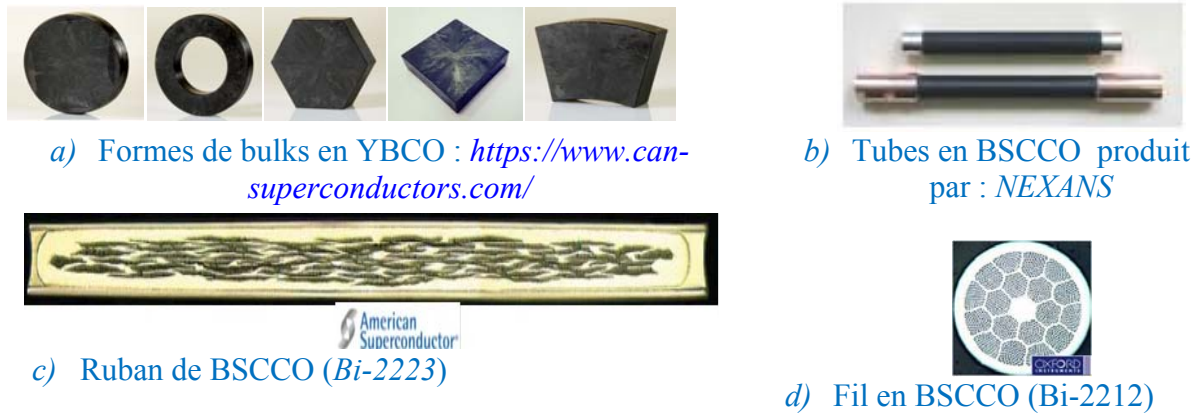


Figure I.17: Quelques formes de matériaux SHTC en YBCO et BSCCO

• MgB₂ :

Le diborure de magnésium est un matériau supraconducteur récemment découvert par *J. Akimitsu* à l'Université *Aoyama Gakuin* au Japon (2001), avec une température critique de 39 K [Nag01]. Selon cette valeur de température, il est considéré comme même un matériau à haute température critique. Ce matériau peut être refroidi avec de l'hélium gazeux, ce qui le rend plus pratique que les SBTC car il est très facile et peu coûteux à produire et peut être façonné sous pratiquement toutes les formes (fil, ruban, bulk..). Il reste que ce matériau possède une température de transition bien inférieure à celle des matériaux SHTC (cuprates).

Les supraconducteurs en YBCO et BSCCO (cuprates les plus étudiés) ont des températures critiques élevées supérieures à 77 K et peuvent être refroidis à l'azote liquide. En raison de leurs valeurs critiques élevées, ces matériaux sont choisis pour la plupart des machines et des aimants électriques à haute performance.

Pour la conception d'un moteur électrique dans cette thèse, ils sont considérés comme le meilleur choix. Le tableau suivant regroupe les formes des supraconducteurs à haute température critique les plus étudiés.

	Formes de matériaux		
	filaire	massive	Dépôt
BSCCO	X majoritaire	X	-
YBCO	X	X majoritaire	X minoritaire
MgB ₂	X majoritaire	X	-

Tableau I.1 : Différentes formes de SHTC les plus utilisés (BSCCO, YBCO et MgB₂).

D'après le Tableau I.1, deux formes des matériaux SHTC sont majoritaires selon le type de matériau (filaire ou massif). Les fils supraconducteurs peuvent être utilisés pour la réalisation des câbles de transport d'énergie, des électro-aimants, ou bien des bobines des machines électriques. Ces fils sont avantageux par rapport aux lignes conventionnelles (cuivre ou aluminium), car elles peuvent transporter une grande quantité d'énergie avec de petites sections d'un côté et avec moins de pertes résistifs (résistance nulle) d'un autre côté [Dol15].

Les SHTC peuvent faire passer environ 250 A/mm² à l'azote liquide (77 K) sous un champ propre et environ 750 A/mm² à 30 K sous un champ magnétique de 3 T [Alh15].

Les formes massives des matériaux SHTC les plus utilisés sont des pastilles sous forme *d'aimants supraconducteurs* et *d'écrans magnétiques*.

Les aimants massifs supraconducteurs ou « cryoaimants » sont des pastilles supraconductrices aimantées. Un record actuel très intéressant, d'un point de vue scientifique, dans ce domaine est de 17 T piégés dans une pastille d'YBCO refroidie à environ 29 K (M.Tomita et M.Murakami en 2003) [Tom03]. Contrairement au cryoaimants, les écrans magnétiques supraconducteurs fonctionnent comme des barrières de flux magnétique pour moduler ou dévier les lignes de flux dans différents dispositifs électromagnétiques ; particulièrement dans les machines électriques. Dans ce travail, on s'intéresse à cette propriété des pastilles supraconductrices pour la conception de notre machine électrique.

Par rapport aux supraconducteurs à basse température, les cuprates sont beaucoup plus difficiles à produire (fabrication), mais en raison des valeurs critiques élevées, en particulier de la température, de nombreuses recherches sont en cours pour rendre le matériau plus commercialisé sur le marché.

I.5 Fabrication du ruban en BSCCO (1G) [Mar10]

Comme indiqué ci-dessus, les rubans 1G consistent en un ou plusieurs filaments supraconducteurs de **BSCCO-2223** enfermés dans une matrice d'argent. Le nombre de filaments dans la bande dépend du fabricant, de sorte que l'on peut trouver des bandes de 1, 7, 19, 37, 55, 61, 85,...etc. Ces filaments supraconducteurs sont généralement disposés comme indiqué sur la figure I.17.c.

Le procédé de fabrication de ces rubans est appelé *poudre en tube*, PIT (*Powder In Tube*). Cette méthode repose sur l'utilisation de petits tubes d'argent remplis d'une poudre précurseur du matériau supraconducteur (généralement **Ca₂PbO₄** + **Bi2212** + des phases secondaires). Un certain nombre de ces tubes sont ensuite rassemblés dans une plus grande

capsule d'argent qui est ensuite soumise à un processus d'étirage puis de laminage. Enfin, l'ensemble est fritté à une température suffisante pour produire une croissance de grains contrôlée du supraconducteur avec un degré d'alignement élevé entre les joints de grains dans le plan *ab*, de sorte que la densité de courant critique J_c dans ce plan est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle de la direction de l'axe *c*.

La figure I.18 montre un diagramme des réactions qui se produisent pendant le processus de frittage pour la formation du supraconducteur (BSCCO) avec un processus *PIT* [Gri96].

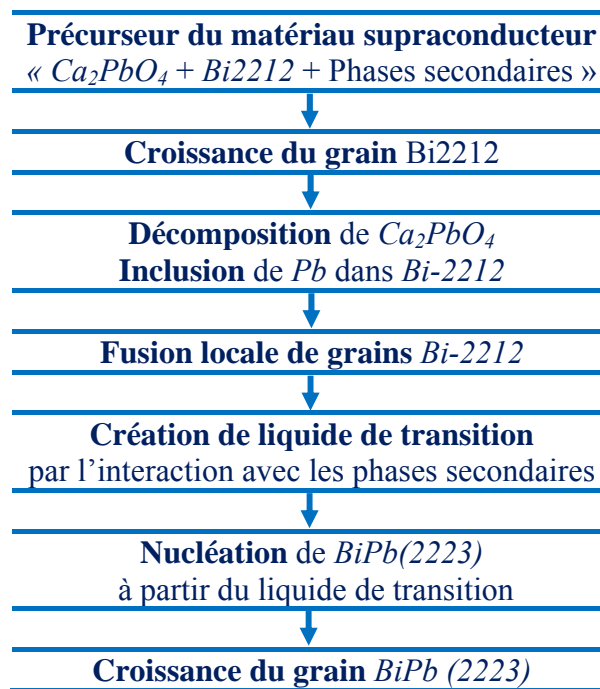


Figure I.18: Etapes de formation de grain supraconducteur (*Bi-2223*) à partir de précurseur de *Bi-2212* et Ca_2PbO_4

Le choix de l'argent en tant que matériau de support (les tubes et la gaine) est dû à la bonne perméabilité à l'oxygène de ce métal. De plus, à la température de frittage, l'argent constitue un bon gabarit pour la croissance des grains de matériau supraconducteur [Gri96]. La figure I.19 est une représentation schématique des étapes dans le processus *PIT* pour la fabrication des rubans en *Bi-2223*.

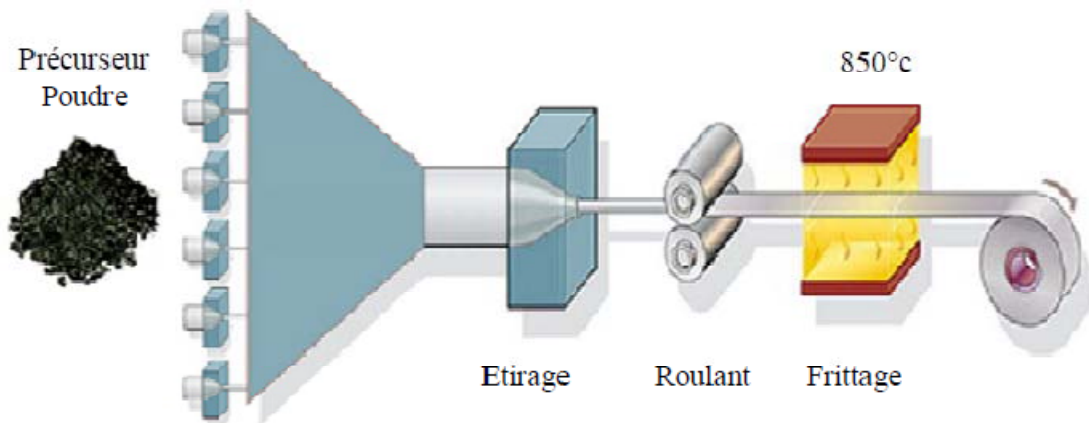


Figure I.19: Processus poudre en tube (PIT) pour la fabrication de ruban en BiPb(2223) [Mar10]

I.6 Mécanismes d'écrantage et de piégeage du champ dans les supraconducteurs

Les supraconducteurs sous formes massives peuvent jouer de nombreux rôles dans les applications industrielles comme les paliers magnétiques [Coo99], [Tom03] et les machines tournantes à haute densité de puissance [McC98], [Stu04] car elles peuvent **piéger** ou **protéger** une valeur élevée de champs magnétiques [Tom03], [Mur99] lorsqu'elles sont considérées comme aimants supraconducteurs, de plus elles peuvent aussi expulsées des lignes de champs extérieurs lorsqu'elles sont considérées comme écrans magnétiques [].

I.6.1 Piégeage du champ magnétique dans les SHTC

La valeur maximale de l'induction magnétique restante dans un aimant permanent est inférieure à 1,5 Tesla pour le néodyme-bore-bore à ce jour. En utilisant le principe de piégeage du champ magnétique dans un supraconducteur à haute température critique, il est possible d'obtenir 4 T à la surface d'un volume supraconducteur à 77 Kelvin (refroidissement à l'azote liquide) et jusqu'à 17,6 T à 26 K [Dur14].

Les mécanismes de piégeage du champ ou bien l'aimantation sont basés sur le principe de création des courants induits à l'intérieur d'une pastille supraconductrice par l'exposition de cette dernière à un champ magnétique variable. Selon la nature de champ magnétique appliqué et l'état de la pastille SHTC, différentes méthodes d'aimantation sont distinguées :

- Refroidissement sous champ ou **Field Cooling (FC)**
- Refroidissement hors champ ou **Zero field cooling (ZFC)**
- Aimantation par champ impulsionnel ou **Pulsed Field Magnetization (PFM)**.

La figure I.20 présente les différentes étapes pour aimanter une pastille supraconductrice selon les trois méthodes citées au dessus (*FC*, *ZFC*, *PFM*).

Dans l'étape 1 de la méthode de refroidissement sous champ, un champ magnétique constant est appliqué à une pastille non supraconductrice (chaude). Cette dernière est refroidie par la suite à une température inférieure à sa température critique (T_c) tout en conservant la même valeur maximale du champ extérieur appliqué (l'étape 2). Ensuite, ce champ magnétique diminue très lentement, peut prendre quelques heures [Tom03], afin d'avoir un champ piégé dans la pastille quand le champ externe s'annule [Val07], [Kos95]. La valeur du champ piégé dans la pastille SHTC ne dépasse pas la valeur maximale du champ extérieur appliqué. Par conséquent, il faut augmenter suffisamment la valeur du champ appliqué pour avoir un fort piégeage. Pour cela, une bobine de champ extérieur supraconductrice est fortement conseillée.

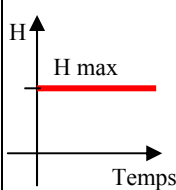
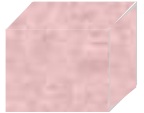
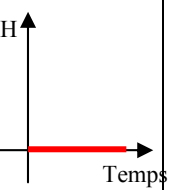
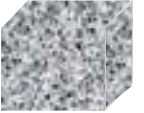
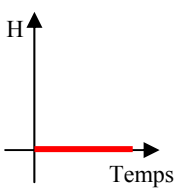

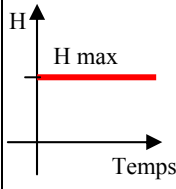
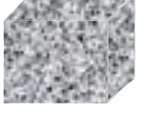
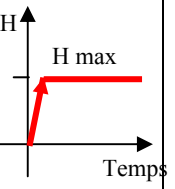
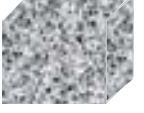
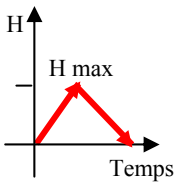

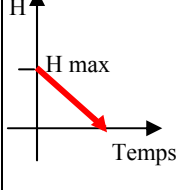

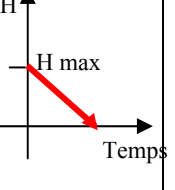

	La méthode FC		La méthode ZFC		La méthode PFM	
	H appliqué	Etat SHTc	H appliqué	Etat SHTc	H appliqué	Etat SHTc
Etape -1-		 Pastille chaude		 Pastille Froide		 Pastille Froide
Etape -2-		 Pastille Froide		 Pastille Froide		 Pastille Froide
Etape -3-		 Pastille Froide		 Pastille Froide		

Figure I.20: Tableau récapitulatif des méthodes d'aimantation d'une pastille SHTC

Pour la méthode de refroidissement hors champ, la pastille SHTC est refroidie sans la présence d'un champ externe. Ensuite, la pastille refroidie est soumise à une augmentation progressive du champ appliqué jusqu'à l'arrivée à sa valeur maximale (étape 2). Ce dernier est diminué lentement jusqu'à l'annulation complète de sa valeur (étape 3).

Dans la dernière méthode (aimantation par champ impulsif), la pastille est refroidie en absence de champ magnétique (étape 1). Ensuite, une impulsion de courte durée (ordre de quelques milli seconde) du champ extérieur est appliquée (étape 2). Selon la loi de *Lenz*, des courants induits se développent à l'intérieur de la pastille pour s'opposer à la variation (augmentation et diminution) de champ magnétique externe. La circulation de ces courants induits dans la pastille produit autour de cette dernière un champ magnétique [Ain14], [Ain15].

- Comparaison entre les méthodes FC, ZFC, PFM

La méthode (*FC*) a donné les meilleurs résultats en termes de valeur de champ piégé. Il est possible avec cette méthode d'obtenir une valeur d'induction de 17 T à 29 K [Tom03]. Cette valeur est inférieure de deux fois dans le cas de la méthode *ZFC* pour le même champ appliqué [Che06]. L'inconvénient principal de cette méthode est la nécessité d'avoir des bobines supraconductrices pour générer la forte valeur de champ magnétique.

La valeur du champ magnétique piégé dans la pastille dépend de la densité de courant critique J_c dans la pastille, du volume et de la forme de la pastille, et de la forme de l'impulsion du champ magnétique appliqué sur la pastille [Gon14].

1.6.2 Mécanisme d'écrantage du champ magnétique

L'écrantage de flux ou l'expulsion du champ magnétique externe est le comportement de la pastille supraconductrice, refroidie hors champ magnétique (voir étape -1- de la méthode *FC*), lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique externe variable. La variation de ce flux magnétique appliqué à la pastille crée des courants induits qui génèrent à son tour un champ magnétique résultant (loi de *Lenz*). Ce dernier s'oppose pratiquement à la totalité des lignes de champ magnétique externe lorsque les courants induits se développent à la surface du matériau (voir Fig. I.21, étape -1-), dans ce cas la pastille supraconductrice fonctionne comme un *écran magnétique*.

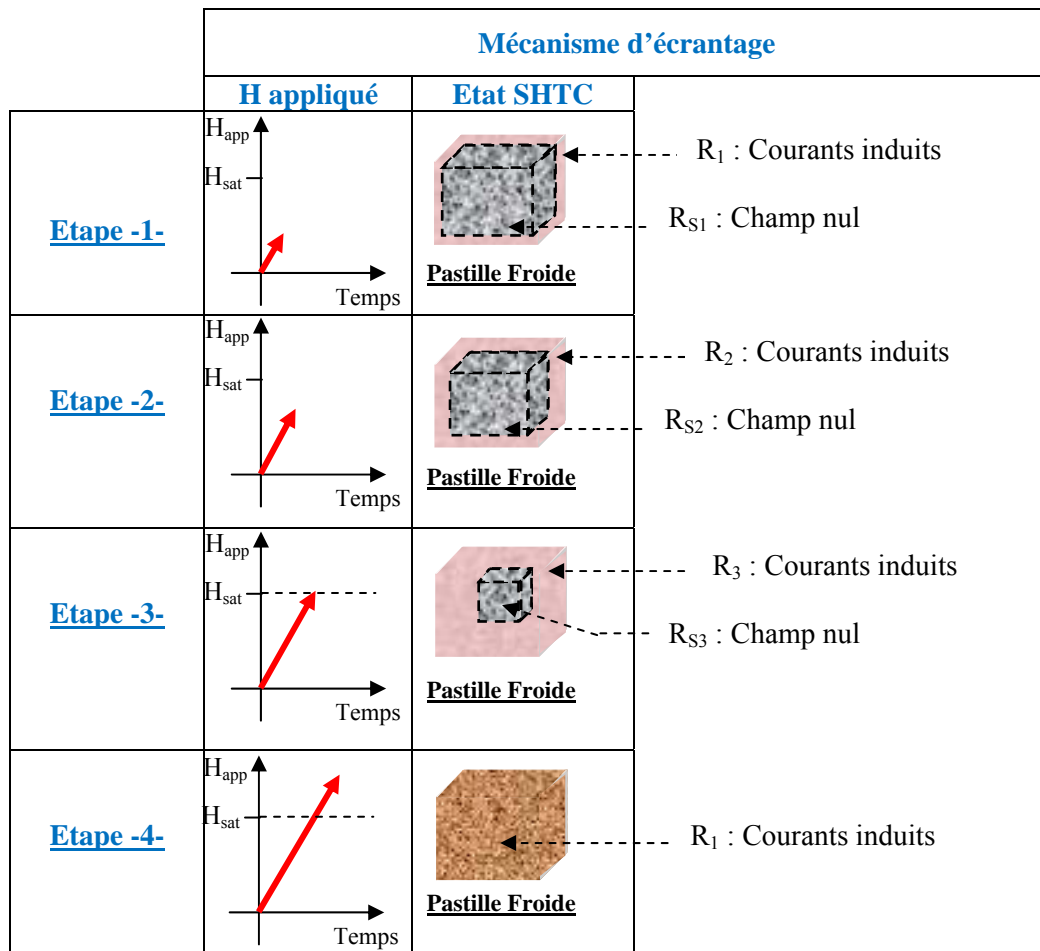


Figure I.21: Pastille SHTC soumise à un champ magnétique externe « mécanisme d'écrantage »

Dans l'étape -2-, le champ appliqué continue de croître. Cela, ce traduit par une augmentation de la région des courants induits (R_2) par rapport à celui de R_1 (région extérieure), et le système d'écrantage ce fait uniquement par la région R_{S2} (région intérieure). Dans ce cas, on rencontre une pénétration partielle des lignes de champ à la pastille (R_2). Le champ appliqué atteint la valeur de saturation de la pastille, donc des courants induits couvrent pratiquement toute la région du massif sauf la petite région (R_{S3}) au centre. La pastille perd ses propriétés d'écran car elle rencontre une pénétration totale des lignes de champ. Par la suite, la pastille trouve son état de saturation à cause de forte valeur du champ appliqué (dépasse suffisamment le champ de saturation).

Les supraconducteurs massifs, refroidis à champ nul, s'opposent aux variations du champ magnétique externe. Dans notre travail, on s'intéresse à une structure de rotor d'une machine synchrone utilisant le matériau supraconducteur pour diriger (guider) et concentrer le champ magnétique.

I.7 Modèles macroscopiques des supraconducteurs

La représentation d'un matériau supraconducteur est faite à l'aide de deux modèles de la caractéristique $E(J)$. Il s'agit du *modèle de Bean* et de la *loi en puissance*. Dans ces deux modèles la densité de courant critique est indépendante de l'induction magnétique. Pour la prise en compte de J_c en fonction de B , les modèles de Kim ou exponentiel pourront être utilisés.

I.7.1 Modèle de la loi en puissance

Pour la caractérisation de routine des matériaux SBTC et SHTC, la dépendance tension-courant selon la loi de puissance semble être la mieux adaptée en raison de sa simplicité et de son excellent ajustement aux données expérimentales. Dans ce modèle de la loi en puissance, le champ électrique E est proportionnel au courant I et de l'exposant n de la manière suivante:

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (\text{I.1})$$

Où

$I_c (A)$: le courant critique correspond à la valeur critique de la tension $E_c (V/m)$.

n : un exposant qui définit l'inclinaison de la courbe de transition.

La valeur critique de champ électrique pour les matériaux SHTC est fixée à $10^{-4} V/m$. Si cette valeur varie, les deux autres paramètres (J_c et n) varient aussi.

La figure I.22 montre la valeur de courant critique (I_c) et l'indice de puissance n ajusté à partir de l'équation (I.1) pour les deux échantillons mesurés. Les valeurs typiques de n pour les rubans Bi-2223 en champ libre à 77 K sont comprises entre 10 et 30, alors que pour SBTC, le passage à l'état normal est généralement plus net et les valeurs n dans NbTi peuvent atteindre 50 [Iwa95].

Un exemple de la caractéristique tension-courant mesurée de deux rubans SHTC est présenté à la figure I.22. Les rubans sont traversés par un courant de transport continu, tandis que le critère de champ électrique est égale à $10^{-4} V/m$.

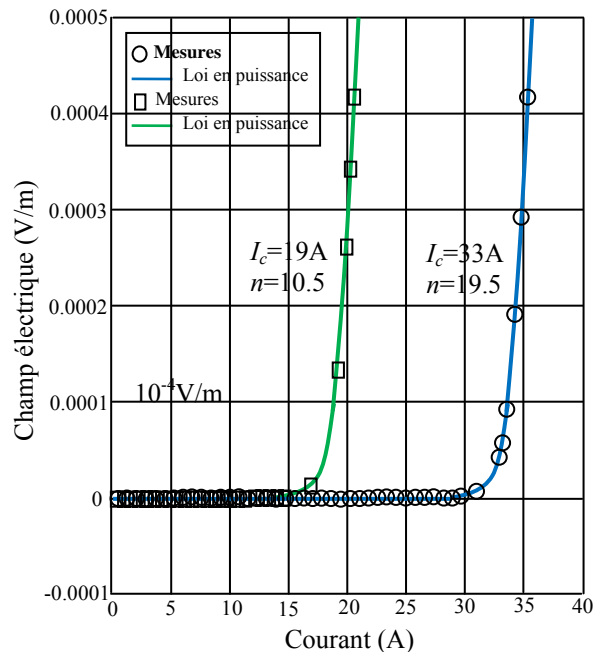


Figure I.22 : Caractéristique $E(I)$ des deux rubans Bi-2223 ; obtenue lors de mesures de courant de transport à courant continu à 77 K et par loi en puissance (Eq. I.1).

La densité de courant critique J_c est ensuite calculée à partir de la valeur mesurée du courant critique I_c :

$$J_c = \frac{I_c}{S} \tag{I.2}$$

Où :

S : la section transversale du noyau supraconducteur dans des conducteurs mono ou multi-filamentaires.

Si E_c diffère de $1 \mu V/cm$, les valeurs de J_c et n varient aussi.

I.7.2 Modèle de Bean

Le modèle de Bean est le modèle macroscopique le plus utilisé pour les calculs analytiques dans le cas des géométries simples. Ces derniers constituent des cas de tests pour valider les modèles numériques. Ce modèle présente l'avantage d'être assez simple mathématiquement dans le cas des développements analytiques. Par contre, la discontinuité de ce modèle le rend peu utilisable dans les cas numériques. L'équation qui décrit le comportement de supraconducteur selon ce modèle de Bean est illustrée comme suit :

$$J = \pm J_c \text{ ou } 0 \tag{I.3}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \pm J_c \text{ ou } 0 \quad (\text{I.4})$$

D'après ce modèle, la densité de courant est égale soit à la densité de courant critique avec la valeur positive ou négative soit à une valeur nulle, figure I.23.

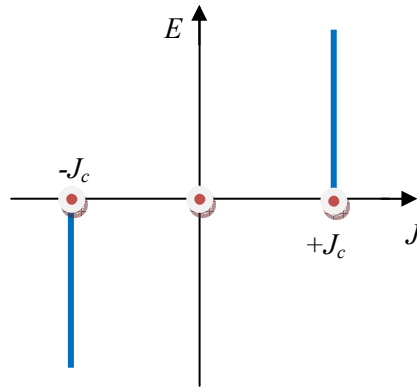


Figure I.23: Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur, selon le modèle de Bean

En réalité, le modèle de Bean n'est qu'un cas particulier d'un modèle dit *de l'état critique*. Ce dernier prend en considération de plus la possibilité de la dépendance de J_c de l'induction magnétique B ce qui se traduit par l'expression mathématique suivante (Eq. I.5) :

$$J = J_c (|B|) \frac{E}{|E|} \quad (\text{I.5})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \pm J_c (|\vec{B}|) \text{ ou } 0 \quad (\text{I.6})$$

I.7.3 Modèle de Kim

Dans les deux modèles précédents, modèle de la loi en puissance et de Bean, la densité de courant est supposée constante même si le matériau est soumis à un champ magnétique externe. Le matériau supraconducteur dans ce cas est considéré isotrope. Dans la réalité, la densité de courant dépend fortement de l'orientation du champ externe et de l'induction magnétique B . **Kim** et *al.* ont proposés une expression mathématique qui exprime J_c en fonction de B .

$$J_c (|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (\text{I.7})$$

I.7.4 Modèle exponentiel

Une autre expression de la dépendance de J_c de l'induction magnétique est proposée par ce modèle comme suit :

$$J_c (|B|) = J_{c0} \exp\left(-\frac{|B|}{B_0}\right) \quad (\text{I.8})$$

Les modèles de Kim et exponentiel sont employés pour les développements numériques. De plus, le modèle de Kim est le plus utilisé pour la modélisation de $J_c(B)$ [Tak94], [Lev95].

I.8 Applications des supraconducteurs à haute température critique

Les supraconducteurs sont déjà utilisés dans de nombreux domaines: électricité, applications médicales, électronique et même les trains. Ils sont utilisés dans les laboratoires, notamment dans les accélérateurs de particules, en astrophysique avec l'utilisation de bolomètres (super-thermomètre), dans les détecteurs magnétiques ultrasensibles appelés *SQUID* et dans les bobines supraconductrices pour produire des champs magnétiques très puissants. On va détailler quelques applications des supraconducteurs en électrotechnique et qui utilisent les matériaux SHTC sous la forme de ruban ou massive.

I.8.1 Réseaux électrique

◆ Les câbles supraconducteurs

Des câbles supraconducteurs sont fonctionnels grâce à la découverte des supraconducteurs de type II (cuprates) en 1986. Ces câbles ont la possibilité de conduire des valeurs de courant très importantes sans pertes (effet joule), car le supraconducteur possède une résistance nulle s'il est refroidi à l'azote liquide (77 K). La densité de courant dans ces câbles atteint environ 150 à 1500 fois supérieure celle observée dans le cuivre ; ce qui les rend un moyen idéal pour le transport de courant à grande échelle.

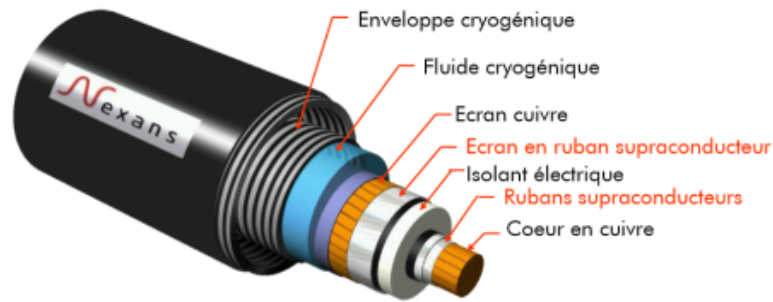


Figure I.24 : Coupe de câble supraconducteur de transport d'électricité « Source : Nexans »

Les principaux composants de ce câble sont :

- Le cœur en cuivre : il aura pour fonction de prendre le relais en cas de dysfonctionnement du système de refroidissement (supraconducteur transit vers l'état normal).
- Rubans supraconducteurs pour le transport du courant électrique.
- Des isolants pour la sécurisation électrique et magnétique du câble.
- Deux enveloppes cryogéniques, un pour la circulation de l'azote liquide et l'autre au dessus pour la limitation des rayons thermiques.

Le câble supraconducteur de transport électrique le plus long et le plus puissant au monde, développé et fabriqué par *Nexans*. Une liaison de 600 mètres à 138 kV (en 2008 à *Paris*), capable de transporter une puissance électrique de 574 MVA et composée de trois phases supraconductrices en parallèle, constitue le premier câble supraconducteur au monde incorporé dans un réseau électrique à ce niveau de tension, lors d'une installation de test pour le compte de *LIPA* (Long Island Power Authority), l'un des principaux opérateurs de réseaux électriques aux *Etats-Unis*.



Figure I.25: Câble supraconducteur LIPA (600 MW, 600 M, 138 KV), en 2008 à paris
« source : <https://www.nexans.fr/eservice/France-fr> »

Le câble intègre des rubans supraconducteurs *BSCCO-2223* produits par *AMS* (American Superconductor Corporation).

◆ Les limiteurs de courant de défaut supraconducteurs

Un limiteur de courant de défaut supraconducteur (*LCDS*) est un appareil de technologie énergétique innovant, empêchant l'apparition de courants de défaut élevés dans les réseaux électriques. Il offre les caractéristiques les plus proches du limiteur de courant de défaut idéal, qui peuvent être utilisés dans les réseaux électriques pour prévenir les dommages par court-circuit et nous aider dans le concept d'extension du système. Deux limiteurs supraconducteurs de courant fonctionnent de manière très satisfaisante dans le réseau Européen ; un au Royaume-Uni et l'autre en *Allemagne*. La figure I.26 représente un *LCDS* avec des composants *Nexans*. Il est mis en 2004 à paris sur le réseau électrique (*RWE*) par une compagnie allemande d'électricité.



Figure I.26 : Le limiteur de courant de défaut supraconducteur (*LCDS*) avec composants *Nexans* est mis en ligne sur le réseau *RWE* en 2004 à paris.

« Source : <https://www.nexans.be/eservice/Belgium-en/navigatepub> »

Les composants *SHTC*, cœur du limiteur de courant, ont été développés et fabriqués par *Nexans* à *Hürth* en *Allemagne* selon un procédé de moulage en fusion exclusif [Mal12]. Le matériau *SHTC* est capable de changer considérablement sa résistance électrique de plusieurs ordres de grandeur dans la plus courte période de temps. Un système à l'azote liquide est généralement utilisé pour le refroidissement des équipements *LCDS*.

Aujourd'hui, plusieurs types de *LCDS* ont été mis au point, y compris résistifs normaux, flux flow, réacteur à courant continu [Kim15], blindage magnétique inductif [kai01],

transformateur inductif [Cho11], noyau saturé [Jin97] et blocage du flux [Bad18] qui utilisent supraconducteurs de spécification différente.

◆ Les transformateurs supraconducteurs

Les transformateurs supraconducteurs, définis par les conducteurs SHTC à densité de courant élevée et le diélectrique à l'azote liquide, présentent de nombreux avantages potentiels par rapport aux transformateurs immergés dans l'huile. Les transformateurs SHTC sont plus petits, plus légers, plus efficaces, moins dangereux pour l'environnement, faible impédance de sortie et limitation du courant de défaut [Kal11], [Ple10], [Wol13] ce qui les rend attrayants pour les gestionnaires de réseau électrique. Un exemple d'un transformateur supraconducteur à haute température critique est illustré à la figure I.27.



Figure I.27 : Transformateur SHTC développé par une équipe « New-Zeland /australien » montrée lors de l'assemblage (1MVA, 11/0.4 KV)

Le développement ultérieur de transformateurs supraconducteurs à haute température critique a été un effort mondial. Le tableau I.4 regroupe les principales spécifications des transformateurs SHTC de plus de 500 KVA développés dans des projets au cours des années entre 2003 et 2014.

Année	Payé	P_N (MVA) puissance Nominale	Nombre de phases	V_N (KV) Tension nominale	I_N (A) Courant nominal	T (K) Température de refroidissement	Technologie de Fil
2003	Japon	2	1	66/6.9	30.3/290	66	BSCCO
2004	USA	5/10	3	24.9/4.2	116/694	29	BSCCO
2004	Corée	1	1	22/6.9	44/152	65	BSCCO
2005	Japon	4	3	25/1.2/0.44	160/750/909	66	BSCCO
2005	Chine	0.63	3	10.5/0.4	35/904	77	BSCCO
2010	Japon	0.66	1	22/6.6	52.5/175	77	YBCO
2014	Japon	2	3	66/6.9	17.5/167	77	GdBCO conducteur
2014	New Zealand	1	3	11/0.4	30/1390	70	YBCO câble

Tableau I.2: Projets de transformateurs SHTC de 2003 à 2014 [Sta15]

I.8.2 Transport

◆ Le train à lévitation magnétique

La supraconductivité a trouvé aussi une grande place dans le domaine de transport est spécialement pour les systèmes de lévitation des trains (la sustentation électrodynamique). Le train à sustentation électrodynamique le plus rapide du monde est le *Maglev* au Japon. Ce train lévite à plusieurs centimètres au-dessus de ses rails (entre 10 et 15 cm), sans contact, grâce à une technologie utilisant de puissants champs magnétiques, créés par des bobines supraconductrices placées et refroidies à bord du train (voir Fig. I. 28). D'un notre coté, des électroaimants sont placés le long de la voie. Un courant est induit dans cette dernière lorsque le train se déplace. La force résultante fait léviter le train.

Caractérisé par son mode de fonctionnement à lévitation sans contact, le train à lévitation magnétique (*Maglev*) devrait être un moyen de transport idéal dans un avenir proche. En raison de ses avantages non négligeables: vitesse élevée, faible pollution, faible bruit et efficacité élevée, *Maglev* est étudié depuis plusieurs décennies dans plusieurs pays et des résultats encourageants ont été obtenus ces dernières années [Lee06], [Jin12].

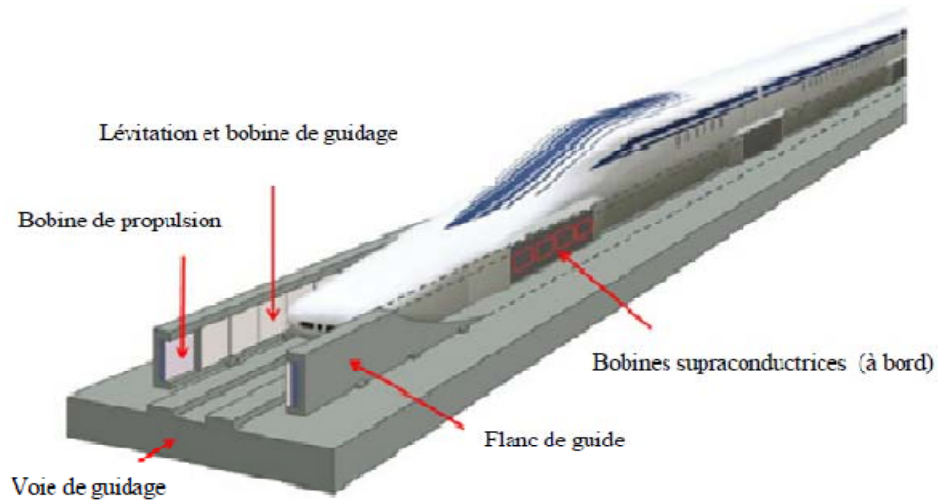


Figure I.28 : le *Maglev* au Japon à une vitesse de 600Km/h [Dum15]

Le tableau suivant regroupe les projets japonais réalisés et testés depuis 2003 ainsi que le futur projet qui relie *Tokyo* à *Osaka* sur une distance d'environ 400 Km.

Année	Région	Distance (Km)	Vitesse (Km/h)
2/12/2003	Yamanashi	40	581 (574.5 Km/h, TGV 2007)
21/04/2015	Prés de Mount Fuji (Piste de test)	1.8	603
Depuis 2014 ---Prévue en 2027 ---Prévue en 2037	Tokyo-Osaka 1 ^{ère} Tronçon : Tokyo-Nagoya 2 ^{ème} Tronçon : Nagoya-Osaka	410 286 -	500

Tableau I.3: Les projets japonais sur le *Maglev* (de 2003 au futur)

I.8.3 Machines électriques

La recherche et le développement sur la supraconductivité appliquée aux machines électriques ont débuté dans les années 1960 après que les chercheurs eurent développé des fils supraconducteurs pour courant continu avec des performances stables. La première machine fabriquée en 1967 était un alternateur entièrement supraconducteur utilisant des fils *NbTi*. Les machines à courant continu homo-polaires et les générateurs synchrones, dont l'application d'aimants supraconducteurs à courant continu refroidis à l'hélium liquide a donné de bons résultats [Nit17].

Maintenant que des supraconducteurs pouvant fonctionner à des températures assez élevées (77 K) ont été découverts, les applications des machines électriques tournantes sont en

augmentation. Celles-ci comprennent des générateurs et des moteurs synchrones, des machines à induction et de nouveaux concepts de machines. Lors de l'utilisation de supraconducteurs, les fils ou rubans, les masses, les couches minces, ... etc ont été examinés. Des études de recherche portent également sur plusieurs types de réfrigérants, notamment le *He* liquide, le *N₂* liquide, le *H₂* liquide, le *He* gazeux et le *Ne* gazeux. Par conséquent, résumer toutes ces avancées dépasse le cadre de ce manuscrit. Dans les applications de la supraconductivité dans les machines électriques, l'idée est de remplacer les différents éléments faits avec des matériaux classiques (ex : cuivre) par des supraconducteurs.

Dans notre travail, on s'intéresse à l'étude d'une machine synchrone supraconductrice. Un état de l'art sur l'application de la supraconductivité dans les machines synchrones sera présenté au chapitre II.

I.8.4 Stockage de l'énergie [Cic16]

Lorsqu'on refroidit un supraconducteur en dessous de sa température critique T_c , il présente une résistivité nulle. Un courant électrique peut alors circuler dans un bobinage supraconducteur court-circuité sans aucune dissipation par effet joule. Donc, une énergie magnétique est conservée quasiment indéfiniment. C'est le principe de stockage d'énergie par supraconducteur, couramment appelé **SMES** (*Superconducting Magnetic Energy Storage*). Sur la figure I.29, la bobine supraconductrice de stockage d'énergie est de forme solénoïdale.

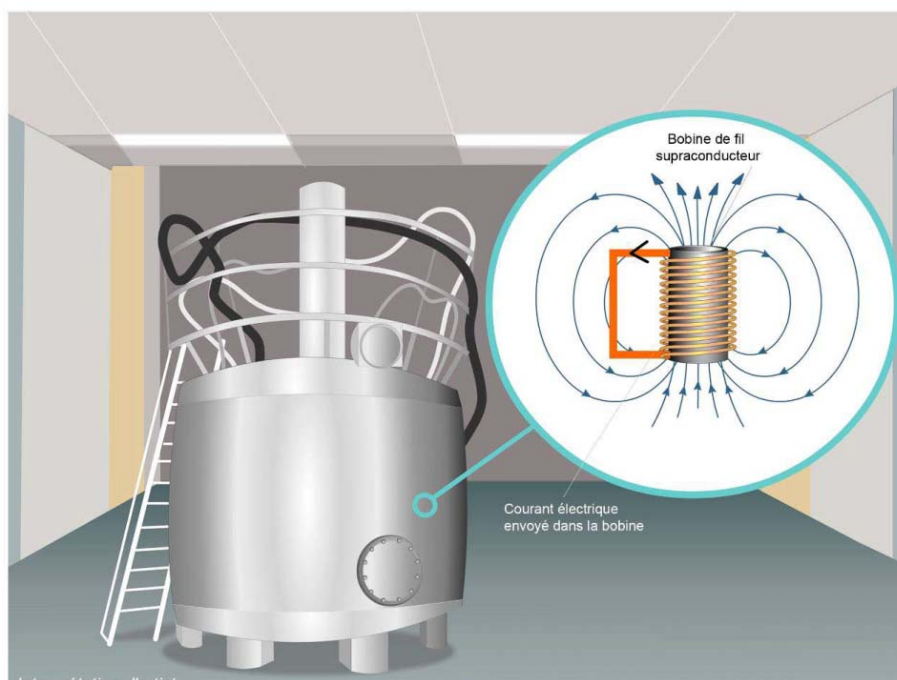


Figure I.29 : SMES avec topologie d'une bobine solénoïdale.

Dans le cas d'un conducteur supraconducteur isotrope, un *SMES* de topologie sous la forme solénoïde présente une énergie spécifique plus élevée que celle de la forme d'un tore de section circulaire [Svi80], [Moo82] et [Has89]. Ces deux topologies sont les plus classiques connues. Cependant, il existe d'autres formes [Nom99], [Vin01].

On peut envisager théoriquement des *SMES* avec *SHTc* à densités volumiques d'énergie environ 30 et 50 fois supérieures à celles des condensateurs actuels. Le **REBCO** (*Rare Earth, Barium, Copper Oxyde*) déposé en couches minces, disponibles commercialement sous la forme de rubans plats d'une centaine de microns d'épaisseur, est le supraconducteur le plus performant à ce jour. Ce matériau est généralement utilisé à une température de 4.2 K (bain d'hélium liquide), très inférieure à sa température critique (90 K), ce qui augmente sa capacité de transport de courant électrique.

I.8.5 Applications dans les laboratoires

◆ SQUID

Le dispositif d'interférence quantique supraconducteur (**SQUID**) est constitué de deux supraconducteurs séparés par de minces couches isolantes pour former deux jonctions Josephson parallèles (se manifeste par l'apparition d'un courant entre ces deux matériaux supraconducteurs, exactement dans les couches isolantes), comme le montre la figure I.30. Le dispositif peut être configuré comme un magnétomètre pour détecter des champs magnétiques suffisamment petits (seuil pour squid 10^{-14} T) pour mesurer les champs magnétiques dans des organismes vivants.

La majorité des squids utilisent des matériaux SBTC, Actuellement des squids utilisent des matériaux SHTC (cuprate) et fonctionnent à 77 K (température de l'azote liquide) commencent à être disponibles commercialement. Comme l'azote liquide étant plus facile à manipuler, ces appareils peuvent être utilisés en dehors du laboratoire puisque ils sont plus facilement transportables. Les squids (super-détecteurs) sont utilisés dans toutes les disciplines où des magnétomètres très performants sont indispensables : physique, médecine, archéologie, géologie...etc. Par exemple, les squids sont suffisamment sensibles pour mesurer l'activité magnétique d'un cerveau humain en temps réel, permettant des études très fines de *magnétoencéphalographie*.

Le schéma de principe d'un squid est illustré à la figure I.30 suivante :

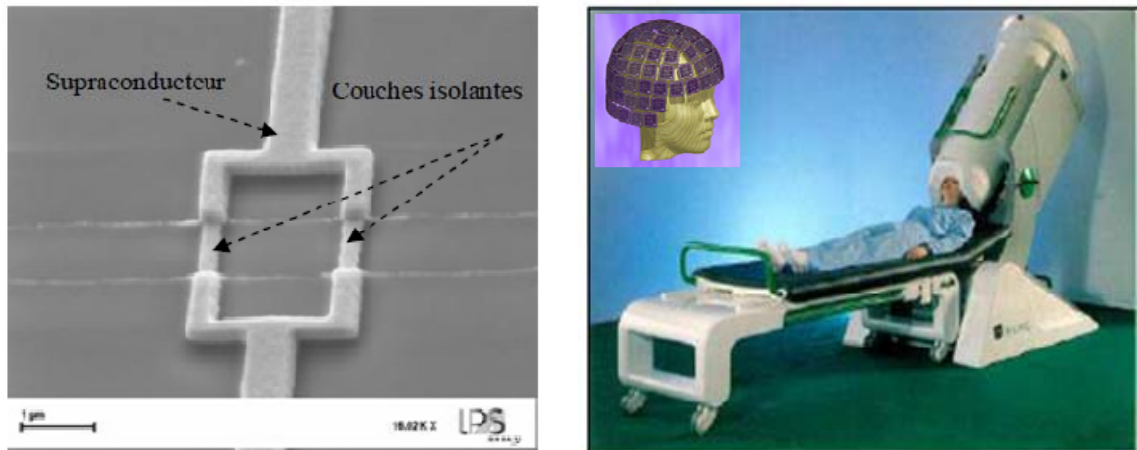


Figure I.30 : Schéma de principe d'un SQUID (à gauche), et utilisation d'un squid pour l'imagerie magnétique de l'activité cérébrale(à droite).

◆ Bolomètre

Le boblomètre à base de supraconducteur est un détecteur de rayonnement très sensible fonctionne à des très basses températures. Généralement, il est constitué d'un *absorbeur* et d'un *thermomètre* (voir Fig. I.31). Le thermomètre ultra-sensible est constitué d'un supraconducteur qu'on maintient à une température juste en dessous de sa température critique T_c (un matériau avec T_c d'ordre 0.02 à 0.3 K, est généralement choisi).

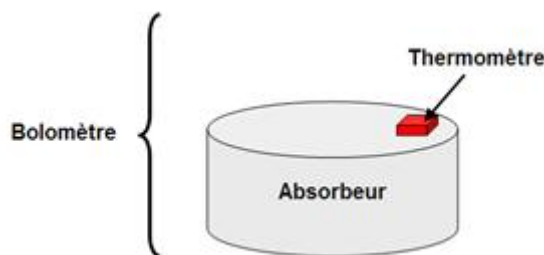


Figure I.31: Schéma de principe d'un Bolomètre ; le thermomètre est à base des supraconducteur.

L'exposition de l'absorbeur à un rayonnement de certaine énergie provoque un échauffement local des atomes, cet échauffement qui se traduit par une faible augmentation de la température d'ordre $1\mu\text{K}$ (*un millionième de degré Kelvin*) peut être mesurée par le thermomètre supraconducteur.

La mesure de rayonnement par le bolomètre n'est pas directe mais elle passe par la mesure du changement de la valeur de résistance du supraconducteur lorsqu'elle passe de zéro à une

valeur mesurable. Le supraconducteur est échauffé par le rayonnement, ce qui provoque une transition du matériau de l'état supraconducteur vers l'état normal (métal normal).

Les bolomètres sont utilisés dans de nombreuses expériences d'astrophysique ou d'astroparticules.

I.9 Conclusion

Dans cette première partie, on est familiarisé avec la découverte de la supraconductivité. Ce phénomène qui a attiré l'attention de différents chercheurs au monde grâce à sa propriété de transporter des courants élevés sans pertes (résistance nulle), de piéger et ainsi d'écranter des champs magnétiques (effet *Miessner*). Ces propriétés sont exploitées dans différents domaines industriels comme le transport d'électricité, trains à lévitation, domaine médical et plusieurs autres domaines. Des détails sur quelques applications sont présentés afin de montrer l'avantage pratique des supraconducteurs par rapport aux autres matériaux conventionnels, d'une part, et d'éclaircir le futur chemin de la supraconductivité d'une autre part.

Les caractéristiques intéressantes de l'YBCCO et BSCCO sont profondément détaillées pour but de les utiliser au développement de notre modèle de la machine synchrone supraconductrice aux prochains chapitres.

Chapitre II

Machines Synchrones Supraconductrices : Etat de l'Art

Table des matières du chapitre II

II.1 Introduction	41
II.2 Machines synchrones supraconductrices	41
II.2.1 Machines synchrones avec rotors supraconducteurs	41
a. Machines synchrones à pôles saillants	42
b. Machines synchrones à réluctance variable.....	44
II.2.2 Machines synchrones avec stators supraconducteurs	50
II.2.3 Machines synchrones entièrement supraconductrices	51
II.3 Machine supraconductrices de nouvelles topologies	52
II.4 Pertes AC dans les machines supraconductrices	54
II.5 Technologie des matériaux et de la cryogénie	55
II.6 Objectif de la thèse	56
II.7 Conclusion	57

II.1 Introduction

L'histoire de la supraconductivité a débuté dans les années 1911. En électrotechnique, le NbTi a été le premier matériau à basse température critique utilisé dans la réalisation d'une machine supraconductrice en 1967. Avec la découverte et le développement des matériaux supraconducteurs à haute température critique, la machine supraconductrice est devenue une très importante direction de recherche dans le domaine des machines électriques. En raison de la faible perte résistive des enroulements, de la densité de puissance élevée, de la petite taille de la machine et du rendement élevé, la machine supraconductrice est avantageuse par rapport à la machine conventionnelle.

Actuellement, la majorité des machines supraconductrices réalisées ou étudiées sont des machines synchrones. Un état de l'art sur le développement de la machine synchrone à base d'éléments supraconducteurs est présenté dans cette partie afin de montrer l'impact de la supraconductivité sur les propriétés de la machine et le niveau d'intégration de ce type dans le domaine industriel.

II.2 Machines synchrones supraconductrices

Cette catégorie de machines supraconductrices regroupe généralement la majorité des machines réalisées (environ 90%), dont différentes structures ont été envisagées. Ces machines reposent sur l'utilisation des éléments supraconducteurs pour la conception de la partie fixe ou tournante dont le but d'augmenter les performances de ces machines. Pour cette raison, ces machines synchrones peuvent être regroupées en trois familles essentielles :

- Machines avec rotors supraconducteurs
- Machines avec stators supraconducteurs
- Machines entièrement supraconductrices

II.2.1 Machines synchrones avec rotors supraconducteurs

La majorité de ces machines supraconductrices, à flux radial, ont été conçues pour des applications marines ou éoliennes [Alh15]. De ce fait, la vitesse de rotation de ce type de machine est relativement lente. La structure de ces machines est similaire à celle des machines conventionnelles. Cependant, la partie tournante est réalisée à l'aide de matériaux supraconducteurs. Parmi ces types de machines, on distingue ; les machines à pôles saillants et les machines à réluctance variable.

a. Machines synchrones à pôles saillants

Dans le cas des machines synchrones supraconductrices industrielles, la structure la plus prépondérante est celle à inducteur tournant supraconducteur à pôles saillants. L'idée est de remplacer l'enroulement à courant continu (en cuivre) de l'inducteur d'une machine classique par des bobines supraconductrices. Tandis que, l'induit du stator est formé d'une armature classique en cuivre.

La structure des machines à inducteur supraconducteur et induit classique demeure la plus répandue pour les machines de forte puissance. L'association d'un cryostat mobile à l'inducteur nécessite l'utilisation des joints tournants de type ferro-fluide [Neu06]. Cependant, la conception du cryostat, qui assure le maintien thermique des supraconducteurs, ainsi que l'alimentation des bobines supraconductrices restent compliquées. Pour les simplifier, des machines à structure inversée avec induit tournant et inducteur fixe externe sont proposés par des laboratoires universitaires ou industriels Japonais en considérant une cryogénie fixe [Hos94] [Iwa07]. Néanmoins, cette structure montre une réduction dans la puissance maximale de la machine.

Les générateurs et moteurs supraconducteurs sont avantageux car ils présentent un important gain en compacité (poids et volume) et de bonnes performances dynamiques [Alh15]. De plus, ils sont particulièrement intéressants pour le domaine militaire (les navires).

Le moteur supraconducteur le plus puissant est construit par la compagnie American Superconductors (AMS) avec une puissance de 36.5 MW à 120 tr/min (Fig. II.1); principalement pour des applications dédiées à la marine [Gam11]. Ce moteur qui possède 08 paires de pôles donne un bon rendement et un gain de plus de 50% en terme de compacité.



Figure II.1: Moteur SHTC (36.5 MW), produit par AMS pour la propulsion de navires.

Le tableau suivant regroupe les moteurs synchrones supraconducteurs à pôles saillants de 15 KW et plus, destinés à la propulsion marine, entre l'année 2000 et 2010.

Pays	Organisme	Puissance	Type de matériau	Référence
Allemagne	Siemens	400 kW	BSCCO	[Fra03]
Etats-Unis /France	AMSC & Alstom	5 MW	BSCCO	[Sni05, Woo05]
Japon	- Fuji Electric - Japan motor - Univ. de Kyushu	15 kW	YBCO	[Iwa07]
Etats-Unis	AMS	36,5 MW	SHTC	[Gam11]
Angleterre/France	Converteam : Rugby Nancy	250 kW	BSCCO	[Mou10]
Allemagne	Siemens	4 MW	BSCCO	[Nic10]

Tableau II.1 : Moteurs Synchrones SHTC à pôles saillants ≥ 15 KW (années 2000-2010).

Ces types de moteurs sont refroidis généralement par la circulation de gaz via le cœur du rotor (condamnation d'une sortie d'arbre), donc les bobines supraconductrices sont refroidies par conduction. D'après le tableau II.1, la majorité des moteurs supraconducteurs sont réalisés avec le BSCCO à haute température critique (HTC), et ils sont refroidis à des températures inférieures à celle de l'azote liquide (20 K - 45 K). Toutefois, des projets sont lancés pour la conception est la réalisation de moteurs avec le YBCO 2G malgré qu'il est difficile d'avoir des fils longs avec ce matériau [Iwa09].

Dans le cas des alternateurs synchrones supraconducteurs, la structure dominante est constituée d'un induit fixe et un inducteur supraconducteur tournant (cryostat mobile). Les inducteurs de ces alternateurs sont réalisés à l'aide de NbTi ou BSCCO (tableau II.2).

L'application envisagée pour les alternateurs SHTC à pôles saillants de forte puissance est essentiellement la production d'énergie. Le tableau II.2 regroupe les différentes réalisations de ces machines entre 1990 et 2010.

Pays	Organisme	Puissance	Type de matériau	Référence
Corée/Japon	KERI, DEEE	30 KVA	NbTi	[Bai00, Chu02]
Corée	KERI	3 kVA	BSCCO	[Jo02]
Etats-Unis	General Electric (GE)	1.5 MVA	BSCCO	[Urb04]
Royaume-Unis	Univ. de Southampton	100 kVA	BSCCO	[Alm08, Alm05]
Allemagne	Siemens	4 MVA	BSCCO	[Nic07]

Tableau II.2: Générateurs synchrones SHTC à pôles saillants (années 1990-2010).

La compagnie allemande, Siemens, a proposé une génératrice à pôles saillants de 4 MVA avec une vitesse de 3600 tr/min dont l'inducteur en BSCCO est refroidi à l'aide de l'hélium ou de néon gazeux [Nic07]. Cette machine bipolaire est destinée particulièrement à des applications de production d'énergie au sein des navires, figure II.2.



Figure II.2: Banc d'essais d'une génératrice SHTC (4 MVA) produit par Siemens [Nic07].

b. Machines synchrones à réluctance variable

La machines synchrone à réluctance variable possède un stator identique à celui d'une machine à induction où des bobines triphasées en cuivre sont logées dans des encoches. Cependant, le rotor de la machine présente plusieurs géométries ; massif, à barrière de flux, avec assistance des aimants et également avec présence du supraconducteur [Mar16], figure II.3.

<p>Rotor massif (a)</p>	<p>Barrière de flux (b)</p>	<p>Avec assistance d'aimants (c)</p>	<p>Avec assistance de supraconducteur (d)</p>

Figure II.3: Différentes géométries de rotor de la machine à réluctance variable.

Le couple de la machine à réluctance est proportionnel à la différence des inductances d'axe d et d'axe q , figure II.3, cette différence est liée aux perméabilités magnétiques suivant les deux axes (transversal et longitudinal). Comme le rotor a une anisotropie géométrique, elle apparaît une variation de réluctance qui fait que le rotor suit continuellement le champ tournant (FMM) créé par le bobinage du stator [Ham09].

La différence entre les géométries a , b , c et d du rotor à la figure II.3 est dans le type de matériau utilisé selon l'axe q . Dans une machine à réluctance variable classique, cette différence est réalisée par le biais d'alternances entre des matériaux ferromagnétiques et amagnétiques (aluminium, air) ou aimant comme le montre la figure II.3a, II.3b et II.3c respectivement. Par contre dans la figure II.3d, l'alternance est faite à l'aide du matériau ferromagnétique et de supraconducteur.

La présence de supraconducteur massif qui fonctionne comme un isolant magnétique empêche le passage de flux dans l'axe q ce qu'il réduit considérablement l'inductance L_q toute en conservant l'inductance dans l'axe d , ce qui se traduit par une augmentation de la différence entre L_d et L_q ou bien dans le rapport de saillance. Selon ce principe et à base des matériaux supraconducteurs, la machine à réluctance a connue des améliorations très impressionnantes.

Dans les années 1990, Une série de moteurs à réluctance variable a été étudiée dans des laboratoires par des chercheurs russes et allemands. Le stator de ces moteurs est conventionnel (en cuivre) tandis que le rotor possède plusieurs topologies à base d'éléments SHTC. La puissance de ces moteurs est entre 1 et 20 KW à 50 Hz [Osw99], [Kov00], [Kov01]. Quelques années plus tard, cette puissance a atteint des valeurs remarquables 25 KW [Kov02], 100 KW [Kov06] et 200 KW [Osw05]. Ces moteurs utilisant des matériaux SHTC sous la forme massive en BSCCO ou YBCO dans le rotor (fig. II.4) ont été testés avec succès. Vers l'année 2010, un autre moteur supraconducteur à réluctance variable de 1.3 KW a été testé en Ukraine avec succès [Prik09], dont le rotor est réalisé d'un matériau SHTC de forme massive en MgB_2 .

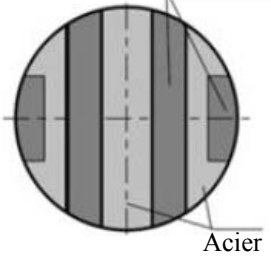
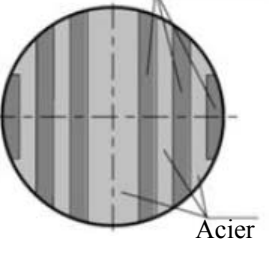
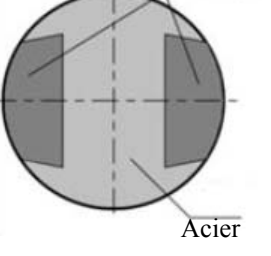
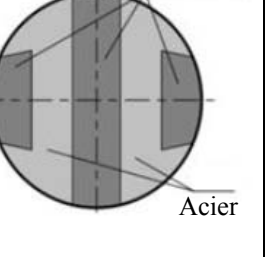
 <p>Plaques épaisses Acier</p>	 <p>YBCO massifs Acier</p>	 <p>YBCO massifs Acier</p>	 <p>YBCO massifs Acier</p>
<p>Type « Zebra » avec des plaques larges en BSCCO (a)</p>	<p>Type « Zebra » avec des plaques fines en YBCO (b)</p>	<p>Type « Pilz » avec deux pastilles en YBCO (c)</p>	<p>Type « Zelz » avec trois pastilles en YBCO (d)</p>

Figure II.4: Différents types de rotors du moteur supraconducteur à réluctance variable.

Les résultats de recherches avec les types de rotors, présentés à la figure II.4, montrent que les meilleurs paramètres des moteurs à réluctance variable SHTC à puissance de sortie élevée (100 kW et plus) peuvent être atteints pour le rotor de type «Zebra» [Kova02]. Ces nouveaux types de moteurs SHTC avec éléments supraconducteurs sous forme des bulks YBCO dans le rotor, fonctionnent à la température de l'azote liquide (77K), permettent d'augmenter le rapport puissance-masse de 2 à 5 fois celle des moteurs conventionnels [Kova01].

Chez OSWALD un moteur supraconducteur à réluctance variable de 150 kW a été construit, figure. II.5.

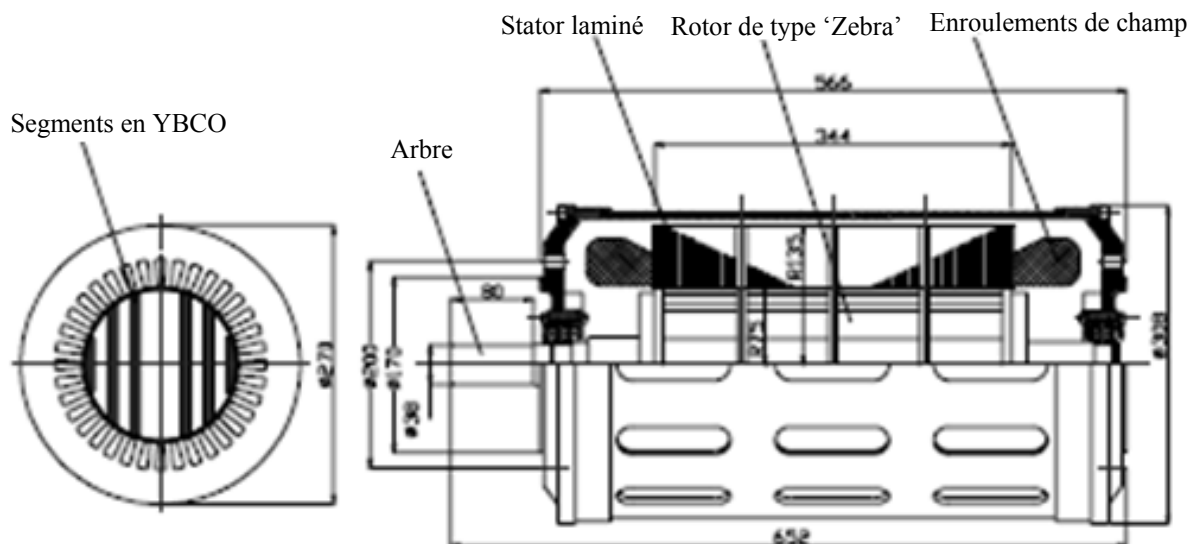


Figure II.5: Design d'un Moteur à réluctance SHTC de 150 KW et 3000 tr/min (rotor « Zebra » en YBCO) [Osw02].

Le rotor de conception « Zebra » avec des plaques d'YBCO épais (Fig. II.5), améliore l'effet de blindage et il est plus facile à fabriquer. Le stator en cuivre est en outre optimisé pour le fonctionnement de rotor supraconducteur à réluctance refroidis à l'azote liquide. Les résultats des essais sur ce moteur à réluctance supraconducteur à la température de l'azote liquide présentent une densité de force et de couple spécifique par volume par un facteur allant jusqu'à trois par rapport aux moteurs asynchrones conventionnels ou machines synchrones à aimants permanents [Osw02].

Chu et Torii ont proposé un type de moteur synchrone à réluctance variable [Chu05]. Ils ont étudié pour un même stator conventionnel en cuivre, quatre types de rotors : un rotor saillant, un rotor en aluminium, un rotor en plastique et un rotor en DyBCO (bulk supraconducteur), figure II.6. Chaque rotor a un diamètre de 38 mm et une longueur axiale de 35 mm, dans lequel les fentes en aluminium, en plastique ou en DyBCO occupent environ 37% du volume total du rotor.

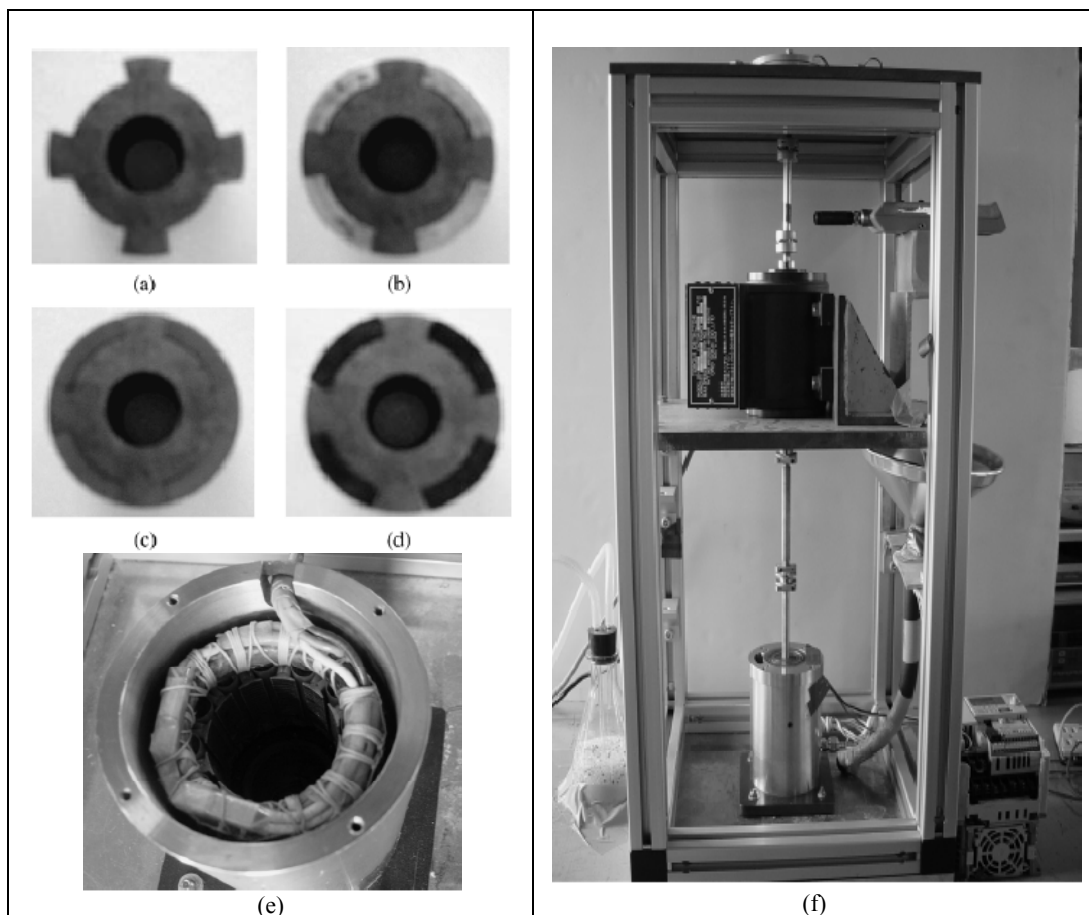


Figure II.6: Moteur synchrone à réluctance avec différentes structures du rotor : (a) rotor saillant; (b) rotor avec aluminium; (c) rotor avec plastique; (d) rotor avec bulk en DyBCO ; (e) stator conventionnel ; (f) dispositif expérimental [Chu05].

Les quatre types de moteurs sont fabriqués et refroidis dans l'azote liquide (77 K). Le bulk en DyBCO possède des propriétés diamagnétiques, les caractéristiques de sortie de ce type de moteur sont améliorées. Il présente un couple d'environ 1,5 à 2 fois plus élevée que les autres au même courant et pour deux valeurs de fréquences 25 et 50 Hz. Comme les pertes de bobinage triphasé dans le stator sont très importantes, l'efficacité des quatre moteurs est faible. Cependant, au même courant, l'efficacité du moteur en DyBCO est environ deux fois plus grande que celle des autres.

Un autre moteur à réductance variable supraconducteur de petite taille a été étudié par *Qiu et al* [Qiu05]. Le moteur bipolaire de 150 W, est constitué d'un stator en cuivre et d'un rotor avec bulk en YBCO. Une enquête expérimentale a été réalisée sur ce prototype de moteur dans la température de l'azote liquide (77 K). Ce moteur présente une efficacité supérieure et une taille réduite, comparant cela avec un moteur classique synchrone à réductance de même structure qui utilise l'aluminium comme barrière de flux dans le rotor. Ces performances présentées, rendent ces moteurs très attractifs pour des applications telles que les pompes cryogéniques et les entraînements à volant d'inertie.

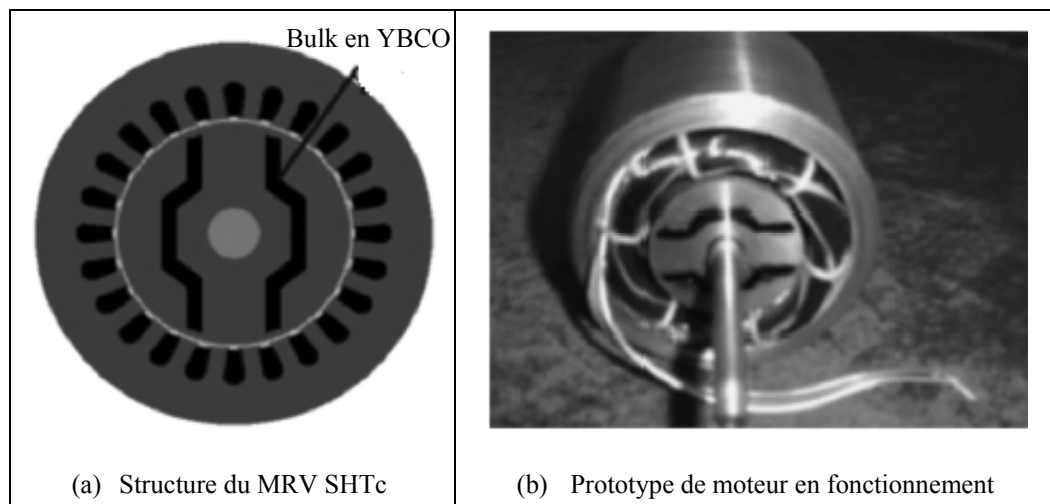


Figure II.7: Moteur à réductance variable supraconducteur : Rotor avec bulk en YBCO [Qiu05]

Un moteur à reluctance variable supraconducteur de 200 kW a été conçu, construit et testé par *Oswald et al* [Osw05]. Le moteur bipolaire de type SRE150-340 se compose d'un stator avec 300 mm de diamètre extérieur et une longueur active de 320 mm. Le rotor, constitué d'un empilement de segments YBCO et du fer, tourne dans des roulements à billes exposées à l'azote liquide. Les enroulements du stator (enroulements à champ tournant) sont faits de fil en cuivre, et les tôles de stator (dents et culasse) consistent en faible perte fer avec un degré de saturation magnétique élevé. Le moteur est totalement immergé dans l'azote

liquide à 77 K. Ce système de refroidissement du moteur présente l'avantage d'une réduction des pertes ohmiques dans les enroulements de cuivre du stator par un rapport de 1/5. Dans ces conditions de fonctionnement, la densité de courant dans les enroulements de cuivre pourrait même être augmentée jusqu'à 25 A/mm^2 , qui est en fait environ quatre fois plus qu'à la température ambiante [Osw00]. Une photographie du moteur est finalement construite comme le montre la figure II.

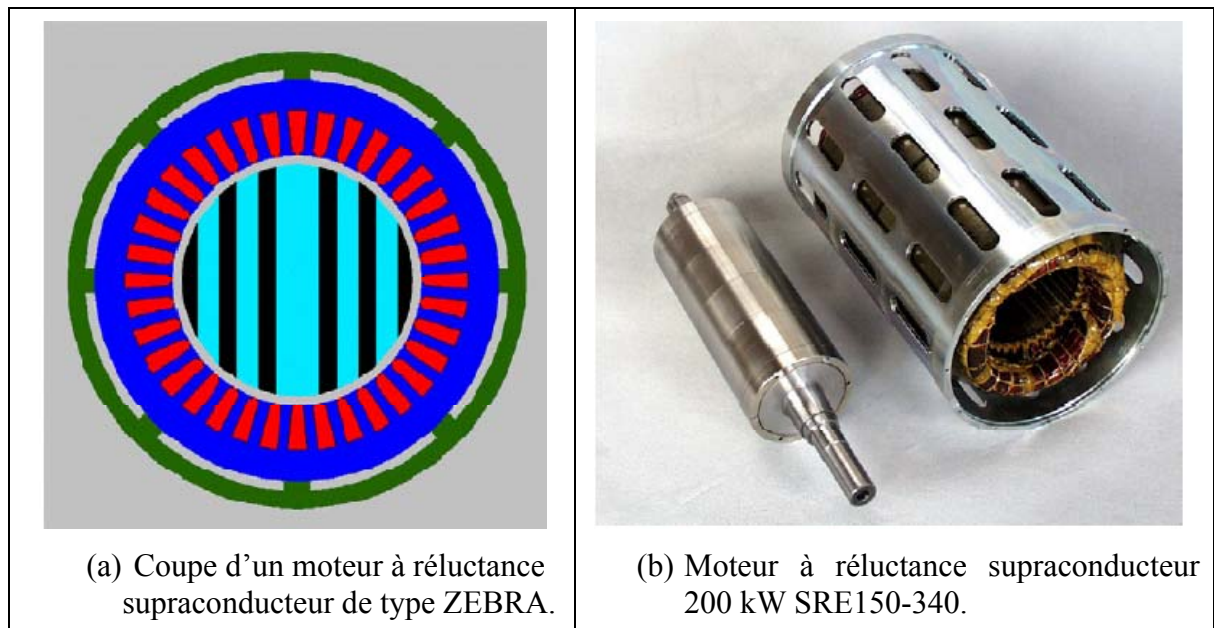


Figure II.8: Moteur à réluctance variable supraconducteur 200 KW : le diamètre et la longueur active du rotor sont 148 mm et 320 mm respectivement ; le diamètre extérieur du moteur 350 mm. [Osw05]

Tous les tests du moteur ont été effectués à une fréquence fixe de 50 Hz. Le couple maximal atteint par ce moteur est de 600 Nm, ce qui correspond à 188 kW à 3000 t/min. Cette structure du moteur présente une efficacité supérieure à 90% avec un facteur de puissance maximale entre 0,5 et 0,7. Les résultats expérimentaux indiquent que les performances de ces moteurs à réluctance peuvent être encore améliorées, en particulier en ce qui concerne le facteur de puissance. D'autre part, la puissance maximale atteinte est de loin supérieure à celle des moteurs conventionnels. En tant que facteur caractéristique de la densité de puissance, on utilise la densité de force associée à la surface active du rotor. La puissance maximale de 200 kW correspond à une densité de force de 6 N/cm^2 (force par unité de surface de rotor). C'est environ trois fois plus que dans les moteurs conventionnels de la même gamme de puissance et à la même vitesse. Cette valeur spécifique indique également la forte dynamique de moteur supraconducteur à réluctance qui est d'une importance critique pour certaines applications industrielles.

II.2.2 Machines synchrones avec stators supraconducteurs

Les développements des technologies des matériaux SHTC et l'amélioration de leurs performances, l'évolution constante du dispositif d'électronique de puissance à haute efficacité ainsi que la technologie de réglage de la vitesse des machines à courant alternatif, rendent la propulsion électrique supraconductrice à courant alternatif plus intéressante. La forme la plus courante de machines supraconductrices à courant alternatif est le moteur synchrone SHTC.

Un groupe de recherche et de développement financé par l'Organisation pour le développement de technologies nouvelles et industrielles (NEDO) a développé un moteur synchrone SHTC de 15 kW basé sur l'YBCO tape. Ce moteur synchrone utilise des bobines de champ SHTC stationnaires et un rotor conventionnel à enroulement en cuivre. La figure II.9(a) montre le cryostat qui contient un enroulement de champ supraconducteur, l'armature tournante et le moteur assemblé sur un banc d'essai, Figure II.9(c) et Figure II.9(d) respectivement. La figure II.9(b) montre une bobine d'excitation de champ YBCO en forme de piste de course. Les spécifications du moteur synchrone SHTC de 15 kW sont présentées dans le tableau II.3.

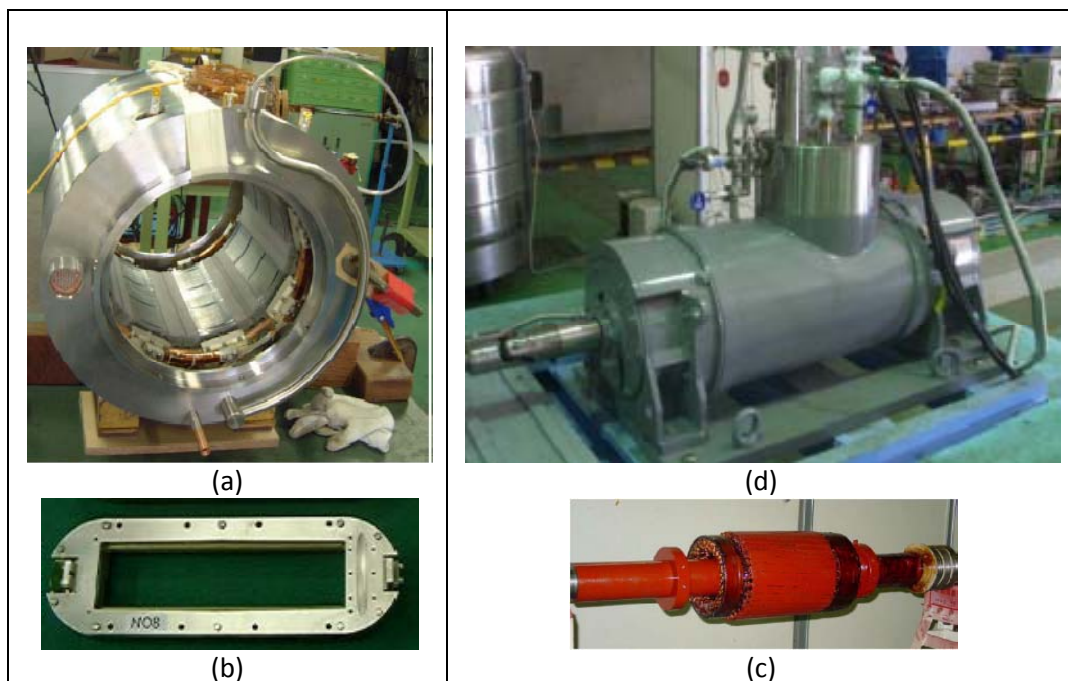


Figure II.9: Moteur synchrone supraconducteur 15 KW [Iwa07] ; (a) cryostats contient les bobines de champ SHTC; (b) bobine SHTC en YBCO sous forme de piste de course « recetrack »; (c) rotor conventionnel; (d) moteur complet.

Désignation	Valeur
Puissance nominale	15 KW
Vitesse de rotation	360 tr/min
Couple nominal	398 N.m
Nombre de pôles	08
Courant d'excitation	280 A
Température de fonctionnement	20-30 K

Tableau II.3: Caractéristiques du moteur synchrone SHTC 15 KW [Iwa07].

II.2.3 Machines synchrones entièrement supraconductrices

Un design d'un moteur synchrone SHTC a été conçu par le groupe de la supraconductivité EPEC de l'Université de Cambridge en 2007 [Jia07]. Le stator utilise six bobines de forme « pancake » bobinées à partir de rubans SHTC 2G produits par AMSC (Fig. II.10(b)), alors que le rotor contient 75 éléments SHTC sous forme de bulks, figure II.10(a). Les rondelles en YBCO dans le rotor sont utilisées à la place des bobines en cuivre classiques à noyau de fer, ce qui permet de réduire le poids et les pertes d'énergies. Cette topologie de rotor produit une densité de flux magnétique d'environ 0.4 T et une densité de courant de 100 A/mm² à 77 K.

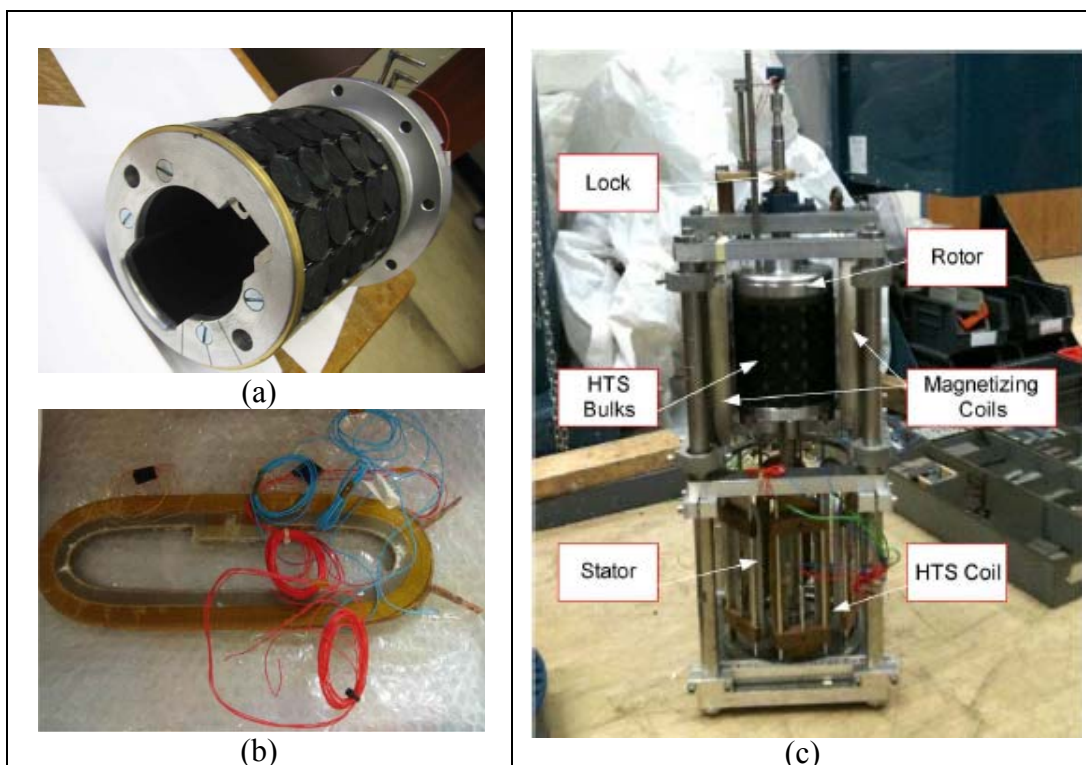


Figure II.10: Moteur synchrone supraconducteur 7.8 KW [Xia11]; (a) rotor avec Bulks SHTc; (b) forme de bobine SHTC ; (c) prototype expérimental de moteur SHTC.

Tous les matériaux supraconducteurs dans ce moteur (Fig. II.10) sont refroidis à l'azote liquide (77 K). Les bobines statoriques sont montées dans des fentes d'un matériau isolant et non magnétique. Chaque phase, fabriquée sous la forme d'une bobine à crêpes, est répartie dans des fentes espacées de 60 degrés.

Ce moteur supraconducteur à aimant permanent a été étudié expérimentalement en 2010 [Xia11]. L'aimantation à champ pulsé (PFM) est l'astuce utilisée pour l'aimantation des bulks du rotor. Cette structure du moteur SHTC fournie un couple maximal de 49,5 Nm et une puissance maximale de 7,8 kW (fréquence 50 Hz) avec une faible vitesse de rotation de 150tr/min [Hua13]. Le prototype expérimental du moteur SHTC est montré à la figure II.10(c).

Un autre prototype d'un moteur synchrone entièrement supraconducteur a été proposé en 2013[Kaj13]. Le stator du moteur fabriqué avec des fils MgB2 a été testé. Pour effectuer des tests de rotation du moteur avec stator composé de 12 bobines SHTC de forme recteck, un rotor supraconducteur en MgB2 a été utilisé [Nak12a] [Nak12b]. L'ensemble du stator en MgB2 et du rotor forme une sorte de moteur totalement supraconducteur.

II.3 Machine supraconductrices de nouvelles topologies

L'inducteur des machines synchrone reste toujours l'élément le plus conçu avec les matériaux supraconducteurs. Nous avons vus précédemment que la plupart des inducteurs réalisés sont de topologies identiques à ceux à pôles saillants dont les matériaux conventionnels en cuivre ont été remplacés par des supraconducteurs massifs ou filaires. Dans cette partie on va présenter de nouvelles topologies des inducteurs supraconducteurs des machines synchrones.

Le GREEN en France est l'un des laboratoires qui s'intéressent particulièrement au développement des nouvelles structures des machines supraconductrices. Selon le principe de fonctionnement, ces machines SHTC sont dites : *machines à barrière de flux*.

Ces structures utilisent les propriétés d'écrantage des matériaux supraconducteurs massifs pour moduler et concentrer un champ produit par des bobines alimentées par un courant électrique, ce principe ressemble à celui des machines à réluctance variable.

Le premier concept de ces topologies est constitué de deux solénoïdes supraconducteurs, avec de NbTi à basse température, alimentés par des courants continus inversés (70 A) et des pastilles supraconductrices en YBCO insérées dans l'espace entre ces deux solénoïdes, figure II.11(a). Le champ magnétique créé est modulé autour de l'inducteur

par les bulks SHTC. Cette conception basée sur le principe de concentration de flux a été étudiée par [Mas03] [Ail06] et ensuite des essais d'un moteur synchrone (25 KW, 750 tr/min) basé sur ce principe ont été réalisés au laboratoire GREEN à Nancy, figure II.11(b).

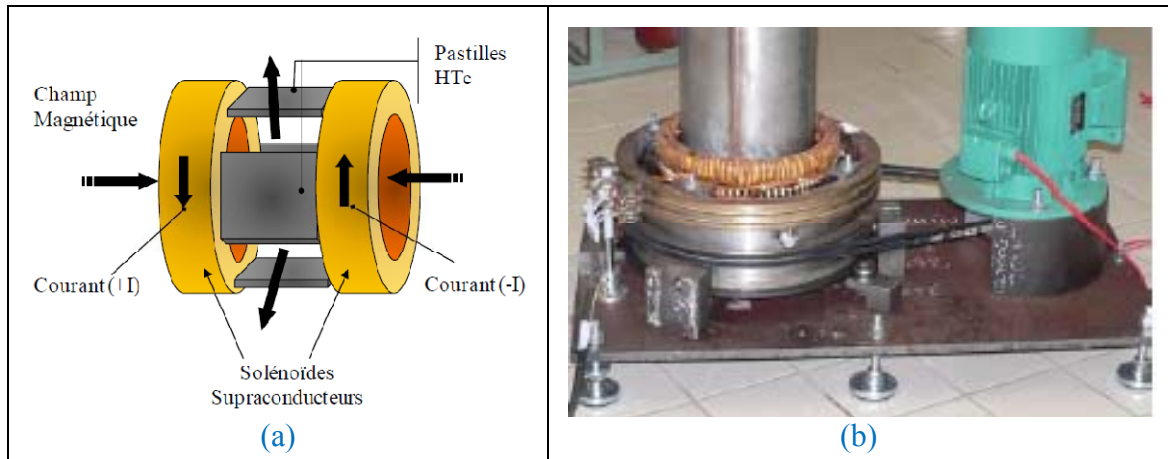


Figure II.11: Moteur synchrone supraconducteur à modulation de flux ; (a) schéma de l'inducteur; (b) le moteur sur le banc d'essai.

Comparant à cette conception, une deuxième topologie de l'inducteur présentée au GREEN [Mou10] reste composer de deux solénoïdes supraconducteurs à basse température (NbTi), mais alimentés dans le même sens ce qu'il génère des champs magnétiques dans la même direction axial, figure II.12(a). Ce champ est ensuite dévié vers la direction radiale par la pastille supraconductrice qui joue dans ce cas le rôle d'un écran magnétique incliné. Une structure de machine synchrone à une paire de pôles est alors obtenue, l'assemblage de l'induit en cuivre et de l'inducteur supraconducteur est montré à la figure II.12(b). Une densité de courant de 650 A/mm^2 a été considérée au fil conducteur en NbTi, dont un entrefer de 10 mm est le siège d'une induction magnétique moyenne de 2T. La machine a été refroidie par un système cryogénique à l'hélium liquide, cela nécessite la réalisation d'un cryostat particulier pour assurer un refroidissement efficace. En suite, cette machine a été testée dans le laboratoire GREEN [Alh15], figure II.12(c).

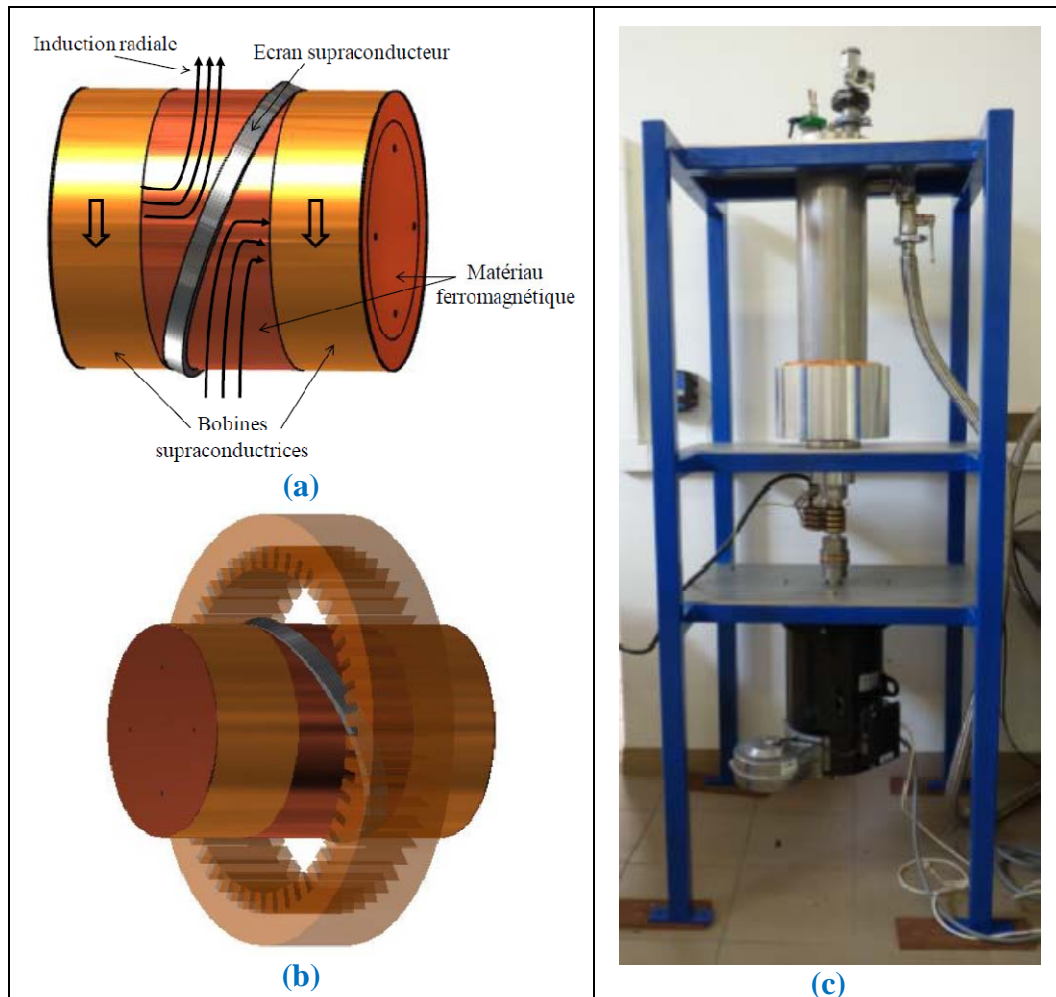


Figure II.12: Machine synchrone supraconductrice à déviation de flux ; (a) schéma de principe de l'inducteur; (b) assemblage de l'induit et l'inducteur ; (c) le moteur sur le banc d'essai.

Les deux machines à barrière de flux, figure II.11 et II.12, présentent des topologies de rotor atypique où la principale limite technologique à leur réalisation reste la conception de pastilles supraconductrices de grandes tailles avec un haut niveau d'écrantage.

II.4 Pertes AC dans les machines supraconductrices

Les supraconducteurs ont été développés pour être utilisés dans des dispositifs de grande puissance tels que les moteurs et générateurs comme nous avons vu précédemment. Les supraconducteurs doivent satisfaire plusieurs exigences pour concurrencer les conducteurs normaux actuellement utilisés (comme le cuivre).

L'utilisation d'un fil supraconducteur dans un système d'alimentation en courant alternatif est toutefois compliquée par les interactions dissipatives qui se produisent lorsqu'un supraconducteur subit des courants et / ou des champs magnétiques variant dans le temps.

Cela se traduit par des pertes alternatives dues au mouvement des vortex de flux magnétiques dans le matériau supraconducteur. La quantité totale d'énergie dissipée dans un supraconducteur (pertes AC) est la somme des pertes de magnétisation et les pertes de courant de transport. Ces deux types de pertes peuvent être subdivisées en divers composants qui dépendent généralement du type de matériau supraconducteur utilisé et de la manière dont il est présenté (masse, conducteur revêtu, ruban multi-filament, etc.).

Les pertes de magnétisation sont dues aux variations du champ magnétique dans lequel le supraconducteur est immergé, tandis que les pertes de transport sont dues à la variation du courant de transport dans le supraconducteur.

Les pertes en courant alternatif devraient être suffisamment faibles pour justifier l'investissement supplémentaire dans le supraconducteur et l'équipement de refroidissement. Généralement, ces pertes AC sont beaucoup plus faibles que les pertes résistives dans un conducteur conventionnel dans les mêmes circonstances. Néanmoins, la prédiction des pertes de courant alternatif est nécessaire pour une bonne conception et fonctionnement des dispositifs électromagnétiques.

II.5 Technologie des matériaux et de la cryogénie

La prise en compte des matériaux supraconducteurs dans la conception des machines électriques améliore efficacement les performances de ces machines, d'après ce que nous avons cité dans cette partie, la machine supraconductrice à pôle saillant occupe une place importante dans le têt de réalisation des machines supraconductrices depuis 1990 (surtout à des puissances >100 KW), suivie par la machine supraconductrice à réluctance variable (20%), tableau II.4.

Type de machines supraconductrices réalisées	Machine à pôle saillant	Machine à Réluctance Variable	Autre type de machines
Pourcentage	35%	20%	31%
Puissance >100 KW	71%	8%	21%

Tableau II.4: Répartition des machines SHTC réalisées depuis 1990 [Alh15] [Mal12].

Parmi les 80 types des machines supraconductrices réalisées (tableau II.4), 43% de ces machines sont fabriquées à l'aide de matériaux supraconducteurs massifs dont 90% est en YBCO massif, tandis que seulement environ 35% de ces machines sont fabriquées avec des supraconducteurs filaires dont environ 85% en BSCCO, tableau II.5.

Type de matériau SHTC		Pourcentage d'utilisation		
		Totalité de machines réalisées	Machines avec matériaux SHTC massifs	Machines avec matériaux SHTC filaires
Massif	YBCO	43%	90%	
	BSCCO	4%	8%	
	MgB ₂	1%	2%	
Filaire	YBCO	9%		5%
	BSCCO	35%		85%
	NbTi	5%		6%
	Autre	3%		4%

Tableau II.5: Répartition des matériaux supraconducteurs utilisés dans la réalisation des machines supraconductrices depuis 1990 [Alh15] [Mal12].

Le type de fluide cryogénique, utilisé pour le refroidissement des éléments supraconducteurs dans les machines électriques, est la base du système de refroidissement cryogénique. Le tableau II.6, regroupe quelques types de fluides cryogéniques les plus utilisés dans l'ensemble des machines électriques ayant des puissances supérieures à 100 KW.

Type de fluide cryogénique	Azote liquide	Hélium liquide	Hélium gazeux	Néon
Pourcentage	23%	4%	32%	41%
Marge de température	63-77K	4.2K	20-40K	25-35K

Tableau II.6: Fluides cryogéniques utilisés dans le refroidissement des machines supraconductrices (>100 KW) [Dou16] [Mal12].

A haute température critique, l'azote liquide représente une part importante dans le système de refroidissement des machines électriques, du fait de sa simplicité de mise en œuvre, de sa disponibilité et de son coût raisonnable.

La majorité des machines supraconductrices à pôle saillant reposent sur des systèmes cryogéniques tournants pour leurs refroidissements. Ces derniers sont plus compliqués comparant ceux-ci avec ceux à cryogénie fixe. Néanmoins, le refroidissement par immersion de machine complète dans un bain d'azote reste une solution plus simple.

II.6 Objectif de la thèse

Après avoir présenté les matériaux supraconducteurs et leurs applications, particulièrement dans le domaine des machines électriques, nous avons montré l'efficacité de cette nouvelle technologie des matériaux supraconducteurs pour l'amélioration des performances des machines électriques réalisés.

Plusieurs prototypes de machines synchrones supraconductrices ont été proposés et réalisés que ce soit par des laboratoires ou des démonstrateurs industriels. On distingue des structures conventionnelles avec ajout de matériau supraconducteur dans l'inducteur ou bien dans l'induit ainsi que des structures ayant des nouvelles topologies.

Depuis 1990, la machines synchrone supraconductrice, particulièrement la machine à réluctance variable, a trouvé un grand intérêt dans le domaine industriel. La prise en compte des matériaux SHTC dans la partie tournante améliore efficacement les caractéristiques de sorties de la Machine à RV, des moteurs à rotor supraconducteur avec des puissances plus de 200 KW ont été testés. Néanmoins, la recherche des topologies plus performantes à base des matériaux supraconducteurs est toujours d'actualité.

Notre sujet de thèse s'inscrit dans ce sens, et qui concerne l'étude d'un moteur supraconducteur à réluctance variable (MSRV), en recherchant d'une topologie de l'inducteur et de l'induit à base des matériaux supraconducteurs. Le principe de rotor est basé sur la capacité des supraconducteurs massifs à écranter le champ magnétique externe. Le stator est conçu d'un bobinage supraconducteur pour but d'augmenter le champ magnétique tournant dans l'entrefer de la machine. Donc nous allons proposer d'étudier un MSRV dont les matériaux supraconducteurs seront employés à la fois dans l'induit et l'inducteur pour améliorer les performances du moteur.

II.7 Conclusion

Après avoir défini le principe de la supraconductivité dans le chapitre précédent, nous avons présenté dans cette partie les applications pratiques des matériaux supraconducteurs aux différents types de machines synchrones à flux radial.

La conception majeure des machines synchrones supraconductrices réalisées est très proche de celle des machines classiques à pôles saillants, dont la topologie de l'inducteur est conçue à base de matériau supraconducteur massif ou filaire. Toutefois, des conceptions originales qui reposent sur les propriétés des matériaux supraconducteurs ont été inventés par diverses équipes de recherche, notamment le laboratoire GREEN en France.

Selon la forme des matériaux supraconducteurs utilisée, on distingue deux types de conceptions des machines synchrones supraconductrices ; conception à supraconducteur massif basé sur la propriété de piégeage ou d'écrantage des lignes de champs magnétiques par les pastilles supraconductrices et conception à supraconducteur filaire basé sur la propriété des ces fils de conduire de grande densité de courant électrique en régime continu (DC) ou

bien en régime alternatif (AC) . Néanmoins, il existe des conceptions à supraconducteurs massifs et filaires ou même temps.

Dans la partie suivante de notre travail, nous intégrerons les matériaux supraconducteurs massifs et filaires pour la conception d'un moteur synchrone à réluctance variable. La partie tournante utilise des pastilles supraconductrices comme écran magnétiques tandis que l'enroulement du stator est conçu à l'aide des rubans supraconducteurs.

Chapitre III

Etude d'un Moteur Supraconducteur à Réductance Variable

Table des matières du chapitre III

III.1 Introduction	61
III.2 Eléments de base de la conception du MSR	61
III.2.1 Type de matériau et bobinage du stator.....	62
III.2.2 Type de matériaux dans le rotor	62
III.2.1 Température de refroidissement	63
III.3 Principe de base de la pastille supraconductrice de rotor	64
III.4 Structure totale du Moteur supraconducteur	64
III.3 Dimensionnement du Moteur supraconducteur	66
III.3.1 Topologie de stator supraconducteur.....	67
a- Dimensionnement de la bobine supraconductrice	67
b- Topologie de rotor supraconducteur	68
III.5 Simulation du modèle de la machine	69
a- Modèle numérique du moteur supraconducteur	70
b- Résultats de simulations	71
c- Choix de l'entrefer de la machine	74
III.6 Approximation des pertes AC	75
III.7 Conclusion	77

III.1 Introduction

Les machines électriques ont considérablement progressé grâce au développement des matériaux supraconducteurs à haute température critique (SHTC). Récemment, plusieurs recherches ont montré que les variables externes des machines conventionnelles sont plus importantes en considérant les éléments SHTC dans la partie fixe ou tournante des machines électriques [Ain16] [Chu05] [Har17] [Kaj13] [Kov17] [Liu18] [Lin15]. En particulier, la majorité des travaux réalisés sur les moteurs supraconducteurs à réductance variable (MSRV) consiste à augmenter la valeur de la puissance de sortie, du rendement et du facteur de puissance à l'azote liquide (77 K) et à d'autres basses températures [Kov03] [Osw04] [Qiu05] [Rod10]. La plupart des moteurs à réductance adoptent des éléments SHTC dans le rotor en remplaçant les régions non magnétiques par des éléments SHTC sous forme de bulk, dans lesquels ces pastilles ont la propriété d'expulser les lignes de champ de leurs surfaces (effet Meissner). Par conséquent, plusieurs structures de rotors SHTC du moteur à réductance ont été étudiées comme le type Zebra, Zelz et Pilz [Kov02]. Malgré les améliorations apportées par ces topologies aux caractéristiques de sortie du moteur, des restrictions sont dues à la limitation du courant appliqué aux enroulements du stator en cuivre, ce qui limite la puissance de sortie.

Pour augmenter le courant appliqué dans le bobinage du stator, une équipe de chercheurs a refroidi un moteur avec stator en cuivre et rotor SHTC par immersion de la totalité du moteur dans l'azote liquide [Osw04]. Une augmentation de quatre fois du courant appliqué au stator est enregistrée, cependant, cette valeur reste insuffisante pour répondre aux objectifs attendus des moteurs à haute puissance.

Afin de maximiser la puissance ou bien le couple tout en réduisant le volume, nous avons proposé une nouvelle conception pour un MSRV.

La conception du notre moteur est constituée d'une structure de stator avec enroulement supraconducteur concentrique et d'une topologie de rotor avec bulk SHTC. Notre objectif dans ce travail est d'étudier le couple et la puissance délivrés par ce moteur afin d'évaluer les performances de la conception proposée.

III.2 Eléments de base de la conception du MSRV

Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude d'un moteur à réductance variable entièrement supraconducteur ; un stator qui possède un enroulement supraconducteur triphasé et un rotor à

base de matériau supraconducteur massif. Un choix de type de bobinage du stator et du matériau supraconducteur utilisé dans les deux parties (stator et rotor) est nécessaire.

III.2.1 Type de matériau et bobinage du stator

Le choix de la structure du bobinage dans les machines conventionnelles dépendra de l'exigence de l'application (applications de grande ou petite puissance). Par rapport aux bobinages distribués, les machines avec des bobinages concentriques peuvent avoir des têtes de bobines non-superposées et plus courtes puisque chaque dent de la structure est entourée par un enroulement. Les enroulements de la même phase sont mis en série ou en parallèle ce qui permet d'éviter le contact mécanique entre les bobines voisines [Gua11]. Ce bobinage concentrique permet donc d'éliminer le risque de court circuit entre les bobines appartenant à des phases différentes, ce qu'il lui donne plus de tolérance aux défauts [Fod09]. Il peut avoir ainsi moins de pertes joules donc une amélioration dans le rendement par rapport au type distribué. Dans le cas d'un bobinage à l'aide des matériaux supraconducteurs, l'enroulement concentrique est le choix convenable car ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques particulières par rapport aux matériaux conventionnelles (cuivre ou aluminium). Ces matériaux supraconducteurs sont fragiles et possèdent une limitation de la flexibilité et de rayon de courbure surtout sous la forme de ruban supraconducteur comme dans le cas de notre moteur.

Les rubans supraconducteurs peuvent conduire une densité de courant importante par rapport aux conducteurs classiques en cuivre, ce qui permet de générer un champ magnétique important, et par conséquent des grandeurs de sortie plus performantes, ce qui répond à notre objectif.

Comme nous avons vu dans l'état de l'art sur les machines synchrones supraconductrices, le fil en BSCCO est actuellement le matériau le plus utilisé dans la conception de ces machines car il est possible d'avoir des longueurs importantes avec ce matériau contrairement par exemple au fil en YBCO 2G.

Dans ce travail un enroulement concentrique supraconducteur à base du matériau sous forme de ruban en BSCCO est choisi pour la conception de stator du moteur supraconducteur.

III.2.2 Type de matériaux dans le rotor

Plusieurs conceptions de rotors des moteurs supraconducteurs à réductance, utilisant des supraconducteurs massifs à HTC, ont été présentées (voir chapitre II), dont la plus réponde

est la configuration « zèbre » avec des éléments « bulk » en YBCO. Les résultats de test de l'ensemble de ces moteurs avec des éléments SHTC montrent que dans le bain d'azote liquide la puissance de sortie spécifique par unité de masse est quatre à cinq fois mieux que pour les machines électriques conventionnelles. Cela a encouragé les recherches sur des nouvelles topologies de ces moteurs et en particulier sur le rotor.

Les matériaux supraconducteurs dans les moteurs à réductance variable remplacent les matériaux amagnétiques dans le rotor, et ce, pour but d'augmenter l'inductance direct et de diminuer l'inductance transversale, ce qui se traduit par une augmentation dans le rapport de saillance et par conséquent dans la valeur du couple du moteur. Et comme nous l'avons montré dans le chapitre I, un supraconducteur massif à HTC refroidi à une température inférieure à sa température critique possède la propriété importante d'expulser toutes lignes de champs magnétiques externes de sa surface. Selon ces principes, on va présenter une nouvelle structure de rotor avec une pastille supraconductrice qui fonctionne comme un isolant magnétique.

Les résultats de tests [Osw04] sur des MSRVS montrent que l'utilisation des YBCO massif dans la topologie de rotor est très efficace par rapport à celle de BSCCO massif (chapitre II). Pour cela, nous choisissons une pastille supraconductrice en YBCO SHTC comme matériau pour la conception du rotor de notre moteur.

III.2.1 Température de refroidissement

Contrairement aux matériaux conventionnelle (cuivre ou aliminuim) dans les machines électriques, les matériaux supraconducteurs nécessitent un environnement plus précis pour leurs fonctionnement. Un système de refroidissement convenable doit être considéré pour assurer l'état supraconducteur de ces matériaux.

Nous avons vu dans le chapitre II que le refroidissement des machines supraconductrices est basé sur des systèmes cryogéniques fixes ou tournants, comme dans le cas des machines supraconductrices à pôles saillants [Neu06] [Iwa07]. Néanmoins, les moteurs supraconducteurs à réductance variable utilisent des cryostats fixes à base de l'azote liquide. Ce fluide créogénique présente l'avantage d'être simple à utiliser et disponible dans le marché avec un coût raisonnable.

Dans notre travail, le MSRVS est refroidi à l'aide de l'azote liquide (77 K) dont un cryostat fixe est inséré autour de la structure complète du moteur.

III.3 Principe de base de la pastille supraconductrice de rotor

Notre pastille SHTC est placée dans une enceinte de champ magnétique créé par les trois bobines supraconductrices du stator. Deux considérations pour le comportement de la pastille sont alors possibles : un comportement diamagnétique parfait ou bien réel.

La figure III.1 montre le comportement de la pastille vis-à-vis un champ magnétique externe. Le flux est repoussé de la surface de la pastille SHTC, sauf sur les bords. Ceci est dû à la présence des courants de surface dans la pastille SHTC qui empêchent la pénétration du champ magnétique externe lorsqu'elle est refroidie en dessous de sa température critique (voir chapitre I). Le pourcentage de pénétration du flux à l'intérieur de la pastille supraconducteur dépend des caractéristiques de matériau supraconducteur, de la température de refroidissement et de l'amplitude du champ magnétique externe appliqué.

La figure III.1(a) représente les lignes de flux tout en assumant un comportement réel (diamagnétique) de la pastille supraconductrice. Comparant cela avec la figure III.1(b) montrant un comportement parfait où les lignes de flux sont totalement rejetées de la pastille SHTC et sont tangentiels à sa surface. Dans notre étude, on va considérer que la pastille est parfaitement supraconductrice (diamagnétique parfait), donc il n'y a pas de pénétration des lignes de flux à l'intérieur du matériau.

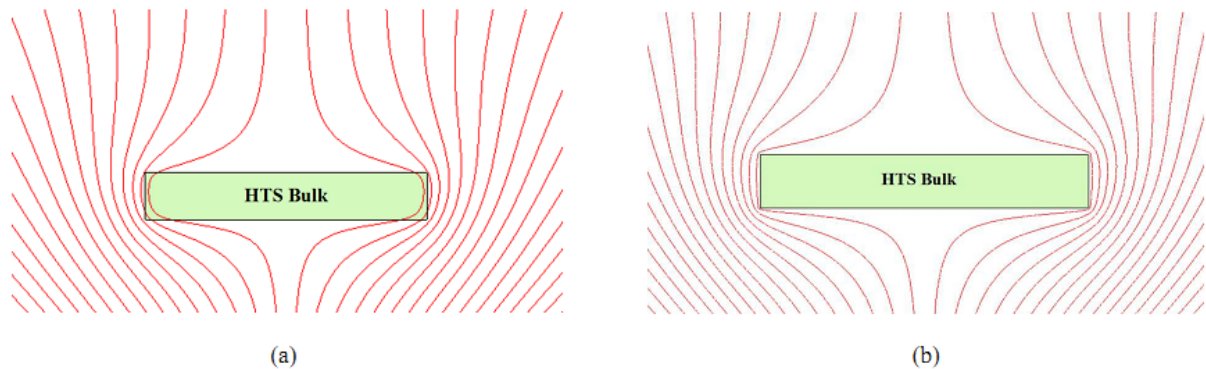


Figure III.1: Comportement d'une pastille SHTC refroidie placée dans un champ externe : (a) caractéristique réelle, (b) caractéristique parfaite.

III.4 Structure totale du moteur supraconducteur

Nous proposons l'étude d'une topologie de MSR_V comportant un enroulement du stator à l'aide de matériau supraconducteur en BSCCO et un rotor composé de bulk en YBCO. Notre machine est entièrement supraconductrice et possède une seule paire de pôles

(machine bipolaire). Le refroidissement de la machine se fait à l'aide de l'azote liquide, dont la machine est complètement immergée dans un bain d'azote liquide.

La figure III. 2 montre le schéma de la structure totale de notre machine (stator et rotor) avec la présence d'une culasse magnétique pour but de canaliser les ligne du flux magnétique.

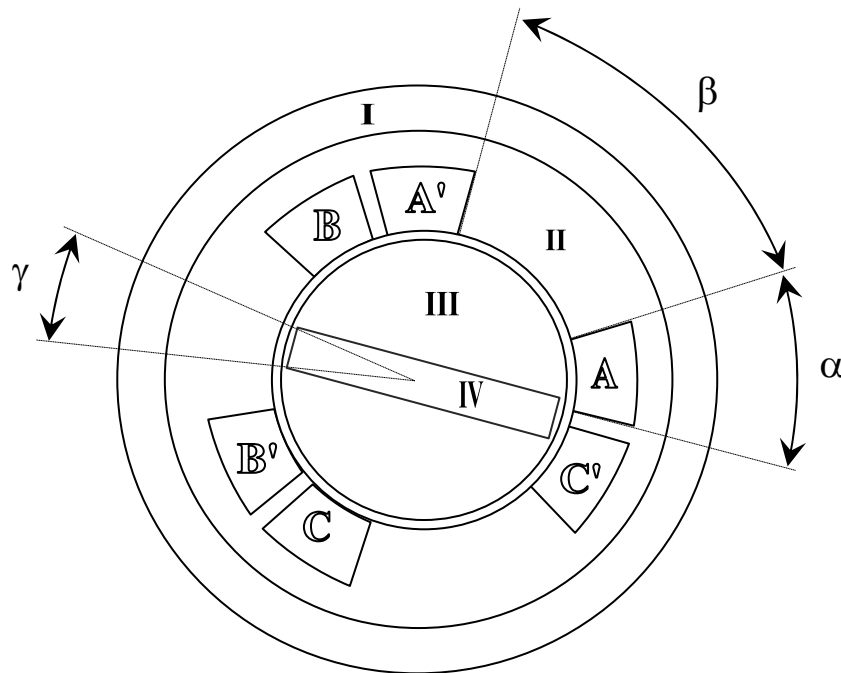


Figure III.2 : Vue en coupe totale du MSR.V.

Dans le modèle de la machine, différents types de matériaux SHTC sont utilisés dans la partie fixe et tournante du moteur (Fig. III.2). Dans la partie du stator, une structure simple d'enroulement concentrique triphasé SHTC est considérée pour générer un champ magnétique tournant dans l'entrefer du moteur. Les bobines de champ sont conçues avec des rubans en BSCCO SHTC dans lesquelles un courant alternatif est appliqué dans chaque bobine de phase ((A-A'), (B-B') et (C-C')). Ces bobines SHTC sont placées dans un matériau non magnétique (matériau en fibres de verre), représenté par la **régi**on II. Dans la partie tournante, un seul bulk en YBCO de matériau SHTC (**régi**on IV) est placé dans un cylindre ferromagnétique (**régi**on III). La structure du MSR.V présente un petit entrefer entre les régions II et III. Une culasse magnétique (**régi**on I), jouant le rôle de barrière magnétique, est placée sur le diamètre extérieur de l'enroulement du stator supraconducteur. La structure totale du MSR.V est refroidie dans un bain d'azote liquide à 77 K. Le système de refroidissement nous a permis d'envisager un entrefer de faible épaisseur. Les paramètres géométriques (α , β et γ)

illustrés à la figure III. 2 représentent l'angle d'ouverture de l'encoche, l'angle d'ouverture minimal de la bobine et l'angle correspondant à l'épaisseur de la pastille supraconductrice.

III.3 Dimensionnement du Moteur supraconducteur

D'une façon globale, le bobinage concentrique est destiné pour les applications de grande puissance, ou un nombre important de paire de pôles est nécessaire. Ce type de bobinage permet d'éviter les courts circuits entre les trois bobines, ce qui simplifie la construction du stator. La facilité de ce genre de répartition par rapport au type distribué peut affirmer que ce genre de répartition se prête très facilement à l'insertion mécanisée des enroulements dans les encoches correspondantes, ce qui implique le gain du temps, la précision et la quantité. Ceci est particulièrement intéressant pour la fabrication des bobines supraconductrices dont les caractéristiques de leurs matériaux impliquent fortement le choix de ce type de bobinage.

Les types de bobinages connus ne sont pas tous réalisables par les rubans en BSCCO ; une forme d'enroulement concentrique est bien adaptée en raison des caractéristiques mécaniques des rubans HTC. L'enroulement du stator est composé de trois bobines identiques (A-A'), (B-B') et (C-C') décalées avec le même angle électrique (120 degrés). Le tableau III.1 montre les spécifications du matériau de type BSCCO HTC produit par Sumitomo Electric (type H) et American Supraconductor Corp [Aya08] [Par10].

Pour assurer la résistance mécanique à la flexion des bobines en BSCCO HTC, nous avons choisi dans ce travail un rayon de courbure de 40 mm, tableau III.1. Selon ce choix, les dimensions des bobines de stator ont été conçues en considérant un angle d'ouverture minimal correspond à ce rayon de courbure. La valeur de l'angle α est directement liée aux paramètres spécifiques du ruban BSCCO (largeur et épaisseur) et au choix de la taille globale de la bobine.

Paramètre du ruban	Valeur
Largeur	4.26 [mm]
Epaisseur	0.28 [mm]
Courant critique I_c à 77 K, champ propre	150 [A]
Rayon de courbure critique	40 [mm]

Tableau III. 1: Caractéristiques du ruban en BSCCO [Aya08] [Par10].

III.3.1 Topologie de stator supraconducteur

Dans le cadre de l'amélioration des performances des machines synchrones à réductance variable, les efforts menés par les chercheurs sont consacrés à la partie tournante (ajout de matériaux supraconducteurs au rotor). Tandis que le stator a été conçu avec des matériaux conducteurs conventionnels comme le cuivre ou l'aluminium et doivent donc accepter des pertes ohmiques dans la gamme de certains kW (cas des moteurs de plus de 100 kW de puissance de sortie). Par conséquent, de notre point de vue, l'amélioration de la structure du stator de ces machines par l'introduction des matériaux supraconducteurs est nécessaire pour cette gamme de puissance surtout avec le développement de systèmes de refroidissement cryogéniques efficaces. Donc nous consacrons notre intérêt sur l'application de la supraconductivité pour le bobinage du stator. L'enroulement en cuivre est remplacé par un enroulement supraconducteur à courant alternatif (AC) dans une topologie du stator d'un moteur synchrone à réductance.

En outre, afin de maintenir les pertes totales à un niveau bas dans le stator, nous proposons une structure « air » ou lieu d'une structure « fer », cela nous à permet d'éviter le problème de saturation du circuit magnétique et de minimiser les pertes. Alors la partie ferromagnétique du stator sera remplacée par un matériau en fibres de verre.

a- Dimensionnement de la bobine supraconductrice

Techniquement, il n'est pas possible d'occuper toute la section trapézoïdale de l'encoche du stator avec la section transversale rectangulaire de la bobine SHTC en BSCCO (voir Fig. III.3). Pour résoudre ce problème, une forme rectangulaire de l'encoche est proposée sur la figure III.3 (a). Quatre sous-bobines d'épaisseur « w » pour chacune sont empilées le long de l'axe des « y ». Ce paramètre (w) est également la largeur du ruban en BSCCO. Chaque sous-bobine est composée d'un nombre « n » de rubans chacun d'épaisseur « d » suivant l'axe des abscisses « x ». Donc « $n \times d$ » est la largeur d'une sous-bobine.

La section transversale de l'encoche représentée sur la figure III.3(a) est subdivisée en trois parties; une forme rectangulaire dans laquelle sont placées des rubans SHTC et deux autres sections de formes triangulaires identiques remplies en fibre de verre. La bobine SHTC de la phase représentée sur la figure III.3(b) a une forme d'une piste de course à quatre couches. Chaque sous-bobine (couche) est composée de « n » rubans empilés parallèlement face à face afin de garantir suffisamment de courant. La longueur « L » représente la partie droite de la

bobine SHTC ou bien la partie active du MSRVL le long de l'axe « z » et « R » représente le rayon de courbure de la bobine (tableau III.1).

Le but de cette étape est de concevoir une plus petite configuration possible du stator. Cette conception s'appuie sur les caractéristiques de ruban SHTC en BSCCO afin d'augmenter la densité de courant appliquée dans le bobinage statorique. Par conséquent, cela permet de réduire le volume du stator par rapport à des topologies donnant la même puissance de sortie.

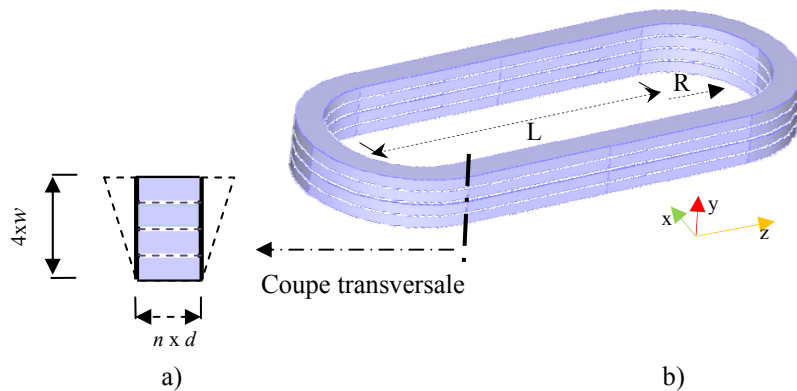


Figure III.3: Croquis de la bobine de phase SHTC sous forme de piste de course: (a) coupe de l'encoche du stator et (b) structure de la bobine SHTC.

Nous proposons dans notre étude une structure de stator selon les données de la bobine supraconductrice, donc nous présentons une plus petite topologie possible du stator à enroulement supraconducteur d'un MSRVL. La valeur du rayon interne du stator a été calculée avec la prise en compte du rayon de courbure de la bobine.

b- Topologie de rotor supraconducteur

Dans notre étude nous présentons un prototype de rotor supraconducteur avec ajout d'une seule pastille supraconductrice en YBCO au lieu de plusieurs éléments supraconducteurs. La pastille supraconductrice est insérée dans un cylindre ferromagnétique, et joue le rôle d'un écran supraconducteur (Fig. III. 4).

Généralement, le rotor des moteurs conventionnels à réluctance est composé de matériaux magnétiques et non magnétiques. Par conséquent, deux inductances sont considérées le long de l'axe direct et de l'axe en quadrature (L_D et L_Q). Sur la figure III. 4, la différence entre L_D et L_Q (L_D-L_Q) affecte le couple électromagnétique. Il est possible

d'augmenter le couple de réductance en augmentant la densité de flux le long de l'axe « D » ou en la diminuant le long de l'axe « Q ».

Nous avons envisagé une nouvelle topologie de rotor pour un MSR. En plaçant un bulk en YBCO, qui possède un comportement diamagnétique parfait, dans une structure cylindrique ferromagnétique. La pastille en YBCO repousse les lignes de champ perpendiculaire de sa surface sur toute la longueur axiale totale (axe « z »). Donc, la densité de flux est concentrée dans l'axe « D » et permet une inductance minimale dans l'axe « Q ». La topologie de rotor, illustrée sur la figure III. 4, est composée d'un bulk SHTC en YBCO de section rectangulaire ($l \times e = (41.2 \times 14.6) \text{ mm}^2$) placé dans une structure cylindrique ferromagnétique le long de l'axe « z ». Pour maintenir le volume du bulk SHTC dans sa région, deux cylindres ferromagnétiques de faible longueur (flasques) sont fixés sur les deux bords de rotor (sur l'axe « z »). Cette structure est très avantageuse, car elle permet une bonne protection du Bulk SHTC, simple à construire et robuste.

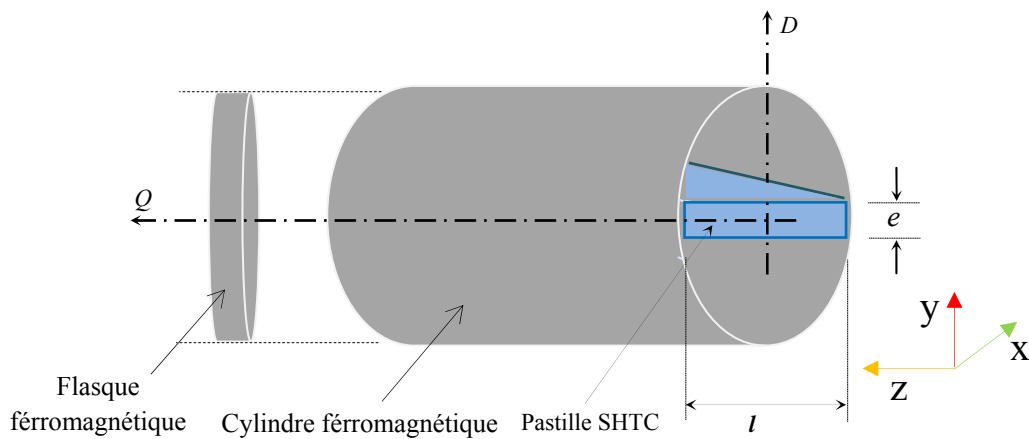


Figure III.4: Topologie de rotor du MSR

III.5 Simulation du modèle de la machine

Nous avons modélisé la structure de notre machine, présentée précédemment, par la méthode des éléments finis en magnétostatique 2D, le logiciel utilisé est **FEMM** couplé avec l'environnement **MATLAB**. Le couple délivré par la machine est calculé par l'intermédiaire du tenseur de maxwell.

a- Modèle numérique du moteur supraconducteur

La configuration totale du MSRVR est composée d'un stator avec enroulement SHTC et d'un rotor avec bulk SHTC. Pour évaluer les performances potentielles du moteur, une étude numérique a été développée à l'aide du logiciel FEMM [Mee15].

Le tableau III.2 donne les paramètres géométriques du modèle bidimensionnel (2D) du moteur supraconducteur à réductance variable.

Paramètres du MSRVR	Valeurs
Rayon externe du stator	75 [mm]
Rayon interne du stator	45 [mm]
Rayon du rotor	43 [mm]
Epaisseur de la culasse	20 [mm]
Longueur du moteur	360 [mm]
Epaisseur de l'entrefer	02 [mm]
Rayon de l'encoche	65 [mm]
Angle α	27.5 [deg]
Angle β	60 [deg]
Angle γ	20 [deg]

Tableau III. 2: Paramètres géométriques du MSRVR.

Différentes hypothèses ont été prises en compte dans le modèle de calcul 2D. Tout d'abord, le moteur supraconducteur est supposé infiniment long suivant la direction de l'axe « z » (Fig. III. 3 et Fig.III. 4). Par conséquent, les effets d'extrémités sont négligés. De plus, le matériau ferromagnétique utilisé est supposé linéaire et de perméabilité relative constante et élevée ($\mu_r \gg 1$), ce qui nous permet de négliger la saturation du matériau qui induit des pertes par hystérésis affectant négativement la valeur de la puissance et de couple. Nous considérons également que la pastille SHTC dans le rotor a un comportement diamagnétique parfait, de sorte qu'une faible perméabilité relative est requise pour ce matériau ($\mu_r \ll 1$).

Enfin, la perméabilité magnétique de la région II, figure III. 2, dans le stator est prise égale à la perméabilité de l'air ($\mu_r = 1$). Un courant sinusoïdal triphasé est appliqué aux bobines SHTC du stator avec une fréquence de 50 Hz et une valeur de courant de 95 A.

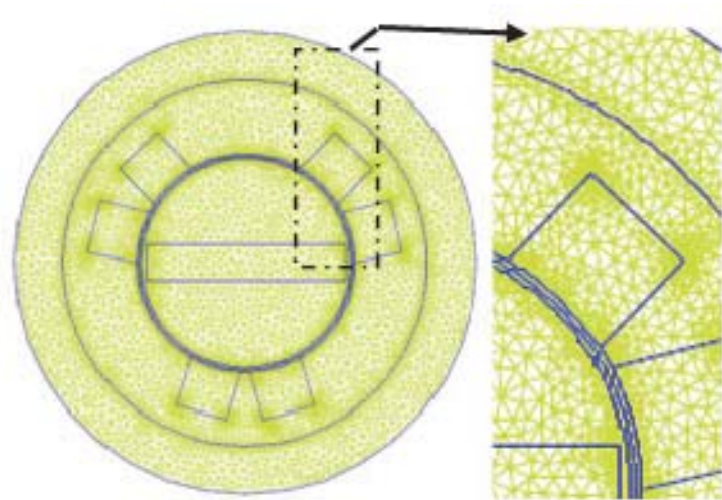
La forme concentrique des bobines SHTC dans le stator convient mieux aux caractéristiques de ruban SHTC en BSCCO. Cette configuration est facile à manipuler et peut

supporter des densités de courant importantes, mais généralement elle provoque des vibrations dues aux ondulations de couple [Par06]. Une étude paramétrique avec le logiciel FEMM a été envisagée afin d'obtenir une structure appropriée du rotor avec un minimum d'ondulations. Les dimensions et le nombre de bulks SHTC dans le rotor ne sont pas choisis au hasard, mais ils sont déterminés numériquement pour avoir la structure appropriée donnant une valeur de couple maximale avec des ondulations minimales. Dans notre simulation, trois topologies de rotor sont prises en compte:

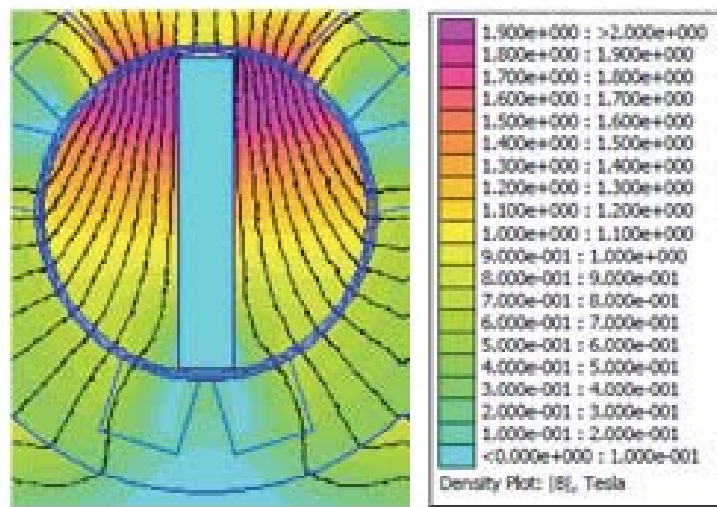
- Le premier cas est une structure ferromagnétique avec un bulk en YBCO comme illustré à la Figure III. 4 ; topologie (YBCO-Fer),
- Le second cas, le bulk en YBCO est remplacée par un noyau d'air ; topologie (Air-Fer).
- Dans le dernier cas, le matériau ferromagnétique dans la structure du rotor (cylindre) est remplacé par un matériau de perméabilité égale à celle de l'air ; topologie (YBCO-Air).

b- Résultats de simulations

La structure complète du MSR_V est représentée sur la figure (Fig. III. 5.a). Un maillage d'éléments finis triangulaires est utilisé pour résoudre le problème 2D. Dans la figure III. 5(b), les deux pôles de la machine sont représentés par la distribution des lignes de champ magnétique. Nous avons observé que la masse supraconductrice (bulk) dans le rotor empêche toute pénétration de lignes de flux dans sa région. Cela est dû au comportement diamagnétique parfait de la pastille considérée dans notre simulation (une faible perméabilité magnétique est considérée).



a) Maillage 2D de la machine



b) Distribution du champ magnétique

Figure III.5 : Simulation du MSRVR : (a) maillage en 2D, (b) distribution des lignes du champ magnétique.

Pour le calcul de couple, le logiciel FEMM est muni d'un code de calcul basé sur le tenseur de Maxwell [Mee15] [Mcf88]. Le tableau III.3 montre la variation du couple et de ces ondulations en fonction de l'angle d'ouverture « γ » de la pastille supraconductrice, qui représente l'épaisseur du bulk.

Angle d'ouverture du bulk (°)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Couple [Nm]	498.5	548	577.8	608	601.6	576.4	543.9	497.4	455.4	403.8
Ondulation %	17.2	14.6	10.95	3.5	8.19	15.2	22.59	29.7	37.13	43.7

Tableau III.3: Valeurs du couple et de ces ondulations en fonction de l'épaisseur du bulk.

Dans notre simulation élément finis en 2D, l'angle correspondant à l'épaisseur de la pastille est choisi à 20 degré, car avec cette valeur notre structure présente la plus faible ondulation du couple par rapport aux autres valeurs. Nous considérons aussi les trois différentes topologies de rotors précédemment citées. La figure III.6, montre la variation du couple statique du MSRVS en fonction de la position du rotor.

La topologie (YBCO-Fe) du rotor donne une valeur maximale du couple statique de 635 Nm, par contre la structure sans matériau supraconducteur (topologie (Air-Fer)) présente une faible valeur de couple, 120 Nm. On observe donc un couple pour la topologie (YBCO-Fe) cinq fois plus important à celui de la topologie (Air-Fer). Ce gain en valeur du couple est dû aux propriétés spécifiques que présente la pastille SHTC en YBCO utilisée dans la conception du rotor. De plus, cette topologie de rotor (YBCO-Fe) présente une valeur de couple plus que le double que celle de la topologie (YBCO-Air) (300 Nm seulement). Ce résultat est dû à la perméabilité magnétique élevée présentée par le matériau ferromagnétique.

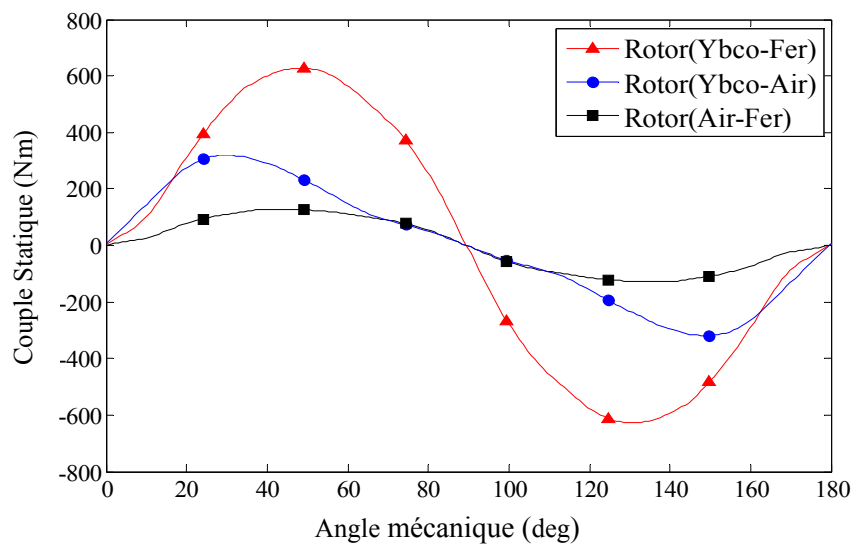


Figure III.6: Couple statique en fonction de l'angle mécanique pour différentes topologies du rotor: (YBCO-Fe), (YBCO-Air) and (Air-Fe).

La variation du couple dynamique en fonction de la position du rotor dans le MSRVS est illustrée à la Figure III. 7. La topologie (YBCO-Fe) du rotor SHTC a été adoptée pour le calcul de ce couple. Une valeur moyenne de couple de 608 Nm avec un pourcentage d'ondulations de 3,5% a été obtenue lors de notre simulation bidimensionnelle. Cette valeur du couple a été générée, dans [Osw04], mais pour un moteur à réductance variable avec rotor SHTC mais de taille plus grande. Ce qui s'accorde avec notre objectif qui consiste à concevoir un moteur de petite taille, de couple important avec faibles ondulations.

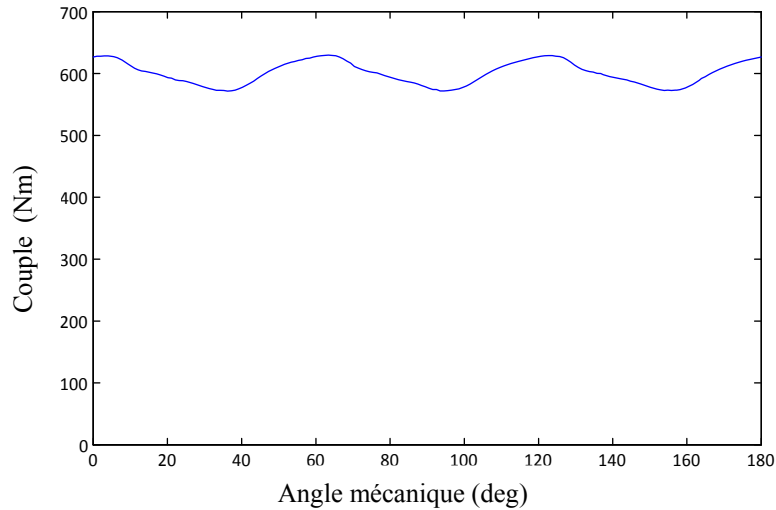


Figure III.7: Couple dynamique en fonction de la position du rotor.

c- Choix de l'entrefer de la machine

La majorité des travaux réalisés sur les types des moteurs synchrones supraconducteurs sont caractérisés par un grand entrefer dû aux systèmes de refroidissement considérés, ce qui implique une dégradation dans la valeur de la puissance du moteur. Dans notre travail, une faible valeur d'entrefer du moteur est choisie. Pour valider notre choix (2 mm), nous avons simulé notre moteur avec cinq paramètres géométriques de l'entrefer.

Le tableau III.3 regroupe les résultats de nos simulations, nous observons une diminution des valeurs du couple moyen avec l'augmentation de l'épaisseur de l'entrefer. Une valeur de 618 Nm est obtenue avec 1 mm mais seulement 549 Nm avec une épaisseur de 5 mm. Nous avons même présenté les valeurs de la puissance de sortie, correspondant aux couples, en fonction de différentes épaisseurs de l'entrefer. La puissance est calculée à l'aide de la formule suivante:

$$Pu = C \times \omega \tag{3.1}$$

Dont:

Pu : la puissance de sortie en Watt (W);

C : le couple électromagnétique (Nm);

ω : la vitesse de rotation du moteur (rd / s).

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} \tag{3.2}$$

Dont:

p : le nombre de paires de pôles ;

f : la fréquence du courant appliqué.

Designation	Valeur				
Epaisseur de l'entrefer [mm]	1	2	3	4	5
Couple [Nm]	618	608	588	569	549
Puissance [KW]	194.1	191	185	179	172.4

Tableau III.4 : Valeurs du couple et de la puissance en fonction de l'épaisseur de l'entrefer.

Étant donné que l'utilisation du cryostat de refroidissement autour du rotor SHTC nécessite une augmentation de l'épaisseur de l'entrefer, ce qui entraîne une diminution de la valeur du couple. L'avantage du système de refroidissement utilisé pour l'étude de notre MSR_V, immersion totale du moteur dans l'azote liquide à 77 K, nous a permis d'adopter une faible épaisseur de l'entrefer. Nous choisissons une épaisseur de l'entrefer de 02 mm afin de comparer la puissance de sortie avec un autre moteur SHTC ayant le même entrefer [Osw04].

Selon les valeurs indiquées dans le tableau III.3, la puissance de sortie de notre MSR_V est de 191 kW à 3 000 tr/min. Cette valeur de puissance est pratiquement la même que celle obtenue avec un MSR_V constitué d'un stator en cuivre et d'un rotor SHTC, testé dans les mêmes conditions (50 Hz, 77 K) [Osw04], ce moteur a été déjà présenté au chapitre II. Comparé avec ce moteur, notre conception entièrement supraconductrice présente une réduction plus de 50% dans le volume du moteur. Donc, l'avantage de notre conception est qu'elle produit une puissance importante avec une taille plus compacte. Cela est dû au courant élevé appliqué dans l'enroulement du stator SHTC d'une part, et d'autre part aux parfaites caractéristiques présentées par le bulk SHTC. De plus, la structure du rotor SHTC proposée (topologie (YBCO-Fer)) présente la possibilité d'une réalisation simple et une bonne protection mécanique pour la pastille supraconductrice.

III.6 Approximation des pertes AC

Dans ces conditions de fonctionnement (50 Hz et 77 K), nous avons présenté une approximation des pertes AC dans l'enroulement statorique du moteur supraconducteur, inspirée de la littérature [Str05].

Les pertes AC totales sont composées de deux parties, des pertes d'aimantation causées par le champ perpendiculaire sur les enroulements (la plus grande partie des pertes) et des pertes de transport générées par le courant alternatif appliqué dans les enroulements SHTC.

La figure III.8 représente les pertes AC dues au courant de transport appliqué pour quatre types différents de matériaux supraconducteurs [Str05] ; BSCCO en forme de fil et ruban (BSCCO wire et tape) et YBCO en forme de bandes individuelle et empilées (YBCO strip et stack). Ces pertes ont été calculées avec une méthode numérique et validées par les résultats obtenus par Norris [Nor70].

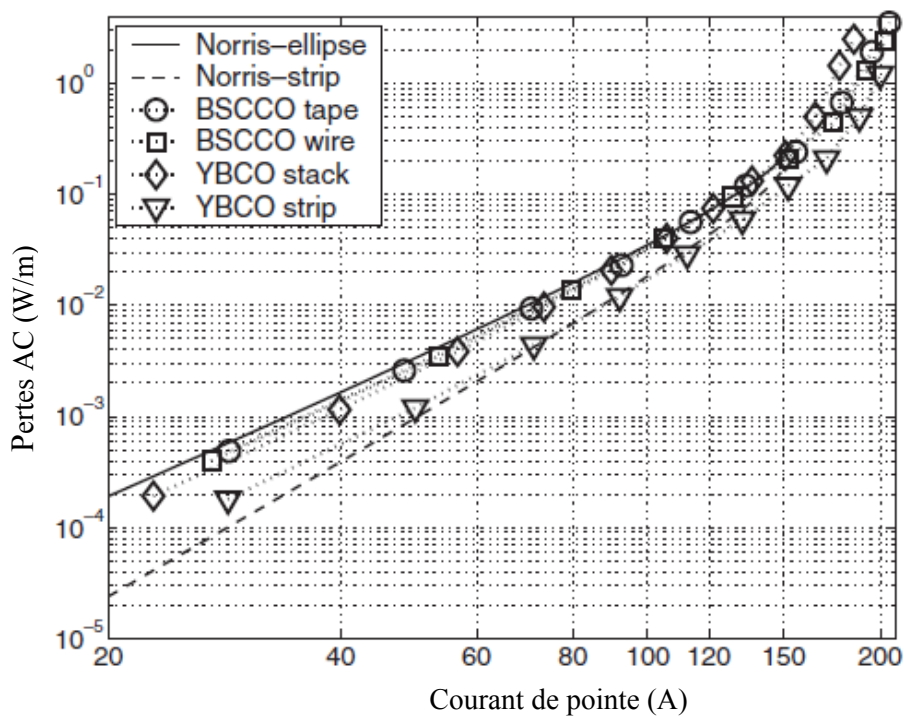


Figure III.8: Pertes AC dues au champ propre à 50 Hz dans les quatre types de conducteurs pour différentes valeurs du courant de transport. Le courant critique au champ propre pour tous les conducteurs est de 150 A [Str05].

D'après la figure III.8, les pertes AC dans le ruban en BSCCO correspondant au courant de transport de 95 A, sont environ 0.01 W/m. Dans le bobinage du stator supraconducteur, chaque bobine de phase nécessite environ 280 m de longueur du ruban en BSCCO. Donc pour une bobine de phase, on estime des pertes de puissance de 2,8 W. Et par conséquent, on obtient 8,4 W de pertes pour les trois bobines du stator.

Pour l'estimation des pertes d'aimantation dues à l'application d'un champ magnétique perpendiculaire sur le matériau supraconducteur, en absence du courant de transport, nous considérons la figure III.9 suivante :

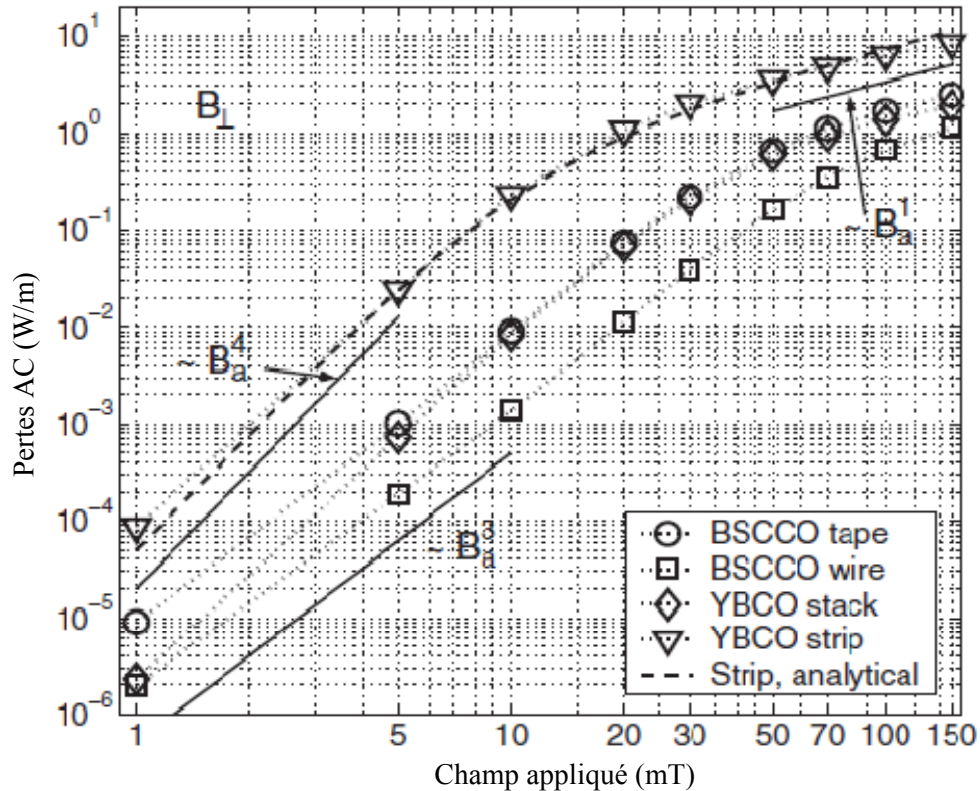


Figure III.9 : Pertes d’aimantation à 50 Hz dans les quatre conducteurs sous champ magnétique perpendiculaire appliqué sans courant de transport. La solution analytique est également présentée pour une bande supraconductrice de même épaisseur que les bandes YBCO (1 μm) [Str05].

D’après la figure III.9, pour un champ magnétique perpendiculaire de 150 mT, les pertes d’aimantation sont environs 3 W/m. Si on considère que les rubans de notre enroulement subissent la même valeur de champ perpendiculaire, et en négligeant les effets mutuelles entre les rubans, nous approximations les pertes d’aimantations dans les trois bobines de phases à 2520 W.

Finalement, Les pertes AC totales dans l’enroulement statorique (pertes d’aimantation et de courant de transport) sont estimées à 2528.4 W. Ces pertes représentent 1,3% de la puissance de sortie délivrée par le MSRV.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un moteur à réductance entièrement supraconducteur a été modélisé par la méthode des éléments finis 2D (FEM). La conception proposée du MSRV nous a donné une valeur importante du couple avec faibles ondulations.

L'utilisation de matériaux SHTC dans les pièces de stator et de rotor a permis de réduire de moitié le volume total par rapport à un moteur conventionnel ayant la même puissance de sortie avec uniquement du matériau SHTC dans le rotor. Cette nouvelle conception supraconductrice permet donc de produire des moteurs plus compacts.

La forme d'enroulement concentrique facilite la conception de la structure de stator et nécessite moins de matériel par rapport à un enroulement distribué. De plus, la présence de l'écran magnétique avec un matériau ferromagnétique (YBCO-Fer) dans la topologie du rotor a multiplié par deux la valeur de couple par rapport à la topologie avec un matériau uniquement SHTC (YBCO-Air) et offre une bonne protection mécanique pour la pastille supraconductrice.

La structure proposée pour le moteur supraconducteur à réductance variable possède une faible épaisseur d'entrefer (2 mm) avec une valeur de puissance importante (191 KW). Ce moteur peut atteindre des puissances plus élevées si nous surmontons l'handicap des limites de tailles des bulks disponibles.

Chapitre IV

Etude des Performances de la Pastille SHTC utilisée pour le MSRV

Table des matières du chapitre IV

IV.1 Introduction	81
IV.2 Méthode de calcul par l’approche bidimensionnelle des conducteurs longs magnétiquement couplés	81
IV.2.1 Formulation du problème de base	82
IV. 2. 2 Calcul des paramètres électriques	84
a- Calcul des résistances de la bobine en cuivre et de la pastille SHTC.....	84
b- Calcul des inductances propres et mutuelles pour les éléments de la bobine et de la pastille supraconductrice.....	85
c- Calcul des composantes de la densité de flux et du champ magnétique	86
IV.2.3 Représentation matricielles des paramètres électriques	87
IV.3 Applications de la méthode	89
IV.3.1 Application pour des longs conducteurs seuls alimentés en tension.....	89
a- Calcul des paramètres électriques	89
b- Résolution en harmonique.....	92
IV.3.2 Application de la méthode pour le problème de base (bobine et pastille).....	93
IV.3.3 Application de la méthode au MSRV	95
IV.4 Conclusion	104

IV.1 Introduction

L'application des supraconducteurs dans le domaine de génie électrique nécessite une bonne compréhension du comportement de ses matériaux en présence des effets magnétiques et thermiques externes. A cause de l'amélioration progressive des systèmes de cryogénies, les pastilles SHTC ont trouvé leur place dans différentes applications comme les actionneurs, les systèmes de lévitation magnétiques et les machines électriques [Ain16] [Har17] [Lin15]. En dessous d'une valeur critique de température et du champ magnétique externe (T_c et H_c), la pastille SHTC présente un comportement diamagnétique parfait car elle expulse tout champ magnétique appliqué (effet Meissner). Suite à ce comportement, les bulks SHTC peuvent être utilisés comme des écrans magnétiques dans certains types de moteurs électriques [Alh15] [Mas03]. Ces bulks SHTC peuvent écranter des champs magnétiques importants puisqu'ils contiennent des densités de courant critique très élevées. L'utilisation de ces matériaux dans ces moteurs, contribue efficacement à l'amélioration du rendement des machines y contenant et peuvent être exposés à des champs magnétiques externes très puissants. Ce qui provoque souvent un changement dans le comportement de ces matériaux supraconducteurs. A l'échelle macroscopique, des travaux expérimentaux ont été effectués pour l'étude de la distribution des densités de flux dans des bulks SHTC exposés aux différents champs magnétiques externes [Ter11] [Dou14].

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle manière permettant d'analyser l'évolution temporelle du champ de pénétration et de densité de courant dans des pastilles (bulks) SHTC placée dans des champs magnétiques externes variables, créés par des bobines en cuivre. Par le biais de cette même approche, nous traiterons le cas de notre MSR_V afin d'observer et de calculer les courants de pénétration et les phénomènes engendrés et qui nous étaient impossible de les percevoir par le logiciel FEMM. La prédiction des courants de pénétration dans la pastille supraconductrice nous a permis de connaître les limites de notre MSR_V comme le courant maximale appliqué dans le bobinage supraconducteur.

IV.2 Méthode de calcul par l'approche bidimensionnelle des conducteurs longs magnétiquement couplés

En générale, les moteurs électriques traités en 2D sont considérés comme des dispositifs longs et non-axisymétriques. Aussi, le MSR_V traité dans cette partie ne contienne pas de parties ferromagnétiques. Avec l'idée d'avoir uniquement des corps conducteurs

amagnétiques, nous pouvons modéliser toute la machine par des conducteurs longs magnétiquement couplés. Le calcul des paramètres électriques et des interactions ce fait de façon totalement analytique. L'atout principal, est de décomposer l'ensemble du dispositif en un nombre considéré de longs conducteurs ayant des sections transversales rectangulaires dont le but est d'obtenir une matrice d'impédance complète contenant des résistances et des inductances propres et mutuelles.

Ces paramètres, qui seront des valeurs constantes pour une même modélisation pour les conducteurs ordinaires (bobines en cuivre), ne le sont pas pour les pastilles supraconductrices. D'où la difficulté annoncée pour toute la modélisation.

L'idée adoptée, est d'intégrer une méthode itérative telle que celle du point fixe pour pouvoir prendre en compte les changements surtout des résistances des éléments de la pastille supraconductrice à chaque pas de temps.

Pour bien énoncé les étapes essentiels, nous proposons de traiter un problème de pastille soumise à un champ magnétique variable issu d'une bobine longue.

IV.2.1 Formulation du problème de base

La figure IV. 1, illustre la géométrie du problème considérée. Il s'agit d'une longue bobine à noyau d'air de section transversale rectangulaire placée au-dessous d'une pastille supraconductrice (matériau à tester). Ce prototype est réalisé au laboratoire de GREEN [Mal12] [Dou14].

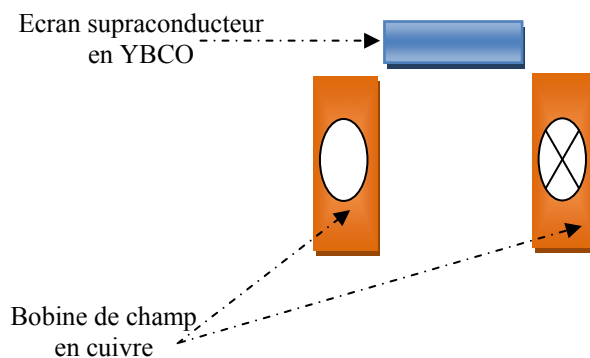


Figure IV.1: Ecran supraconducteur soumis à un champ d'une bobine.

Toute la configuration doit être traitée comme un problème bidimensionnel, dans lequel les formes conductrices sont composées par la juxtaposition de plusieurs très longs parallépipèdes représentés par des surfaces rectangulaires (Fig. IV.2). Chaque section transversale porte uniquement une densité de courant (notion de dipôle).

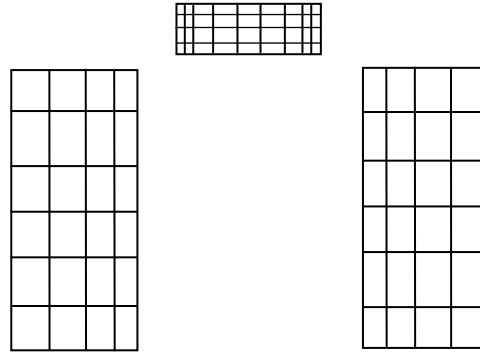


Figure IV.2: Discrétisation en 2D de tout le système électromagnétique

Chaque conducteur a une résistance propre et une self-inductance. On note par M le nombre total de subdivisions de la pastille et par N le nombre global des conducteurs en cuivre qui doivent être égaux pour les deux côtés de la bobine (aller, retour), figure IV. 3. Les éléments de la pastille sont court-circuités (induit) par contre la bobine est alimentée par une tension (E_1 - E_2).

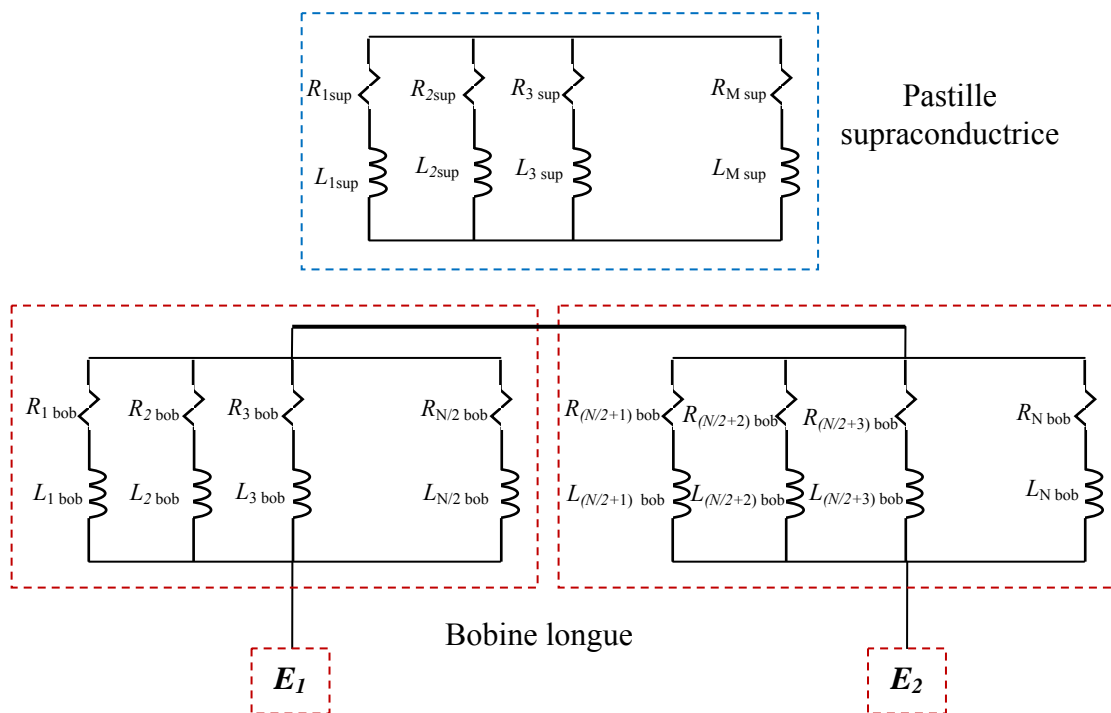


Figure IV.3: Schéma du circuit électrique équivalent du système

NB. La discrétisation peut être uniforme ou non selon le besoin. Pour le supraconducteur, il est préférable que les éléments soient plus fins aux extrémités.

IV. 2. 2 Calcul des paramètres électriques

a- Calcul des résistances de la bobine en cuivre et de la pastille SHTC

Pour la bobine en cuivre, on suppose que la résistivité est constante. Par conséquence, selon la loi d'Ohm l'expression de la résistance de la bobine en cuivre est :

$$R_{bob} = \rho_{bob} \frac{L}{S_{bob}} \quad (IV.1)$$

Avec :

L : La longueur longitudinale de la bobine

ρ_{bob} : La résistivité du matériau

S_{bob} : La section de la bobine conductrice

Toujours, par la loi d'Ohm, l'expression de résistance dans le matériau supraconducteur est :

$$R_{Sup} = \rho_{Sup} \frac{L}{S_{Sup}} \quad (IV.2)$$

En considérant la loi de puissance comme modèle de variation de la résistivité du supraconducteur, on peut écrire :

$$\rho_{Sup} = \left(\frac{E_c}{J_c} \right) \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} + \rho_0 \quad (IV.3)$$

Avec :

J : La densité de courant dans le supraconducteur

J_c : La densité de courant critique

E_c : Le Champ électrique critique

ρ_0 : La valeur initiale de la résistivité

b- Calcul des inductances propres et mutuelles pour les éléments de la bobine et de la pastille supraconductrice

Plusieurs travaux de calcul des inductances propres et mutuelles ont été réalisés. Commenant par [Hoe65] qui a développé le calcul des inductances propres et mutuelles entre des fils filiformes, des rubans et des conducteurs massives parallélépipédiques. [Rue72], a mis en œuvre le calcul des inductances dans des circuits complexe et a procédé à la résolution des systèmes matriciels obtenus. Les travaux cités sont faits pour des structures tridimensionnelles, il est facile d'obtenir les expressions en 2D à partir de celles en 3D. Autrement dit, on trouvera la même chose pour ce qui est déjà fait en utilisant le calcul par la distance moyenne géométrique (GMD) [Pau10] [Ant99] [Hig43].

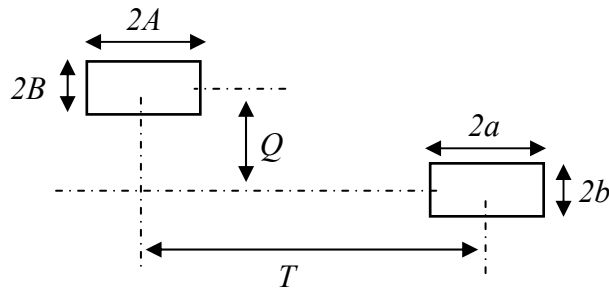


Figure IV.4 : Schéma de paramètres pour le calcul des inductances.

Le calcul de l'inductance par le biais des fonctions de Green, utilisant la distance moyenne géométrique (ln D) pour le cas spécifique illustré à la figure IV.4 de deux rectangles parallèles de largeurs (A, a) et d'épaisseurs (B, b) distants respectivement de T et de Q est donnée par :

$$\ln D = -\frac{25}{12} + \frac{1}{2(4ab)(4AB)} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 (-1)^{i+j+k+l} f(U, V) \quad (\text{IV.4})$$

Avec:

$$f(U, V) = \left(\frac{U^2 V^2}{4} - \frac{U^4}{24} - \frac{V^4}{24} \right) \ln(U^2 + V^2) + \frac{U^3 V}{3} \tan^{-1} \left(\frac{V}{U} \right) + \frac{UV^3}{3} \tan^{-1} \left(\frac{U}{V} \right) \quad (\text{IV.5})$$

Avec:

$$\begin{aligned} U &= T - (-1)^i a + (-1)^j A \\ V &= Q - (-1)^k b - (-1)^l B \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

Dans ce cas, l'inductance mutuelle pour les deux conducteurs de longueur L est donnée par :

$$M_p \cong \frac{\mu_0}{2\pi} L \left(\ln \frac{2L}{D} - 1 \right) \quad (\text{IV.7})$$

Aussi, l'inductance propre est donnée comme suit :

$$L_p \cong \frac{\mu_0}{2\pi} L \left(\ln \frac{2L}{a+b} + \frac{1}{2} \right) \quad (\text{IV.8})$$

c- Calcul des composantes de la densité de flux et du champ magnétique

Le calcul de l'induction et du champ magnétique est possible pour chaque conducteur une fois que la densité de courant correspondante sera déterminée. Les expressions des composantes de l'induction sont donnée par :

$$B_x = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \left(U \ln(U^2 + V^2) + 2V \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{U}{V} \right) \right) \quad (\text{IV.9})$$

$$B_y = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \left(V \ln(U^2 + V^2) + 2U \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{V}{U} \right) \right) \quad (\text{IV.10})$$

Avec les variables U et V sont donnés pour un conducteur seul :

$$\begin{aligned} U &= x - (-1)^i a \\ V &= y - (-1)^j b \end{aligned} \quad (\text{IV.11})$$

Les composantes du champ magnétique sont données par la relation $B = \mu_0 H$, soit en enlevant μ_0 des relations (IV.9 et IV.10)

$$H_x = \frac{J}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \left(U \ln(U^2 + V^2) + 2V \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{U}{V} \right) \right) \quad (\text{IV.12})$$

$$H_y = \frac{J}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \left(V \ln(U^2 + V^2) + 2U \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{V}{U} \right) \right) \quad (\text{IV.13})$$

IV.2.3 Représentation matricielles des paramètres électriques

Après le calcul des valeurs des résistances et des inductances (self et mutuelles), nous devons les mettre sous formes matricielles. En positions diagonales existent les résistances et les self-inductances, par contre dans les autres emplacements des matrices, on place les mutuelles. De ce fait, La matrice globale de résistances s'écrit :

$$[R_{tot}] = \begin{bmatrix} [R_{N bob}] & [0] \\ [0] & [R_{M sup}] \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

Avec :

$$[R_{N bob}] = \begin{bmatrix} R_{1 bob} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & R_{N bob} \end{bmatrix} \quad (IV.15)$$

$$[R_{M sup}] = \begin{bmatrix} R_{1 sup} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & R_{M sup} \end{bmatrix} \quad (IV.16)$$

La matrice globale des inductances est écrite :

$$[L_{tot}] = \begin{bmatrix} [L_{N bob}] & [M_{bob/sup}] \\ [M_{bob/sup}] & [L_{M sup}] \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Avec la matrice des inductances entre les conducteurs de la bobine seule, donnée par :

$$[L_{N bob}] = \begin{bmatrix} L_{1 bob} & \dots & M_{bob/bob} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{bob/bob} & \dots & L_{N bob} \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

La matrice des inductances entre les éléments du supraconducteur :

$$[L_{M sup}] = \begin{bmatrix} L_{1 sup} & \dots & M_{sup/sup} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{sup/sup} & \dots & L_{M sup} \end{bmatrix} \quad (IV.19)$$

La résolution est faite en respectant les détails de l'organigramme ci-dessous :

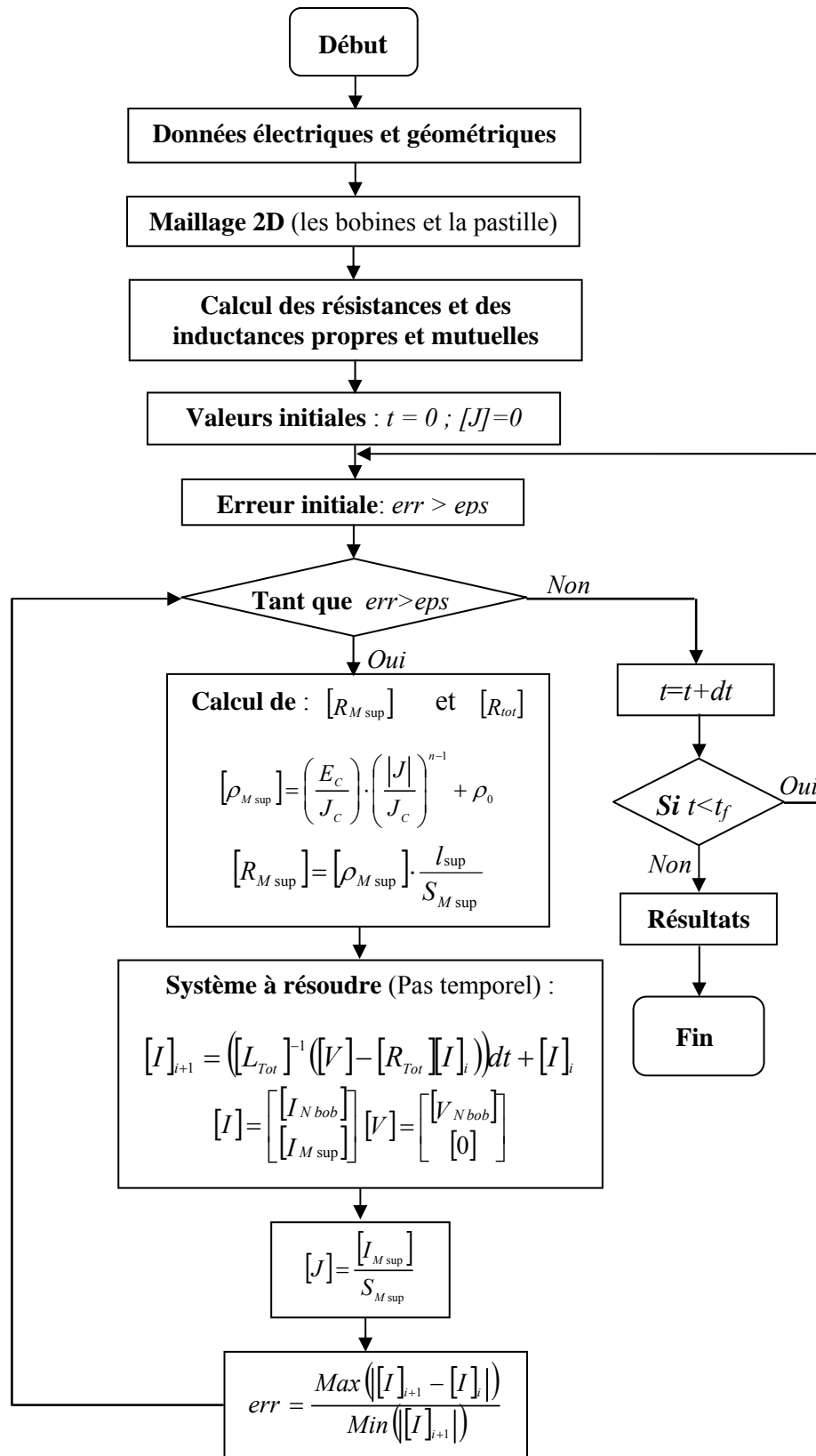


Figure IV.5: Organigramme des étapes de calcul.

IV.3 Applications de la méthode

IV.3.1 Application pour des longs conducteurs seuls alimentés en tension

a- Calcul des paramètres électriques

Nous commençons par des conducteurs ordinaires seuls de longueur finie. Dans ce cas, on n'aura pas besoin de la procédure itérative présentée en organigramme précédent. Nous subdivisons le conducteur en plusieurs à petites sections rectangulaires, figure IV. 6.

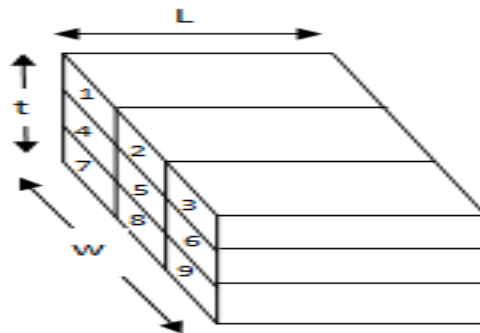


Figure IV.6 : Conducteur long subdivisé en plusieurs brins.

La première étape, consiste en la construction du circuit équivalent. Ce dernier est constitué de résistances et des self-inductances pour chaque brin, mais aussi des interactions mutuelles entre tous les brins du conducteur, figure IV. 7.

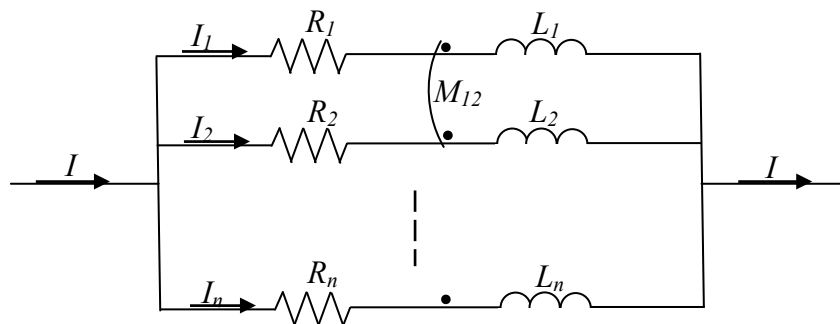


Figure IV.7 : Schéma électrique équivalent du conducteur.

La tension E harmonique est appliquée entre les bornes du conducteur. La même tension aussi est appliqué pour chaque subdivision (consideration parallele).

D'après les lois de KIRCHHOFF, on pourra écrire le système électrique en harmonique :

$$E = R_i I_i + j\omega L_i I_i + j\omega \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq i}}^N M_{pi} I_p \quad (IV.20)$$

Sous la forme matricielle, nous aurons :

$$\begin{pmatrix} E \\ E \\ \vdots \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{12} & \cdots & j\omega M_{1N} \\ j\omega M_{21} & R_2 + j\omega L_2 & \ddots & j\omega M_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega M_{N1} & j\omega M_{N2} & \cdots & R_N + j\omega M_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} \quad (IV.21)$$

De manière plus commode, en utilisant la notion d'impédance Z , le système précédent sera :

$$E = Z * I \quad (IV.22)$$

Ce dernier, pourra être résolu ainsi :

$$I = \text{inv}(Z) * E = Y * E \quad (IV.23)$$

Avec Y : est la matrice admittance.

Au niveau de notre code de calcul, nous prenons comme exemple un conducteur de longueur $L=0.5m$, de section carrée (5 mm de chaque côté) dont la numérotation pour la subdivision es celle indiquée en figure IV. 8. Le système matriciel d'impédance aura une taille de 100 lignes et 100 colonnes.

5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4.5	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99
4	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98
3.5	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97
3	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96
2.5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
2	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94
1.5	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93
1	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92
0.5	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91
0										
	0	1	2	3	4	5				

Figure IV. 8 : Numérotation choisie pour le stockage matriciel des paramètres électriques.

Pour observer les distributions et l'influence des inductances mutuelles sur une seule subdivision du conducteur, on choisit l'élément (1) et le (46). Le pas du maillage étant régulier et la forme des sections carrés est identiques. Nous montrons sur les deux figures IV. 9 et IV. 10 les inductances propres et mutuelles pour ces deux éléments choisis.

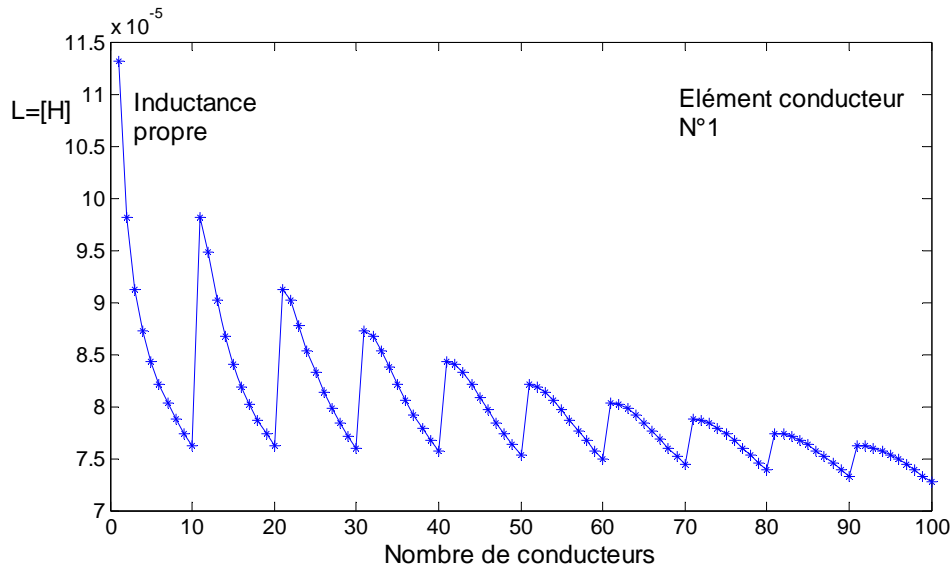


Figure IV.9 : Inductances propres et mutuelles pour le brin (1).

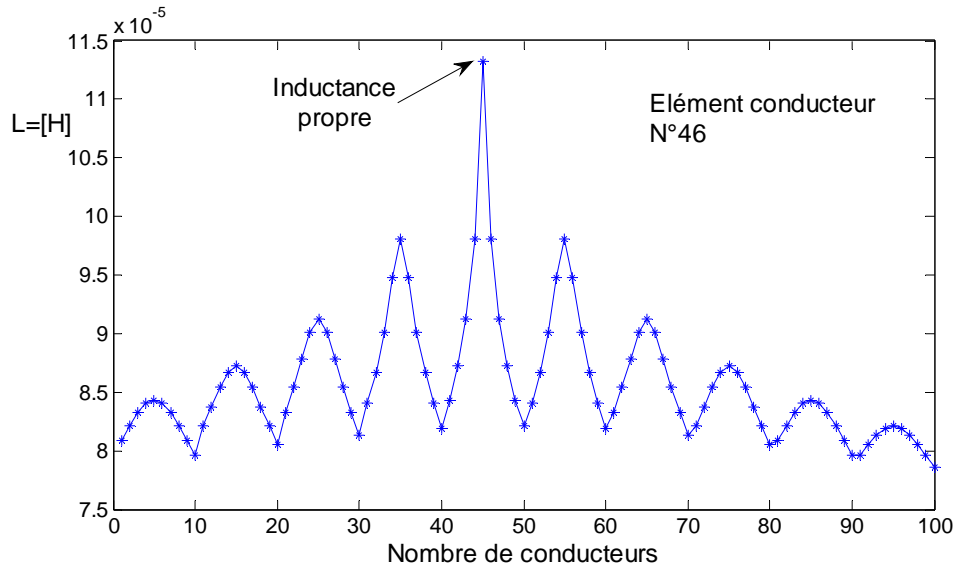


Figure IV.10 : Inductances propres et mutuelles pour le brin (46)

Pour l'élément (1) la première valeur représente l'inductance propre, c'est la valeur maximale, ensuite en remarque une forme de scie pour les mutuelles car les autres brins s'éloignent et retourne périodiquement pour chaque 10 valeurs (11, 21, 31 ...), figure IV. 8 et figure IV.9.

Le traçage des inductances pour l'élément (46) représente une symétrie dont la valeur propre est au milieu, figure IV.10. Les autres valeurs des inductances mutuelles présentent des petits lobes pour chaque colonne de brins de conducteurs.

b- Résolution en harmonique

On applique une tension harmonique d'amplitude $U=20V$ et de fréquence 200 Hz. Le conducteur, étant le même que celui de la section précédente (subdivisé en 100 éléments, Figure IV. 8). Après résolution du système d'équation (IV.23), nous aurons les contributions des courants sous la forme complexe. Le traçage de ces résultats montre l'apparition de l'effet de peau, les courants sont plus important aux extrémités qu'au centre. Avec cette même valeur de la fréquence, les contributions inductives sont moins importantes que les résistives et les parties réelles du courant dominant celles imaginaires, figure IV.11 et figure IV.12.

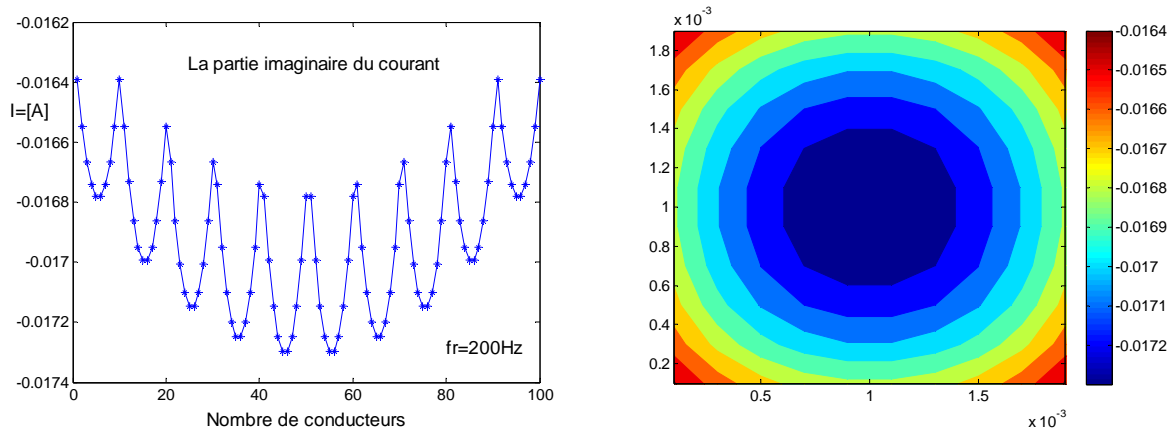


Figure IV. 11 : a) Composante imaginaire des courants pour chaque brin de conducteur (200Hz), b) représentation graphique de la composante imaginaire des courants.

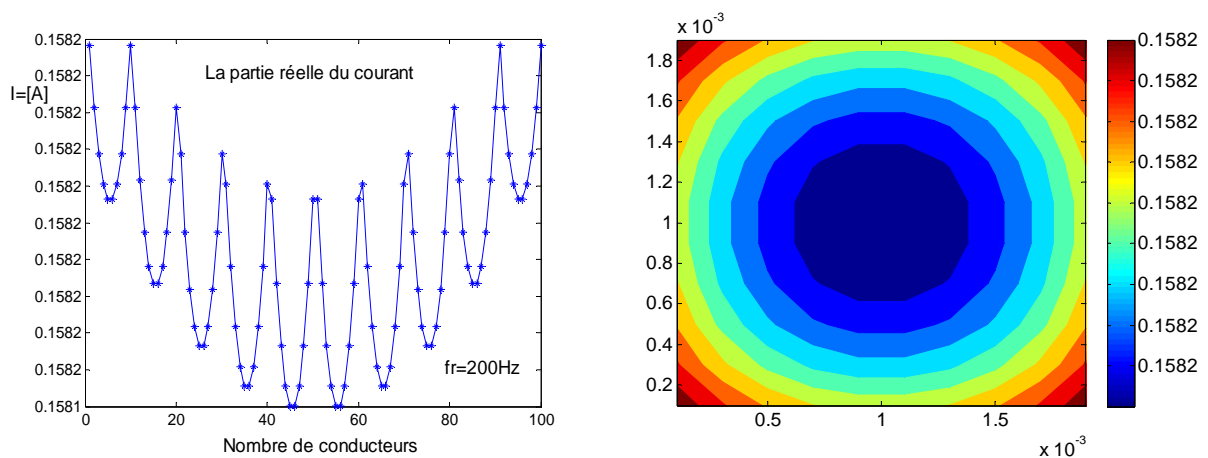


Figure IV. 12 : a) Composante réelle des courants pour chaque brin de conducteur (200Hz), b) représentation graphique de la composante réelles des courants.

Cette partie précise, pour laquelle on a traité le cas d'un seul conducteur ordinaire alimenté par une tension harmonique, n'est qu'une petite introduction technique permettant la compréhension et l'adaptation avec les notions des conducteurs longs magnétiquement couplés. Nous aurons pu réaliser une étude paramétrique plus approfondie, mais nos objectifs nous poussent à y aller vers l'insertion des matériaux supraconducteurs et la recherche de l'originalité.

IV.3.2 Application de la méthode pour le problème de base (bobine et pastille)

Nous reprenons le même dispositif représenté en figure IV.1 avec tous les paramètres géométriques et électriques indiquées au tableau IV.1.

	Désignation	Valeurs
Bulk en YBCO	Densité de courant J_e	$2 \times 10^9 \text{ A/m}^2$
	Exposant n	30
	Température de fonctionnement	20 K
	Largeur	40 mm
	Epaisseur	15 mm
Bobine En cuivre	Diamètre extérieur	65 mm
	Diamètre intérieur	54 mm
	Hauteur	400 mm

Tableau IV. 1: Paramètres physiques du problème électromagnétique.

Comme abordé dans le premier chapitre sur l'étude bibliographique des matériaux supraconducteurs, nous allons nous intéresser à la possibilité qu'offrent ces matériaux en termes d'écrantage magnétique. En effet, lors d'un blindage où d'un piégeage de flux avec un supraconducteur, la pastille supraconductrice crée naturellement des courants induits en inverse dans le matériau afin de s'opposer à la variation du champ magnétique extérieur. En implémentant notre algorithme et en assurant aussi la stabilité du supraconducteur à chaque itération nous obtenons les pénétrations de courant partielles relatives aux valeurs de la tension rampe appliquée ($U = K.t$, avec $K=35,28\text{V/s}$).

À la tension $U=141.12 \text{ V}$ correspondante au 4 seconde avec un pas de temps 0.001s et pour un maillage régulier du domaine (Fig. IV.13), nous observons déjà une bonne symétrie de pénétration du courant, figure IV.14. La pénétration est plus forte, si le champ magnétique l'est aussi. Pour ces raisons, nous constatons que la pénétration en bas de la pastille est plus forte qu'en haut, figure IV.14. Cela est confirmé par le tracé des chemins horizontaux des densités de courants respectivement en bas, au milieu et en haut (Fig. IV.15).

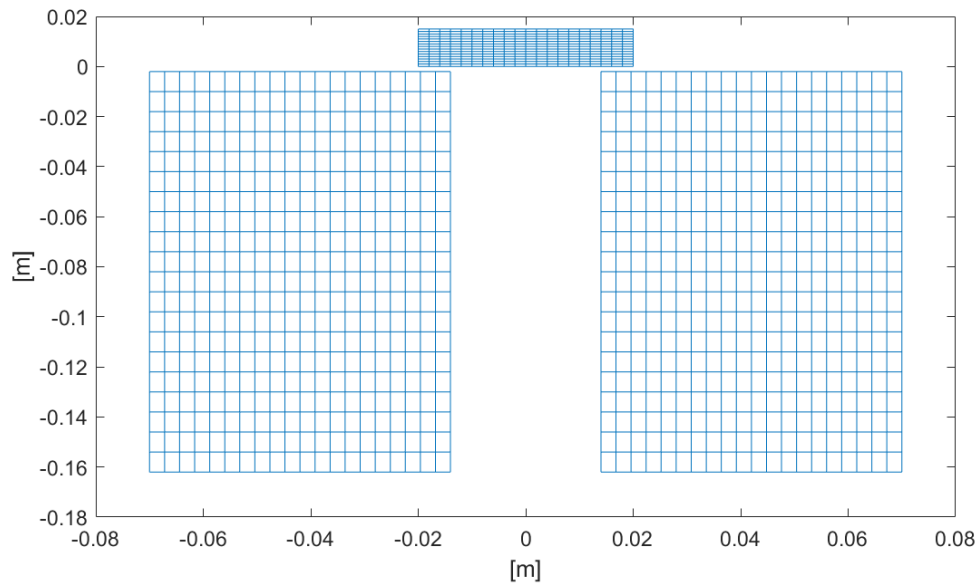


Figure IV.13: Maillage régulier du domaine d'étude (la pastille et la bobine).

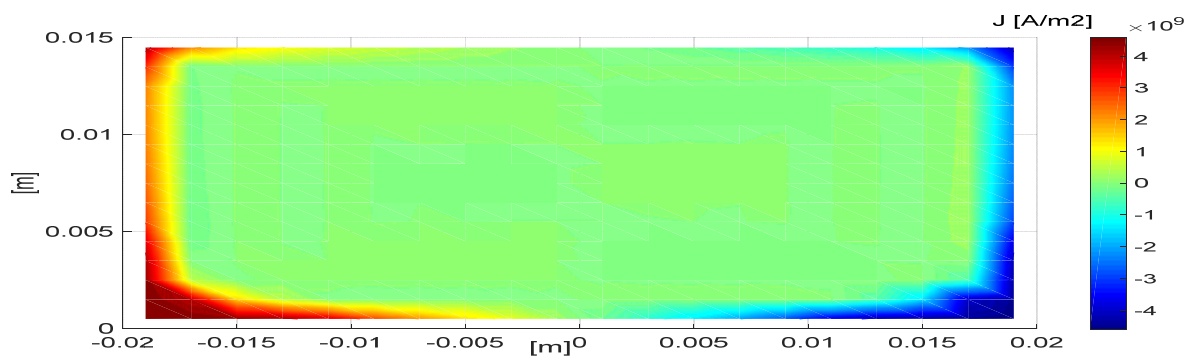


Figure IV.14: Pénétration des densités de courant dans la pastille.

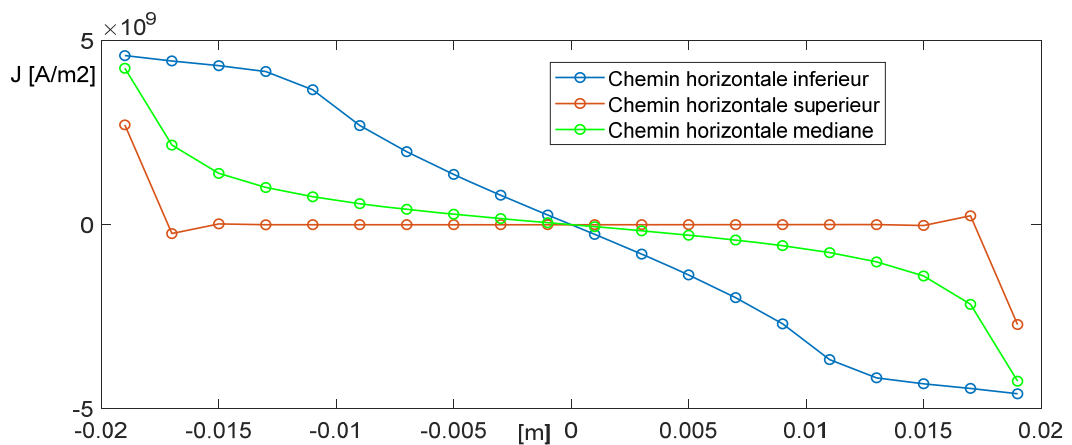


Figure IV.15: Densités des courants induites pour différents trajets horizontaux.

IV.3.3 Application de la méthode au MSRV

Rappelons le modèle du Moteur Supraconducteur du chapitre III, il est composé de trois bobines concentrique de section rectangulaires espacées de $2\pi/3$ chacune. Ces bobines sont logées dans des encoches et fixées à l'aide d'un matériau en fibre de verre qui possède une perméabilité égale à celle de l'air. Nous considérons aussi la même structure de rotor, avec la topologie (YBCO-Air), citée au chapitre précédent. La pastille supraconductrice est placée alors dans un champ magnétique variable créé par le bobinage de stator. Comme nous avons constaté au dessus (Fig. IV.14 et IV.15), la pastille SHTC empêche la pénétration des lignes de champ depuis sa surface extérieure. Cependant, si le champ magnétique appliqué est supérieur ou égale au champ critique de la pastille, cette dernière perd ses caractéristiques d'écrantage, ce qui provoque des problèmes de fonctionnement du moteur. Pour que nous puissions affranchir ce problème et concevoir les limites de notre moteur, intensité de la densité de courant nécessaire appliquée, nous utilisons notre nouvelle approche pour l'étude du comportement de la pastille supraconductrice.

Dans cette étude, on considère la même valeur du courant appliquée dans l'enroulement du stator et les mêmes caractéristiques géométriques et physiques du MSRV citées au chapitre III. Par contre, on enlève la culasse magnétique et on suppose que les lignes de champ ne dépassent pas le diamètre extérieur du stator. La figure IV.16 présente les points du maillage de la section des bobines et de la pastille SHTC.

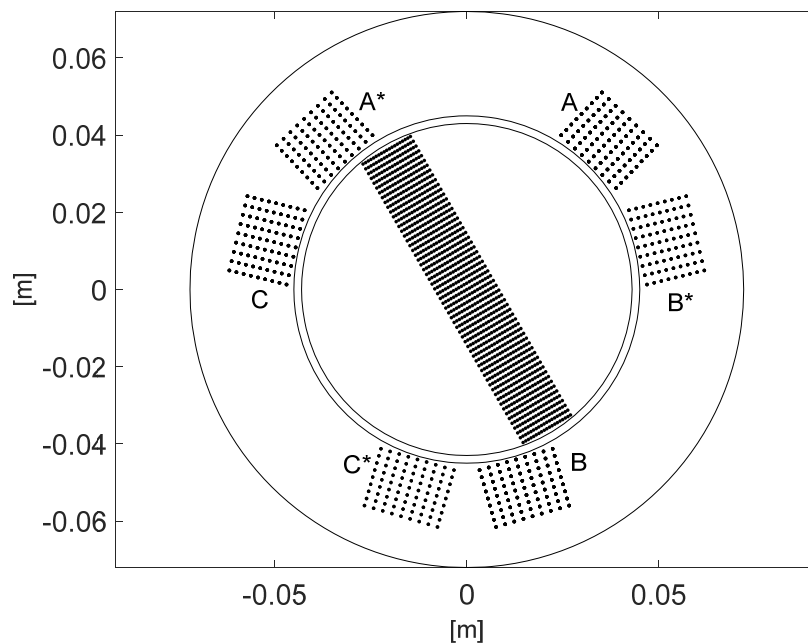


Figure IV.16 : Géométrie et points de maillage réalisés sous Matlab.

Pour la simulation du MSRV avec cette approche intégrale, on applique dans les bobines du stator une tension électrique correspondante à la valeur du courant utilisée dans la simulation numérique précédente (chapitre III). Pour déterminer cette valeur, on alimente en tension une seule phase (une bobine) du stator et on néglige les effets des deux autres bobines. Ajoutant à cela, la pastille SHTC est considérée avec des propriétés identiques à ceux de l'air. La distribution des densités de courant dans cette structure est montrée à la figure IV. 17.

Nous observons une densité de courant d'ordre 10^5 A/m² dans la surface de la bobine alimentée (Fig. IV.17). De plus, une faible valeur de J induite est constatée aux autres bobines non alimentées. Cela est dû à l'effet de la bobine inductrice sur les autres bobines.

Après détermination de la valeur d'impédance on obtient la valeur du courant électrique appliquée à la bobine. Nous aboutissons à une valeur de tension d'amplitude V_{max} égale à 128,6 V correspondant à l'amplitude de courant de 95 A appliquée aux bobines SHTC (même valeur de simulation numérique antérieur).

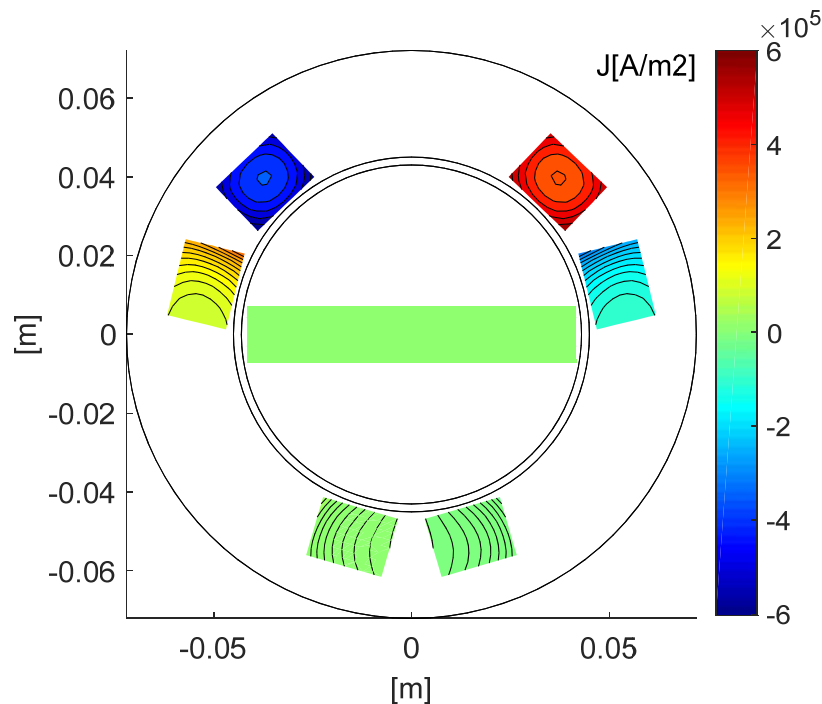


Figure IV.17: Densités du courant à la structure du moteur, avec l'alimentation d'une seule bobine et en absence de la pastille supraconductrice.

Pour la simulation du comportement du moteur, nous alimentons les bobines avec une tension triphasée équilibrée d'amplitude V_{max} et avec une fréquence de 50 Hz. Les valeurs des trois phases d'alimentation pour un temps de calcul de 0.0001 s sont regroupées dans le tableau IV.2 et la représentation des allures des phases est illustrée à la figure IV.18.

Tension	Expression	Temps	Valeur
V_A	$V_{\max} \cdot \sin(\omega t)$	0.0001 s	4,04 V
V_B	$V_{\max} \cdot \sin(\omega t - (2\pi/3))$	0.0001 s	-113,35 V
V_C	$V_{\max} \cdot \sin(\omega t + (2\pi/3))$	0.0001 s	109,31 V

Tableau IV. 2: Valeur des trois tensions de phases à l'instant (0.0001 s).

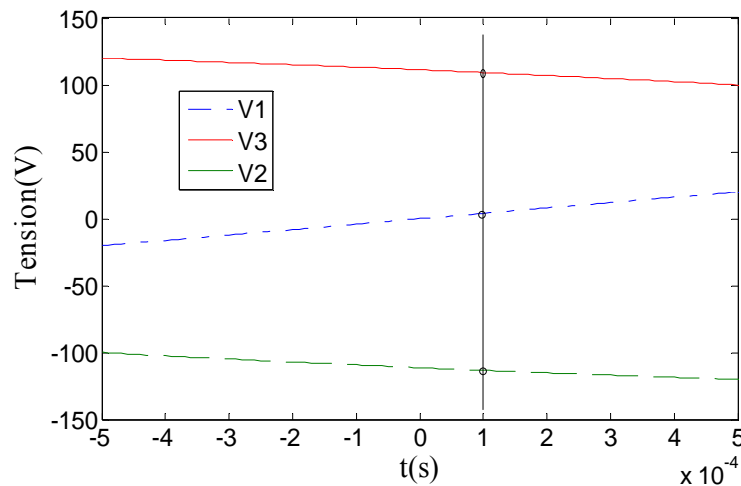


Figure IV.18: Représentation des trois tensions de phases d'alimentation des bobines.

Notre calcul est fait pour un temps de calcul de 0.0001s (soit cent fois le pas du temps), nous considérons le modèle de la loi en puissance comme une loi de comportement de la pastille supraconductrice avec une densité de courant critique (J_c) égale à $2 \cdot 10^7$ A/m² et une valeur de l'indice n égale à 30.

Après simulation, nous obtenons des densités de courants dans la structure du moteur, figure IV.19 et figure IV.20. La représentation de ces densités est faite pour une position de la pastille allant de 0° à 90° et avec un pas de 30°.

D'après ces figures (Fig. IV.19 et IV.20), nous observons une faible densité de courant à la surface de la pastille (bulk). Donc une faible pénétration des lignes de champ dans le matériau, ce qui implique que la valeur du champ autour de la pastille dépasse légèrement la valeur du champ critique qui caractérise le bulk. Dans ce cas, on constate que la pastille supraconductrice garde ses propriétés d'écrantage (caractéristiques réelles), car les lignes de champ externe pénètrent partiellement la surface de la pastille de l'extérieur. La densité maximale du courant sur la surface de la pastille ($4,28 \cdot 10^7$ A/m²) est observée pour une position de 0° par rapport à l'axe horizontal. Dans cette position, les deux côtés de la pastille

sont très proches des bobines inductrices (V_2 et V_3) d'où s'explique l'influence intense du champ magnétique (Fig. IV.19, 0°).

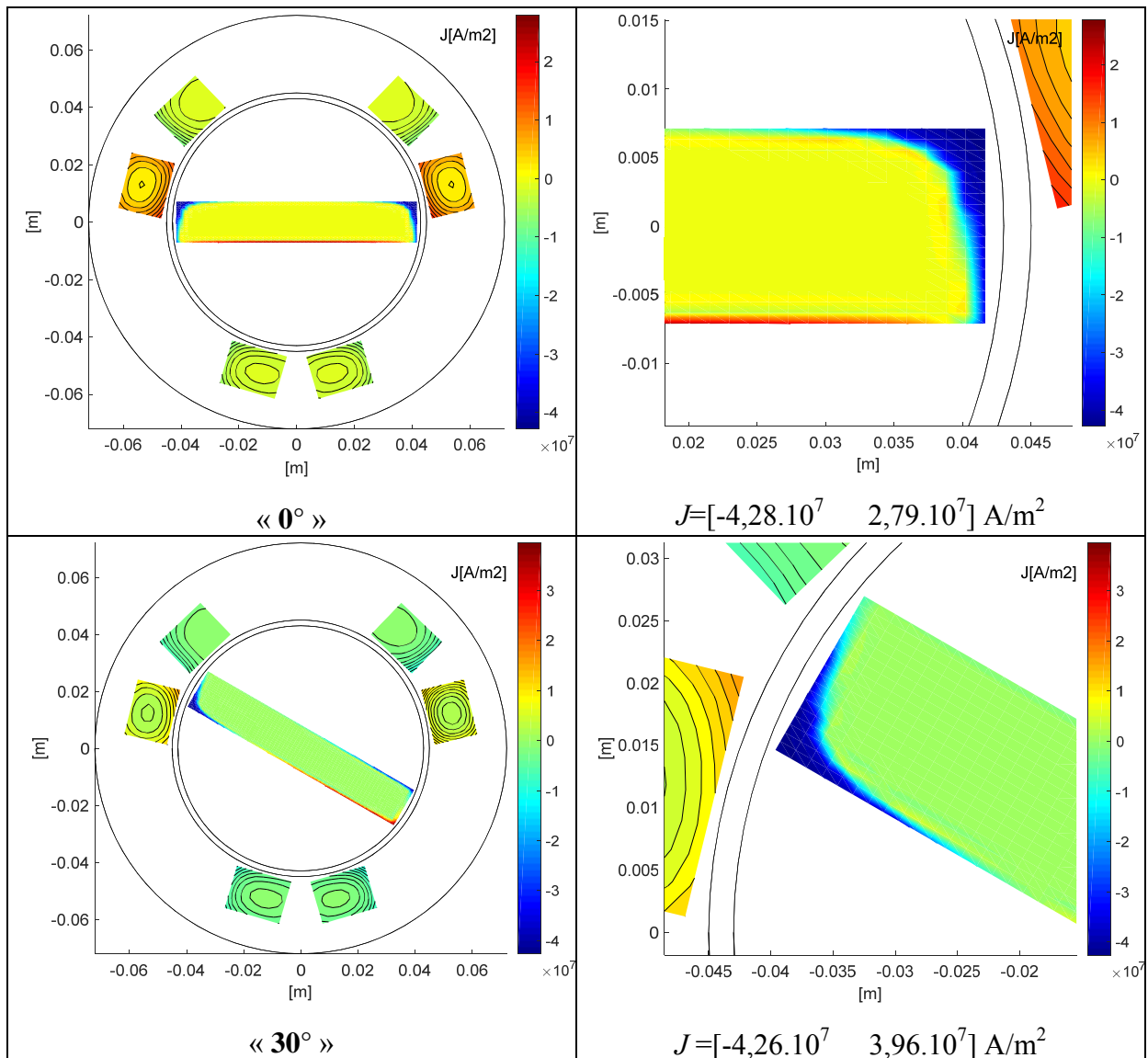


Figure IV.19: Densités du courant à la structure du moteur suivant la position de la pastille (0° et 30°) ; (à gauche) vue globale, (à droite) zoom sur la pastille.

Sur la figure IV.19 et pour une position de 0° , La pastille est située entre les deux bobines alimentées par des valeurs de tensions pratiquement identique mais de sens opposés, tableau IV.2 (V_2 et V_3). Donc, les deux côtés de la pastille subissent des champs pratiquement identiques. Pour cela, nous remarquons pratiquement une symétrie de la distribution des densités de courant sur les deux côtés de la pastille (côté droit et gauche).

Une notre pseudo-symétrie par rapport à l'axe verticale de la distribution de J est observée plus clairement à la partie basse située à 90° , figure IV.19. Les deux coins de cette dernière sont exposés à des valeurs proches du champ, plus précisément les courants induits

au coin droit sont légèrement supérieurs, à cause du minime avantage de V_3 par rapport à V_2 (Tableau IV.2).

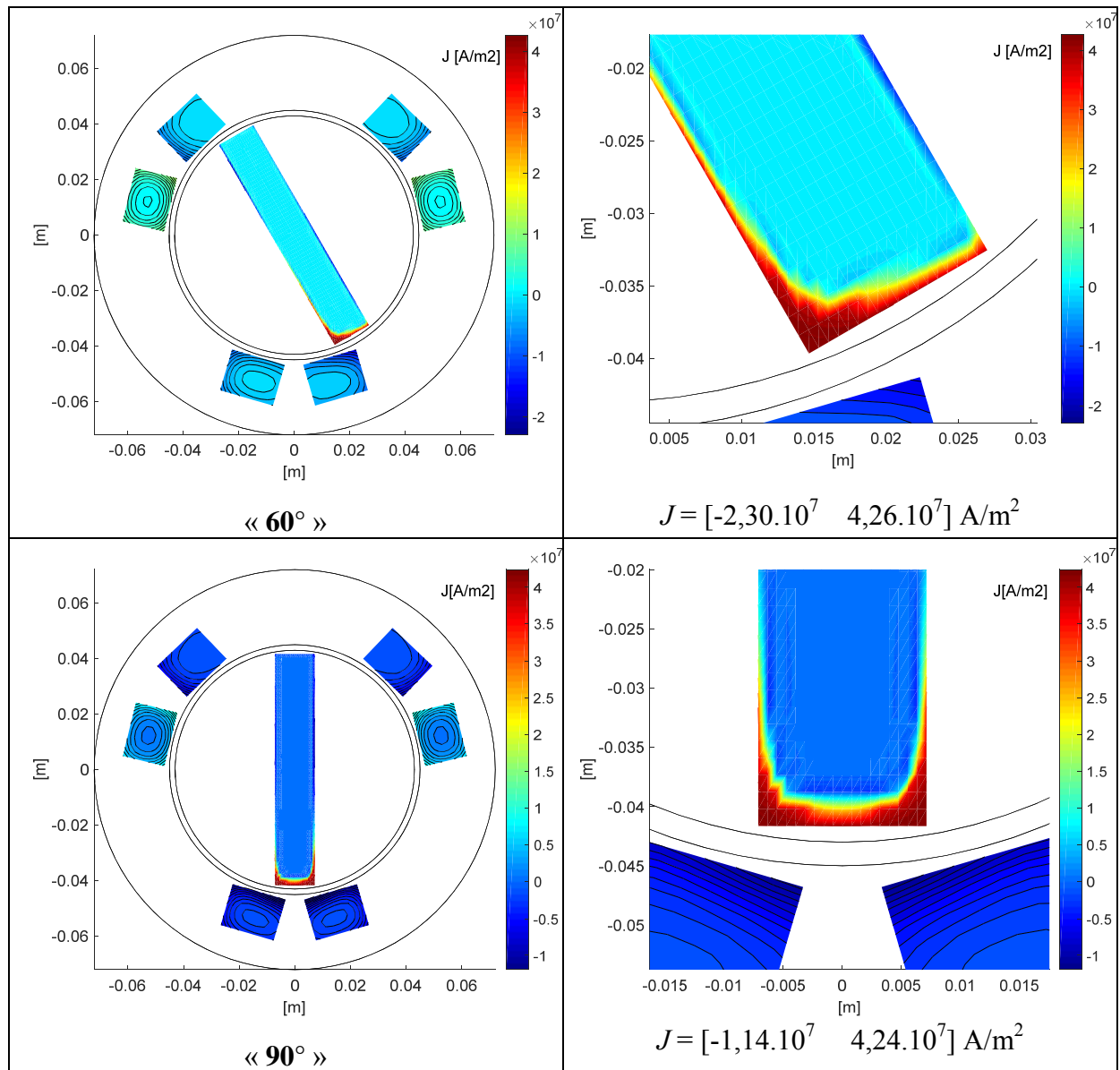
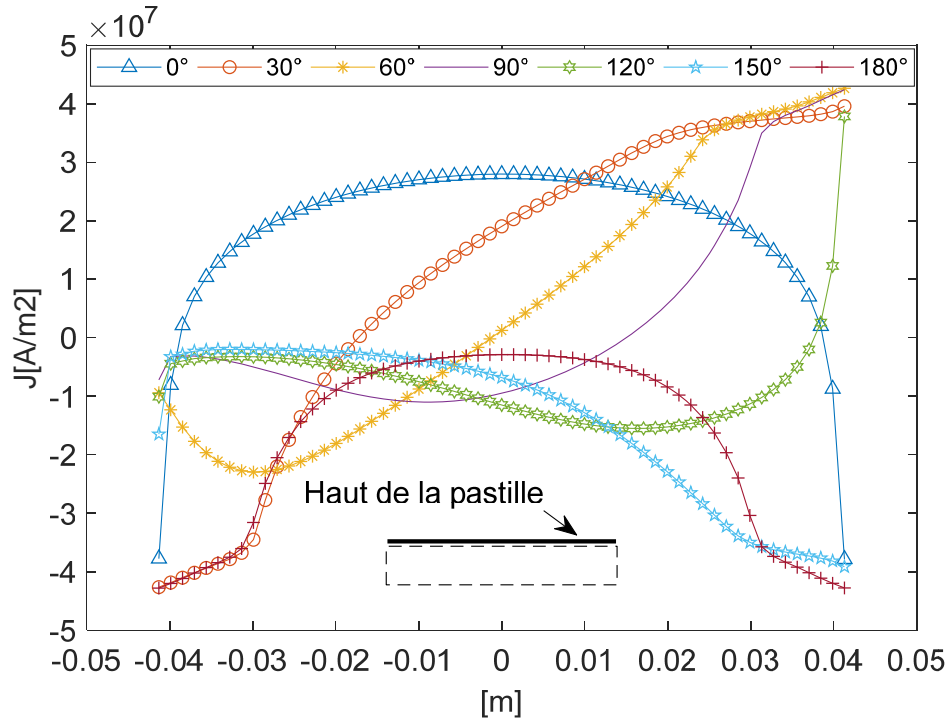


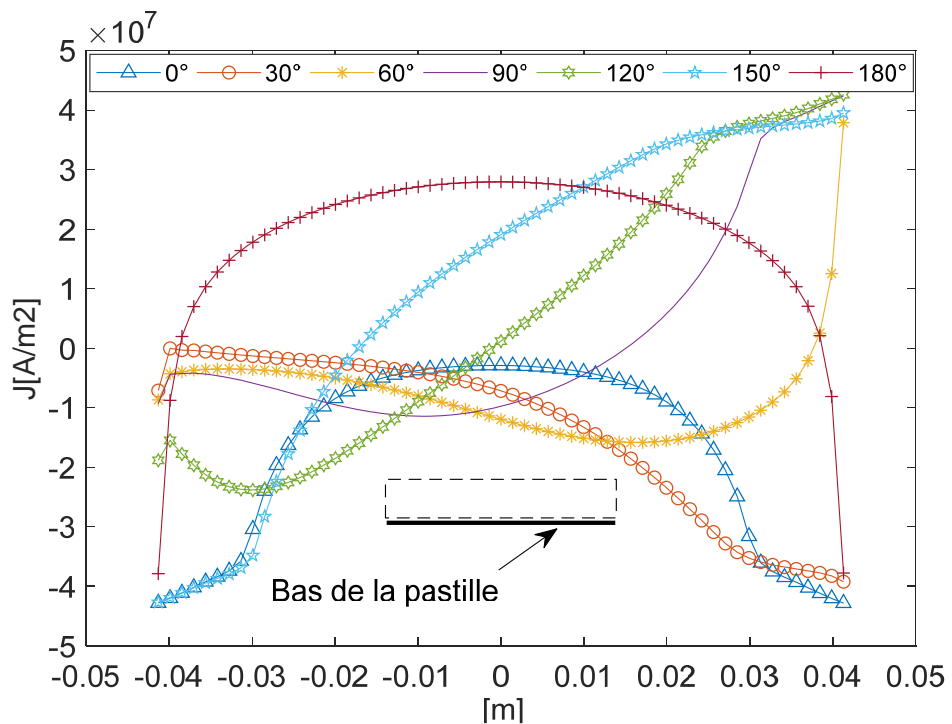
Figure IV.20: Densités du courant à la structure du moteur suivant la position de la pastille (60°, 90°)

Pour les positions respectives (30° et 60°) de la pastille conformément aux figures IV.19 et IV.20, la valeur maximale de la densité J est pratiquement égale pour les deux situations (environs $2,26 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$). Sachant que la pastille du rotor est en mouvement, donc la densité J n'est pas répartie de la même manière d'une position. De plus, la distribution de cette densité n'est pas homogène sur la surface de la pastille, pour cela nous présentons à la figure IV.21 la variation de la densité J aux quatre côtés du contour limitant la surface rectangulaire

de la pastille (haut, bas, côté droit et côté gauche) pour différentes positions du rotor (de 0° à 180° avec un pas de 30°).



(a)



(b)

Figure IV.21: Densités du courant à la surface de la pastille pour différentes position du bulk: (a) Haut ; (b) Bas.

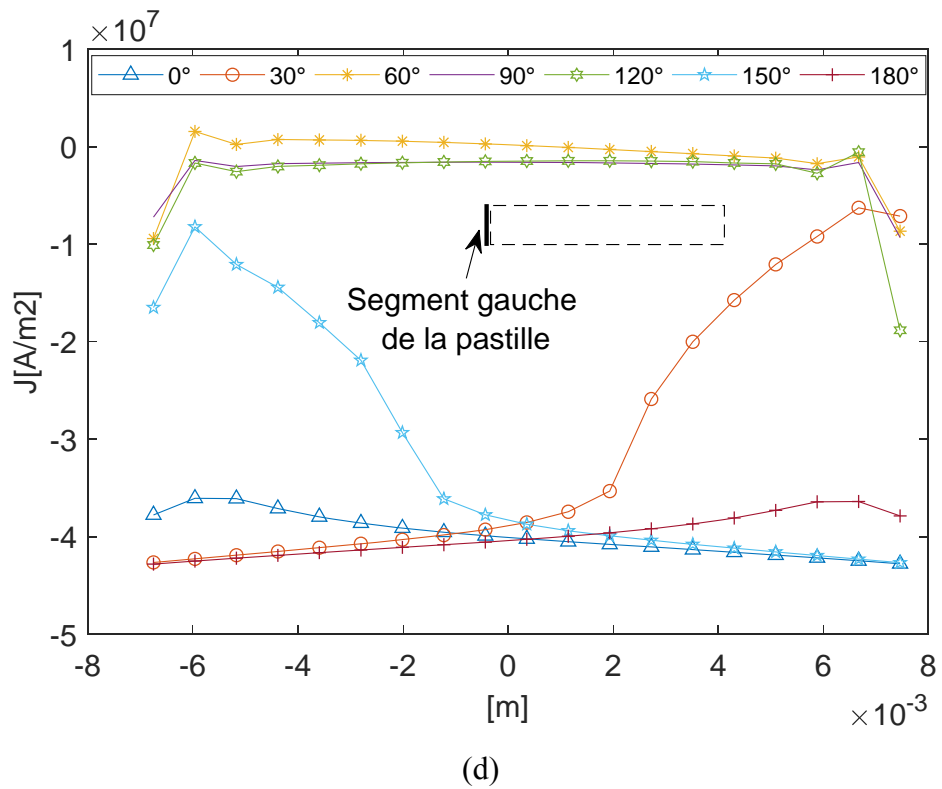
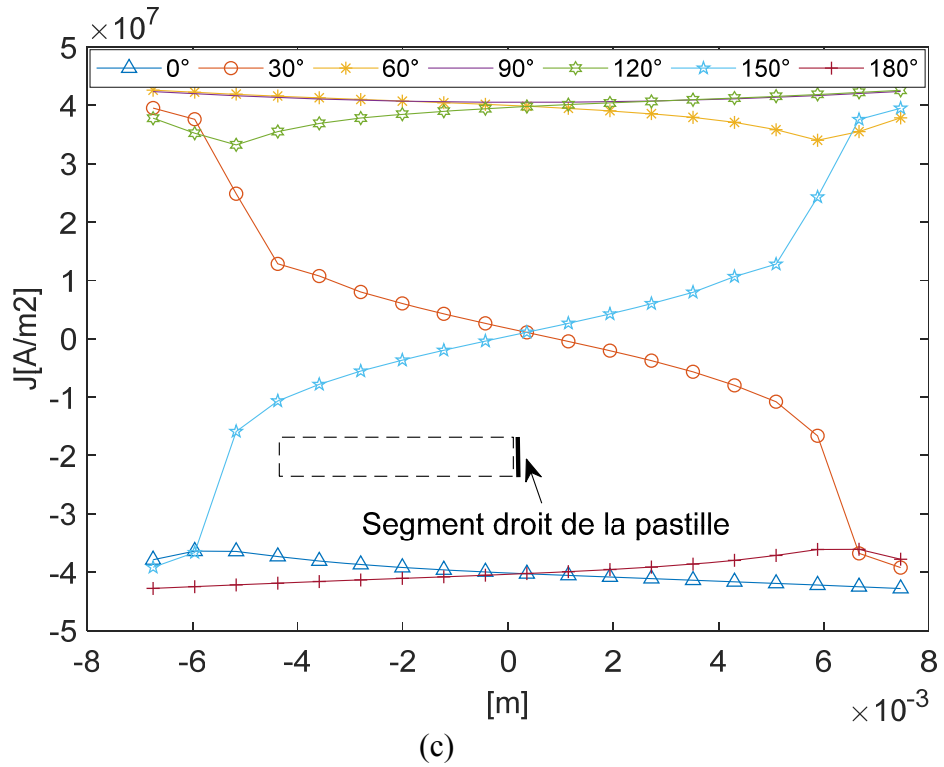


Figure IV.22: Densité du courant à la surface de la pastille pour différentes positions du bulk : (c) Segment droit ; (d) Segment gauche.

Dans les figures IV.21 et IV.22, nous remarquons que les valeurs les plus intenses des densités de courants se localisent dans les coins de la pastille, à proximité des bobines inductrices. Nous confirmons à travers ces courbes que la densité du courant maximal sur la

surface de la pastille et pour les différentes positions du rotor est environs $4,26 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$, la même valeur observée aux figures IV.19 et IV.20. Nous remarquons aussi que la distribution de J en haut de la pastille à 0° est identique à celle en bas à 180° . La même chose pour les pairs ($30^\circ, 150^\circ$) et ($60^\circ, 120^\circ$).

Nous somme convaincu, que la pastille est sensible à toute variation du champ magnétique. Du coup, en gardant la valeur V_{max} comme alimentation et toute les considérations passées, sauf que la position qui est ramenée à (0°). Cette dernière est choisie puisque elle présente la plus grande densité de courant à la surface de pastille par rapport aux autres positions (voir figures au-dessus). Nous considérons de plus, trois valeurs différentes de la densité de courant critique J_c ($2 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$, $2 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ et $2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$). L'objectif de cette simulation est de déterminer la densité J_c qui correspond mieux à notre pastille supraconductrice ou bien pour un fonctionnement stable du moteur.

Les résultats de notre simulation sont affichés à la figure IV. 22. A la position choisie de la pastille (0°) et dans le cas d'une densité de courant critique J_c égale $2 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$, on constate que nous sommes dans une situation de pénétration très faible, particulièrement, sur le coin droit et gauche en haut de la pastille (Fig. IV. 23). La densité de courant maximale observée dans la pastille en valeur absolue est égale $6,07 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$. Dans le cas d'une densité de courant critique J_c de $2 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$, on remarque une légère augmentation de pénétration sur les mêmes endroits précédents, dont une valeur maximale d'environ $4 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ est observée. Dans ces deux cas, on constate que la pastille est dans un état d'écrantage parfait. Contrairement à ces deux cas, une situation de pénétration différente est observée pour le cas de J_c égale $2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. La pastille supraconductrice est soumise à une forte pénétration dans les deux côtés droit et gauche. La valeur maximale enregistrée de J est $5,12 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. On conclut pour cette situation que la pastille a une capacité d'écrantage de champ très faible par rapport aux autres cas surtout au bord de la surface, et elle garde sa propriété d'écrantage uniquement au milieu de la surface.

Au-delà d'une densité de courant critique J_c égale $2 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$, la pastille ne subit pas d'importantes pénétrations ce qui est toujours souhaitable pour le bon fonctionnement du moteur. Par contre, pour les valeurs inférieures, les pénétrations sont de plus en plus importantes ce qui provoquent des dysfonctionnements et des instabilités du moteur. Ces pareils cas sont observés en appliquant la valeur de J_c égale à $2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, figure IV.23.

Pour garder aussi le bon fonctionnement du moteur nous pouvons agir de façon importante sur la tension d'alimentation appliquée au niveau des phases ainsi que sur la température de refroidissement.

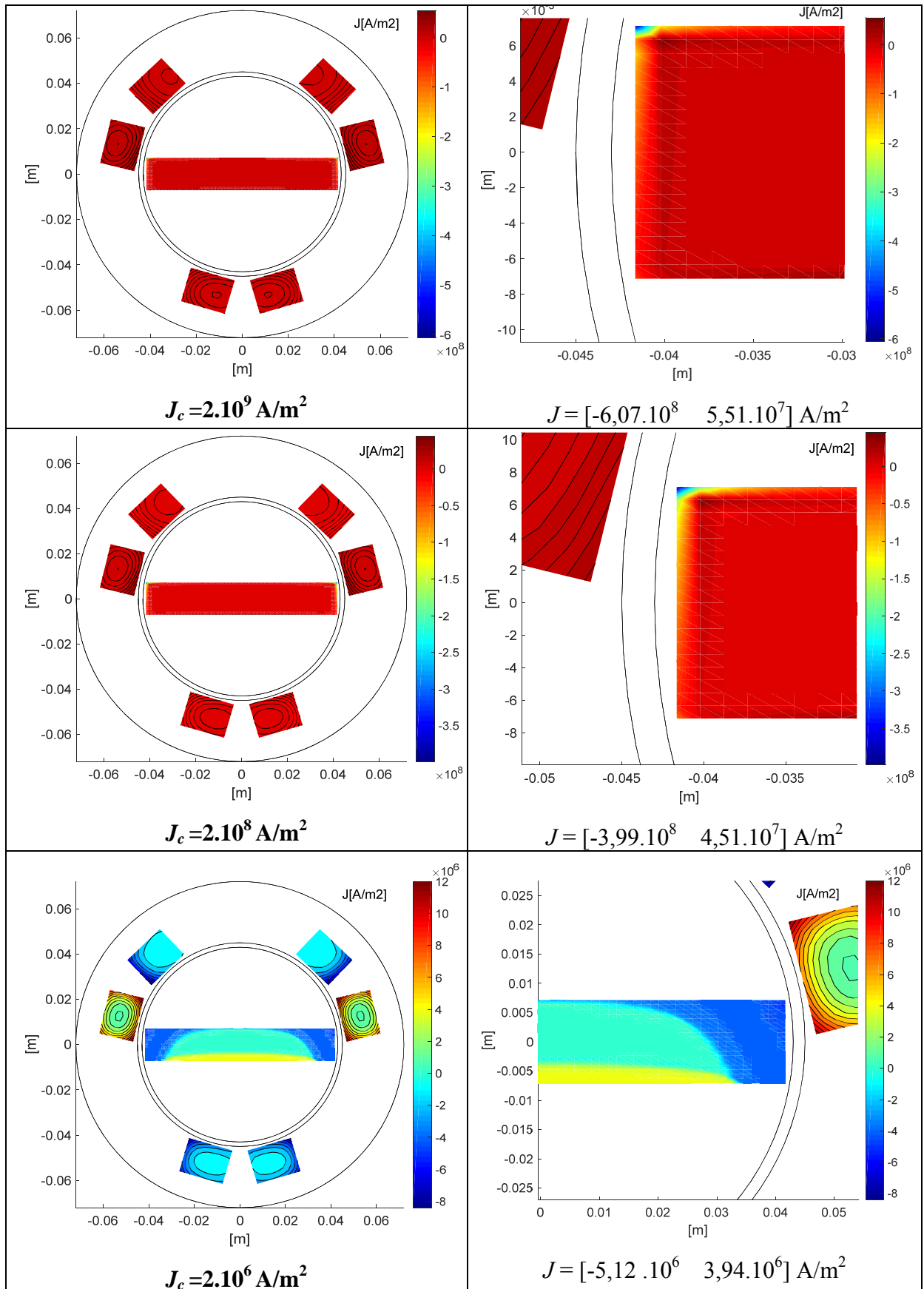


Figure IV.23: Densités du courant à la position de la pastille à 0° , avec trois différentes valeurs de J_c ; (à gauche) vue complète, (à droite) zoom sur la pastille.

IV.4 Conclusion

Ce travail présente une nouvelle contribution dans la modélisation du comportement des matériaux supraconducteurs en présence d'excitations de bobines électriques. Le comportement total est décrit par une approche intégrale basée sur les circuits électriques magnétiquement couplés. Ces derniers sont couramment utilisés pour les conducteurs ordinaires en électronique mais leur utilisation pour les supraconducteurs n'a jamais été réalisée jusqu'à présent en raison de leurs comportements fortement non linéaires. L'idée principale est d'insérer un algorithme non linéaire capable de prédire le changement de grandeurs électriques dans le supraconducteur et de les réinjecter à chaque itération. Les résultats démontrent les fameuses pénétrations connues pour les supraconducteurs. Cette approche intégrale est utilisée pour l'étude du comportement de la pastille supraconductrice du moteur supraconducteur. Cette méthode prometteuse, pourra être utilisée pour différentes applications contenant des matériaux supraconducteurs.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La recherche menée dans le cadre de cette thèse, concerne la conversion électromécanique de l'énergie mettant en œuvre des matériaux supraconducteurs. L'objectif de cette étude est la recherche d'une nouvelle topologie de machines électriques utilisant des éléments supraconducteurs massifs ou filaires pour but d'augmenter les performances de ces dernières.

Nous avons débuté notre travail par une recherche bibliographique approfondie. Cette première étape a été bien établie au premier et au deuxième chapitre sous forme d'un guide technologique sur les supraconducteurs à basse et à haute températures critiques et leurs applications en particulier dans les machines synchrones. Le but étant d'anticiper, d'une part, les problèmes qui peuvent apparaître durant les phases d'étude du moteur SHTC et, d'autre part, d'observer les évolutions rapides des matériaux et de la cryogénie.

La connaissance des caractéristiques intrinsèques des matériaux supraconducteurs et de leur utilisation en vue de concevoir une machine tournante était l'objectif principal du troisième chapitre. Ce dernier comporte trois parties essentielles. La première est le développement d'une structure de stator pour un moteur à réluctance variable dans lequel nous nous sommes basé sur les caractéristiques des matériaux supraconducteurs de forme de ruban en BSCCO. Une topologie optimale de stator avec un enroulement concentrique triphasé a été envisagée afin de générer un fort champ magnétique dans l'entrefer de la machine.

La deuxième partie été dédiée à la conception de la structure de rotor qui utilise essentiellement les matériaux SHTC sous forme massif en YBCO. Cette dernière possède un comportement diamagnétique parfait et se présente comme un écran magnétique.

La dernière partie essentielle est le choix de système de refroidissement du moteur y compris les matériaux supraconducteurs utilisés. L'immersion totale de la machine dans l'azote liquide (77 K) a été préférée, ce qui a permis de faciliter la conception de la topologie et de conserver un faible entrefer pour le moteur.

Pour le dimensionnement de notre moteur supraconducteur, nous avons présenté une modélisation par éléments finis à l'aide du logiciel FEMM. Des résultats de calcul du couple ainsi de ses ondulations ont été présentés pour but de déterminer l'adaptation des dimensions de la pastille SHTC utilisée.

Afin de déterminer l'adéquation de la pastille SHTC avec le rotor, des calculs rigoureux du couple et de ses ondulations ont été faites en considérant une forte densité de courant dans les enroulements statoriques supraconducteurs.

Dans le chapitre quatre, une nouvelle approche analytique a été appliquée au MSR_V pour but de calculer les densités de courants induits dans la surface externe de la pastille supraconductrice de rotor, afin de prédire les limites de ce matériau. Cette approche originale est très bénéfique pour l'étude des matériaux supraconducteurs et en particulier les machines électriques supraconductrices. Elle nous a permis de comprendre les limites de notre moteur. Des résultats très intéressants ont été obtenus lors de la simulation du moteur avec cette approche, notamment ce qui concerne la distribution des densités de courants induits dans la pastille et le choix de la densité de courant critique de ce matériau supraconducteur.

Aussi, dans le cadre de cette étude, un moteur à réluctance entièrement supraconducteur a été modélisé par la méthode des éléments finis en 2D (FEM). La conception proposée du MSR_V nous a donné une valeur du couple importante avec de faibles ondulations.

Nous constatons que l'introduction des matériaux SHTC dans les deux parties statorique et rotorique a permis de réduire à moitié le volume total de la machine par comparaison à des moteurs conventionnels avec des rotors SHTC ayant la même puissance de sortie. Cette nouvelle conception permet donc de produire des moteurs plus compacts.

La forme d'enroulement concentrique facilite la conception de la structure de stator et nécessite moins de matériaux par rapport à un enroulement distribué. De plus, la présence de l'écran magnétique avec un matériau ferromagnétique (YBCO-Fer), dans la topologie du rotor, a nettement amélioré la valeur du couple en le multipliant par deux par rapport à celui de la topologie sans matériau ferromagnétique (YBCO-Air). En plus, elle offre une bonne protection mécanique pour la pastille SHTC. Le faible pourcentage évalué des pertes dans l'enroulement supraconducteurs du stator, confirme la qualité de la puissance de sortie développée par notre conception du moteur SHTC.

La méthode semi-analytique appliquée au MSR_V présente des résultats très encourageants, notamment pour la prise en compte du comportement réel lors de la modélisation des matériaux supraconducteurs et par conséquent, l'étude des machines électriques supraconductrices.

Finalement, nous avons pu étudier un prototype du moteur synchrone supraconducteur à réluctance variable avec ses avantages et ses inconvénients. Afin d'achever le dimensionnement de cette structure, une suite possible à cette étude serait de faire des calculs plus précis des pertes AC dues aux enroulements supraconducteurs. Pour ces raisons, les

résultats obtenus lors de l'utilisation de la méthode semi-analytique montrent que d'autres facteurs plus importants pourront améliorer la conception et le dimensionnement de la machine.

Après cette étude, nous comptons continuer à travailler sur les matériaux supraconducteurs, d'autres types de moteurs et aussi le perfectionnement des modèles semi-analytiques et numériques.

En termes de perspectives, il reste à implémenter (appliquer) la méthode semi-analytique pour le calcul :

- Des pertes AC dues aux bobinages supraconducteurs du stator.
- De champ magnétique sur les rubans supraconducteurs utilisés dans le bobinage statorique.
- Des inductances directes et transversales du MSR.V.
- Des densités de courants induits dans la surface de la pastille en présence du matériau ferromagnétique.



Bibliographie



Bibliographie

- [Ain15] : M. D. Ainslie and H. Fujishiro, “Modelling of bulk superconductor magnetization”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.28, 2015.
- [Ain14] : M. D. Ainslie, H. Fujishiro, T. Ujiie, J. Zou, A. R. Dennis, Y.H. Shi, and D. A. Cardwell, “Modelling and comparison of trapped fields in (RE)BCO bulk superconductors for activation using pulsed field magnetization”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.27, p.065008, 2014.
- [Ain16] : Mark Ainslie, Mitsuru Izumi and Motohiro Miki, “Recent advances in superconducting rotating machines: an introduction to the Focus on Superconducting Rotating Machines”, *Superconductor Science and Technology*, Vol. 29, N. 6, id.060303, 2016.
- [Ail06] : A. El Hadj, « Machine synchrone à plots supraconducteurs : Etude et réalisation », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2006.
- [Alh15] : Rada ALHASAN " Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur". Thèse doctorat de l'université de Lorraine, 2015.
- [Alm08] : M. K. Al-Mosawi, W. Bailey, C. Beduz, K. Goddard, et Y. Yang, “Development of a coreless HTS synchronous generator operating at sub-cooled liquid nitrogen temperatures”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 97, p.012205, 2008.
- [Alm05] : M. K. Al-Mosawi, C. Beduz, et Y. Yang, “Construction of a 100 kVA high temperature superconducting synchronous generator” , *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, Vol.15, N.2, p. 2182 - 2185, 2005.
- [Ant99] : G. Antonini, A. Orlandi, and C.R. Paul, “Internal Impedance of Conductors of rectangular Cross Section, “*IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.47, N.7, p. 979-985, 1999.
- [Aya08] : N. Ayai, S. obayashi, M. Kikuchi, T. Ishida, J. Fujikami, K. Yamazaki, S. Yamade, K. Tatamidani, K. Hayashi, K. Sato, H. Kitaguchi, H. Kamakura, K. Osamura, J. Shimoyama, H. Kamijyo and Y. Fukumoto “Progress in performance of DI-BSCCO family”, *Physica C: Superconductivity*, Vol.468, N.15-20, p.1747-1752, 2008.

B

- [Bad18] : M. Badakhshan, S.M. Mousavi G., “Flux-lock type of superconducting fault current limiters: a comprehensive review”, *Physica C, Supercond. Appl.*, Vol.547, p. 51–54. 2018.
- [Bai00] : S. K. Baik et al., “A 30 kVA superconducting generator development and basic tests”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.10, N.1, p. 947 -950, 2000.

C

- [**Cho11**] : Y. Cho, H. Choi, B. Jung, “Operational characteristics in the three-phase transformer type SFCL with neutral line based on sequential reclosing process”, *Physica C: Supercond. Appl. Physics*, Vol. 471 (21-22), p.1341–1347, 2011.
- [**Che06**] : L. Chen, Y. S. Cha, H. Claus, H. Zheng, B. W. Veal, and F. Z. Peng, “Optimization of Pulsed Current Profile for Magnetizing High Bulk YBCO Superconductors,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 34, pp. 1702–1708, 2006.
- [**Cic16**] : Jérémie Cicéron, Arnaud Badel, Pascal Tixador, “Stockage d’énergie par supraconducteurs et lanceur électromagnétique S3EL ”, *Symposium de Génie Electrique (SGE 2016) : EF-EPF-MGE 2016*, 7-9 Juin 2016, Grenoble, France
- [**Coo99**] : T.A. Coombs, A. M. Campbell, R. storey and R. Weller, “Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels”, *IEEE trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, pp. 968-971, 1999.
- [**Chu02**] : Y.D. Chun, Y.H. Kim, S. Kim, et J. Lee, “ Transient analysis of superconducting generator under the three phases of sudden grounding fault condition”, *Physica C: Superconductivity*, Vol. 372-376, Part 3, N.0, p. 1546-1550, 2002.
- [**Chu05**] : S. D. Chu, and S. Torii, “Torque-speed characteristics of superconducting synchronous reluctance motors with DyBCO bulk in the rotor”, *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol. 15, N.2, p. 2178-2181, 2005.
- D**
- [**Dol15**] : Bastien Dolisy, ‘‘Étude d’un moteur supraconducteur à flux axial avec une transmission magnétique supraconductrice intégrée ’’, *Thèse doctorat de l’université de Lorraine*, 2015.
- [**Dur14**] : J. H. Durrell, A. R. Dennis, J. Jaroszynski, M. D. Ainslie, K. G. B. Palmer, Y-H. Shi, A. M. Campbell, J. Hull, M. Strasik, E. E. Hellstrom, D. A. Cardwell, “A Trapped Field of 17.6 T in Melt-Processed, Bulk Gd-Ba-Cu-O Reinforced with Shrink-Fit Steel”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 27, 082001, 2014.
- [**Dum15**] : M. Dumitrescu , V. Stevan, C. Plescan, C. I. Bobe, G. M. Dragne, C. N. Badea, G. Dumitru “Magnetic Sustentation Applications on the railway traction for high speed maglev trains” ,*Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBv*, Vol. 8, N.57, Special Issue N.1 , 2015.
- [**Dou16**] : Bruno Douine, Kévin Berger, Jean Lévêque, Guanbin Huang, El Hadj Ailam, Mohamed Elbaa, “Environnement cryogénique des systèmes supraconducteurs en génie électrique”, *Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb CISTEM*, Maroc, 2016.

[**Dou14**] : B. Douine, G. Male, T. Lubin, S. Mezani, J. Leveque, K. Berger ‘‘Improvement of YBCO Superconductor Magnetic Shielding by Using Multiple’’, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 27, N.4, pp. 903–907, 2014.

F

[**Fra03**] : M. Frank, J. Fraunhofer, P. van Hasselt, W. Nick, H.W. Neumueller, et G. Nerowski, ‘‘Long-term operational experience with first Siemens 400 kW HTS machine in diverse configurations’’, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 13, N.2, p. 2120 - 2123, 2003.

[**Fod09**] : Daniel Fodorea et Abdellatif Miraoui, ‘‘Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP)’’. Université de Technologie de Belfort, Montbéliard, 2009.

G

[**Glo01**] : B A Glowacki, M Majoros, M Vickers, J E Evetts, Y Shi and I McDougall ‘‘Superconductivity of powder-in-tube MgB₂ wire’’. *Supercond. Sci. Technol.* Vol.14, N.4 ,p. 193–199, 2001.

[**Gre92**] : E. Gregory, ‘‘Conventional wire and cable technology.’’ In M. Month and M. Dienes (eds.), *The Physics of Particle Accelerators*, AIP Conference Proceedings, Vol.249, N. 2, p. 1198–1229, 1992.

[**Gal13**] : P. Grima-Gallardo, M. Palmera, M.Munoz, S.Duran, M.Quintero, E. Quintero ,L.Nieves, E.Moreno, M.A.Ramos and H.Romero, ‘‘Superconductivity observation in A (CuInTe₂)_{1-x}(NbTe)_x alloy with x=0.5’’ *Adv. Mat. Sci. & Technol.* N.7, Art 1, pp. 01-11, 2013.

[**Gri96**] : Grivel J. C. and Flukiger R. ‘‘Visualization of the formation of the (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ + delta phase’’, *Superconductor Science and Technology*, Vol. 9, p. 555, 1996.

[**Gon14**] : B. Gony, R. Linares, Q. Lin, K. Berger, B. Douine, and J. Leveque, ‘‘Influence of the inductor shape, and the magnetization processes on a trapped magnetic flux in a superconducting bulk,’’ *Phys. C: Supercond.*, Vol. 503, pp. 1–6, 2014.

[**Gam11**] : B. Gamble, G. Snitchler, T. MacDonald, ‘‘Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor’’, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, N. 3, Part: 2, p. 1083 - 1088, 2011.

[**Gua11**] : Li Guangjin, ‘‘Contribution a la conception des machines électriques a rotor passif pour des applications critiques : modélisations électromagnétiques et thermiques sur cycle de fonctionnement, étude du fonctionnement en mode dégradé ’’, Thèse de doctorat de l’école normale supérieure de Cachan, 2011.

H

- [**Has89**] : W. A. Hassenzahl, “comparison of the conductor requirements for energy storage devices made with ideal coil geometries”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, N.2, 1799-1802. 1989.
- [**Hos94**] : T. Hoshino, I. Muta, T. Itoh, K. Hayashi, and E. Mukai, “Preliminary study on a rotating armature tape Superconducting Motor,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, N.4, pp. 2026–2029, 1994.
- [**Ham09**] : Mohand Ouramdane Hamiti, “Réduction des Ondulations de couple d’une machine synchrone à réluctance variable”, Thèse de Doctorat de l’université Henri Poincaré Nancy-I, Juin 2009.
- [**Hua13**] : Z. Huang, W. Xian, M. Zhang, M. Chudy, Y. Chen, Z. Zhong, M. Baghdadi, W. Wang, F. Spaven, K. Matsuda, and T. A. Coombs, “Control and Operation of a High Temperature Superconducting Synchronous Motor” IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol. 23, N.3, 2013.
- [**Har17**] : K. S. Haran, S. Kalsi, T. Arndt, H. karmaker, R. Badcock, B. Buckley, T. Haugan, M. Izumi, D. Loder, J. W. Bray, P. Masson and E. W. Stautner, “High power density superconducting rotating machines-Development status and technology roadmap”, Superconductor Science and Technology, Vol.30, N.12, id.123002, 2017.
- [**Hig43**] : T. J. Higgins. “Formulas for the Geometric Mean Distances of Rectangular areas and of Line Segments”, Journal of applied Physics, Vol. 14, pp.188-195, 1943.
- [**Hoe65**] : C. Hoer and C. Love, “Exact inductance equation for rectangular conductors with application to more complicated geometries”. Journal of Research of the National bureau of Standards-C Engineering and Instrumentation, Vol .69C, N.2, pp.127-1137, 1965.
- I*
- [**Ima18**] : A. Imaduddin , H. Hendrik, S Dwi Yudanto, H Nugraha, P Sebleku, A W Pramono , “Study on Cold-Drawing in Powder-in-Tube Process in Fabricating Silver-Sheathed (Bi,Pb)-Sr-Ca-Cu-O Tapes “Journal of Physics: Conf. Series 1091, p. 012004, 2018.
- [**Iwa95**] : Y. Iwasa and V. Adzovie, “Index number (n) below critical current in Nb-Ti superconductors”, IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 5, N.3, p. 3437, 1995.
- [**Iwa07**] : M. Iwakuma, A. Tomioka, M. Konno, Y. Hase, T. Satou, Y. Iijima, T. Saitoh, Y. Yamada, T. Izumi, and Y. Shiohara, “Development of a 15 kW Motor With a Fixed YBCO Superconducting Field Winding,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.17, N.2, pp. 1607–1610, June 2007.

[Iwa09] : M. Iwakuma, Y. Hase, T. Satou, A. Tomioka, M. Konno, Y. Iijima, T. Saitoh, Y. Yamada, T. Izumi, and Y. Shiohara, “Production and Test of a REBCO Superconducting Synchronous Motor”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.19, N. 03, 2009.

J

[Jin12] : J. X. Jin et al., “High-temperature superconducting linear synchronous motors integrated with HTS magnetic levitation components,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22, N.5, pp. 5202617-1–5202617-17, 2012.

[Jin97] : J. Jin, S. Dou, C. Grantham, D. Sutanto, H. Liu, “Operating principle of a high T_c superconducting saturable magnetic core fault current limiter”, Physica C: Supercond. Appl. Vol.282, p. 2643–2644, 1997.

[Jo02] : Y.S. Jo, Y.K. Kwon, M.H. Sohn, Y.K. Kim, et J.P. Hong, “High temperature superconducting synchronous motor”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 12, N.1, p. 833 - 836, 2002.

[Jia07] : Y. Jiang, R. Pei, Z. Hong, J. Song, F. Fang, and T. A. Coombs, “Design and control of a superconducting permanent magnet synchronous motor,” Supercond. Sci. Technol., Vol. 20, N.7, pp. 585–591, 2007.

K

[Kim15] : S.K. Kim, K. Kim, M. Park, I.K. Yu, S. Lee, “Operating characteristic analysis of a 400 mH class HTS DC reactor in connection with a laboratory scale LCC type HVDC system”, Physica C: Supercond. Appl. Vol.518, p.166–170, 2015.

[Kai01] : K. Kaiho, H. Yamaguchi, K. Arai, M. Umeda, M. Yamaguchi, T. Kataoka, “A current limiter with superconducting coil for magnetic field shielding”, Physica C : Supercond, Vol.354, N.1-4, p.115–119, 2001.

[Kos95] : A. E. Koshelev and A. I. Larkin, “Paramagnetic moment in field-cooled superconducting plates: Paramagnetic Meissner effect”, Phys. Rev. B, 1995.

[Ked17] : L. Keddari, M. Kadraoui, ‘Etude expérimental d'une machine supraconductrice à structure axiale’ Thèse de master de l'université khemis maliana, algerie 2017.

[Kal11] : S. S . Kalsi, “Applications of high temperature superconductors to electric power equipment”, Hoboken : Wiley-IEEE Press. 2011.

[Kov00] : L. K. Kovalev, K. V. Ilushin, V. T. Penkin, and K. L. Kovalev, “Hysteresis and reluctance electric machines with bulk HTS elements. Recent results and future development”, Supercond. Sci. Technol., Vol.13, pp. 498-502, 2000.

- [**Kaj13**] : K. Kajikawa, Y. Uchida, T. Nakamura, H. Kobayashi, T. Wakuda, and K. Tanaka, “Development of Stator Windings for Fully Superconducting Motor With MgB₂ Wires”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.23, N. 3, 2013.
- [**Kov17**] : K. Kovalev, N. Ivanov, I. Kobzeva, E. Tulinova, “High specific power HTS eclectic machines”, Przegląd Elektrotechniczny, Vol.93, N.11, pp. 125-128, 2017.
- [**Kov03**] : L. K. Kovalev, K. V. Ilushin, K. L. Kovalev, V. T. Penkin, V. N. Poltavets, S. M-A. Koneev, I. I. Akimov, W. Gawalek, B. Oswald and G. Krabbes, “High output power of eclectic motors with bulks HTS elements”, Physica C: superconductivity, Vol.386, p.419-423, 2003.
- [**Kov02**] : L. K. Kovalev, K. V. Ilushin, V. T. Penkin, K. L. Kovalev, A. E. Larionoff, S. M-A. Koneev, K. A. Modestov, S. A. Larionoff, V. N. Poltavets, I. I. Akimov, V. V. Alexandrov, W. Gawalek, B. Oswald and G. Krabbes, “High output power reluctance electric motors with bulk high-temperature superconductor elements”, Superconductor Science and Technology, Vol. 15, N.5, 817-822, 2002.
- [**Kaj13**] : K. Kajikawa, Y. Uchida, M. Hosseina, T. Nakamura, H. Kobayashi, T. Wakuda and K. Tanaka, “Development of Stator Windings for Fully Superconducting Motor With MgB₂ Wires”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, N.3, 5201604-5201604, 2013.
- [**Kov06**] : L. K. Kovalev et al., “An experimental investigation of a reluctance electrical drive with bulk superconducting elements in the rotor at temperature below 20 K”, Journal of Physics: Conference Series, Vol.43, p. 792-795, 2006.
- L**
- [**Lee94**] : P.J. Lee, D.C. Larbalestier, K. Togano, K. Tachikawa, M. Suzuki, K. Hamasaki, K. Noto and K. Watanabe, “Chapter 5: Fabrications Methods”, In K. Osamura (ed.), Composite Superconductors, New York: Marcel Dekker, Inc., pp. 237– 321, 1994.
- [**Lev95**] : C. Levillain, P. Manuel and P.G. Thérond, “Current induction Profiles and hysteretic losses in High T_c Superconducting tapes”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 5, N.2, 1995.
- [**Lee06**] : H. W. Lee, K. C. Kim, and J. Lee, “Review of maglev train technologies,” IEEE Trans. Magnet., Vol. 42, N.7, pp. 1917–1925, 2006.
- [**Lin15**] : Feng Lin, Rong Hai Qu and Da Wei Li, “Topologies for fully superconducting machines”, Proceedings of IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devises (ASEMD), Shanghai, China, November.20-23, 2015.

[Liu18] : B. Liu, R. Badcock, H. Shu and J. Fang, “A Superconducting Induction Motor with a High Temperature Superconducting Armature: Electromagnetic Theory, Design and Analysis”, *Energies*, Vol.11, N. 4, 792-792, 2018.

M

[Mor00] : G. Morrow, “Progress in MRI magnets,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 10 N.1, pp. 744–751, 2000.

[Mae88] : H. Maeda; Y. Tanaka; M. Fukutumi & T. Asano, “A New High-T_c Oxide Superconductor without a Rare Earth Element”. *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 27, N.2, L209–L210, 1988.

[McC98] : M. D. McCulloch and D. Dew-Hughes, “Brushless ac machines with high temperature superconducting rotors”, *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 53, pp.211-215, 1998.

[Mar10] : José María Ceballos Martínez “Analysis of ac losses in superconducting electrical components for application in the design of electrical systems” *Projet de These*, Universidad de Extremadura , Espagne , 2010.

[Mur99] : M. Muralidhar, M. R. Koblishka and M. Murakami “Improvement of critical current densities in bulk superconductors of the 123-Type”, *Physica stat. sol.*, Vol. 171, pp. R7-R8, 1999.

[Moo82] : F. C. Moon, “The virial theorem and scaling laws for superconducting magnet systems”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 53, N.12, p.9112-9121, 1982.

[Mou10] : R. Moulin, “Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs”, *Génie Electrique*, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[Mar16] : Guilherme Bueno Mariani « Machine synchrone à réluctance – Modèles équivalents à réseau de réluctances pour la simulation et l’optimisation », *Thèse de Doctorat*, Université Grenoble Alpes, 2016.

[Mas03] : P. Masson, J. Leveque, D. Netter, et A. Rezzoug, “Experimental study of a new kind of superconducting inductor” , *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 13, N. 2, p. 2239- 2242, 2003.

[Mee15] : D. Meeker, “Finite element method magnetics: User's Manual”, version 4.2 , Octobre 2015.

[Mcf88] : S. McFee, J.P. Webb and D.A. Lowther, “A tunable volume integration formulation for force calculation in finite-element based computational magnetostatics”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24, N.1, 439-440, 1988.

[Mal12] : Gaël Malé ‘Etude d’une structure d’inducteur supraconducteur à modulation de champ magnétique’, *Thèse de doctorat de l’Université de Lorraine*, Nancy-France, 2012.

N

- [Nag01] : Nagamatsu, Jun; Nakagawa, Norimasa; Muranaka, Takahiro; Zenitani, Yuji; Akimitsu, “Superconductivity at 39 K in magnesium diboride”. *Nature*. 410 (6824), 2001.
- [Nom99] : S. Nomura, T. Osaki, J. Kondoh, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, Y. Sato, R. Shimada, “Force-balanced coil for large scale SMES”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.9, N.2, pp.354-357, 1999.
- [Nit17] : T. Nitta “Superconducting rotating machines: A review of the past 30 years and future perspectives” *Journal of Physics: Conf. Series* 1054, 2018.
- [Neu06] : H.W. Neumüller, W. Nick, B. Wacker, M. Frank, G. Nerowski, J. Fraunhofer, W. Rządki, and R. Hartig, “Advances in and prospects for development of high-temperature superconductor rotating machines at Siemens,” *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 19, pp. 114–117, 2006.
- [Nic07] : W. Nick, M. Frank, G. Klaus, J. Fraunhofer, et H.-W. Neumuller, « Operational Experience With the World’s First 3600 rpm 4 MVA Generator at Siemens », , *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, N. 2, p. 2030 -2033, 2007.
- [Nic10] : W. Nick, M. Frank, P. Kummeth, J. J. Rabbers, M. Wilke, et K. Schleicher, “Development and construction of an HTS rotor for ship propulsion application”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 234, N. 3, p. 032040, 2010.
- [Nak12a] : T. Nakamura, Y. Yamada, H. Nishio, K. Kajikawa, M. Sugano, N. Amemiya, T. Wakuda, M. Takahashi, and M. Okada, “Development and fundamental study on a superconducting induction/synchronous motor incorporated with MgB2 cage windings,” *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 25, N.1, p. 014004, 2012.
- [Nak12b] : T. Nakamura, H. Nishio, N. Amemiya, K. Kajikawa, and T. Wakuda, “Performance of induction/synchronous motor having MgB2 cage windings for liquid hydrogen circulation pump,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 22, N. 3, p. 5200404, 2012.
- [Nor70] : W. T. Norris “Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 3, N. 4, 1970.
- O**
- [Osw99] : B. Oswald, M. Krone, M. Soli, T. StraBer, J. Oswald, K.-J. Best , W. Gawalek, L. Kovalev, “Superconducting Reluctance Motors with YBCO Bulk Material, ” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 9, N. 2, 1999.
- [Osw00] : B. Oswald, Krone .M, Söll .M, Strasser. T, Oswald .J and Best. K-J ”Optimization of superconducting motors with YBCO bulk material” *Proc. 1999 CEC-ICMC Conf. (Montreal, Quebec, Canada); Adv. Cryog. Eng.* **45B** 1653–7, 2000.

- [Osw02] : B. Oswald, M. Krone, T. Straßer, K. J. Best, M. Soell, W. Gawalek, H. J. Gutt, L. Kovalev, L. Fisher, G. Fuchs, G. Krabbes, and H. C. Freyhardt, “Design of HTS reluctance motors up to several hundred kW”, *Physica C*, Vol. 372–376, pp. 1513–1516, 2002.
- [Osw05] : B. Oswald, K. J. Best, M. Setzer, M. Söll, W. Gawalek, A. Gutt, L. Kovalev, G. Krabbes, L. Fisher and H. C. Freyhardt, “Reluctance motors with bulk HTS material”, *Superconductor Science and Technology*, Vol. 18, N. 2, S24-S29, 2005.
- [Osw04] : B. Oswald, K. J. Best, M. Setzer, M. Söll, W. Gawalek, A. Gutt, L. Kovalev, G. Krabbes, L. Fisher and H. C. Freyhardt, “Reluctance motors with bulk HTS material”, *Superconductor Science and Technology*, Vol. 18, N. 2, S24-S29, 2004.

P

- [Ple10] : E. F. Pleva, V. Mehrotra, & S. W. Schwenterly, “Conductor requirements for high temperature superconducting utility power transformers”, *Superconductor Science and Technology*, Vol.23, p.014025, 2010.
- [Pri09] : T. A. Prikhna, “Properties of MgB₂ bulk”, arXiv : 0912.4906, 2009.
- [Par10] : N. K. Paramoda, U. Prasad, A. Amardas, D. Patel and S. Pradhan, “Design and fabrication of a high T_c BSCCO based square helmholtz coil”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 208, N.1, 012021, 2010.
- [Par06] : J. Min Park, S. Il Kim , J. Pyo Hong and J. Ho Lee, “Rotor design on torque ripple reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.42, N.10, p.3479-3481, 2006.
- [Pau10] : C.R. Paul, “Inductance Loop and Partiel”, John Wiley Sons, Inc, 2010.

Q

- [Qiu05] : M. Qiu, Z. Xu, Z. H. Yao, D. Xia, L. Z. Lin, G. M. Zhang, L. Xiao, H. T. Ren, Y. L. Jiao and M. H. Zheng, “Design and performance of a small HTS bulk reluctance motor”, *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol. 15, N. 2, 1480-1483, 2005.

R

- [Rod10] : A. L. Rodrigues, and A. J. Pires, “Reluctance machines incorporating high temperature superconducting materials on the rotor”, *Physica C: Superconductivity*, Vol. 470, N. 2, 98-103, 2010.
- [Rue72] : A. E. Ruehli, “Inductance Calculation in a complex integrated circuit environnement”, *IBM J.Res. develop*, pp.470-481, 1972.

S

- [**Stu04**] : G. Stumberger, M. T. Aydemirt, D. Zarko, T. A. Lipo, “Design of a linear bulk superconductor magnet synchronous motor for electromagnetic aircraft launch systems”, IEEE transaction on Applied Superconductivity, Vol. 14, p. 54-62, 2004.
- [**Sta15**] : M.P Staines, Z.Jiang, N.glasson, R.G.Buckley , M. Pannu, “High-temperature superconducting (HTS) transformers for power grid applications”, Science direct: Superconductors in the Power Grid Materials and Applications, p. 367-397, 2015.
- [**Svi80**] : I. N. Sviatoslavsky, & W. C. Young, “Structural design features for commercial fusion power reactor magnet systems”, Nuclear Engineering and Design, Vol.58, N.2, p.207-218. 1980.
- [**Sni05**] : G. Snitchler, B. Gamble, et S. S. Kalsi, “The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, N.2, p. 2206 - 2209, 2005.
- [**Str05**] : S. Stavrev, F. Grilli, B. Dutoit and S. P Ashworth, “Comparison of the AC losses of BSCCO and YBCO conductors by means of numerical analysis”, Superconductor Science and Technology, Vol. 18, N.10, p.1300-1312, 2005.

T

- [**Tom07**] : Michael Tomsic, Matthew Rindfleisch, Jinji Yue, Kevin McFadden, and John Phillips, “Overview of MgB₂ Superconductor Applications”, International Journal of Applied Ceramic Technology, Vol. 4, N.3, p. 250 - 259, 2007.
- [**Tin04**] : M. Tinkham “Introduction to Superconductivity” Livre, Dover Publications, INC. Mineola, New York, 2004.
- [**Tal88**] : J. L. Tallon et al. “High-T_c superconducting phases in the series Bi_{2,1}(Ca,Sr)_{n+1}Cu_nO_{2n+4+δ}”. Nature. 333 (6169):p.153-156, 1988.
- [**Tom03**] : 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, pp. 517–520, 2003.
- [**Tak94**] : N. Takeda, M.Uesaka and K.Miya, “Computation and experiments on the static and dynamic characteristics of high T_c superconducting levitation”, Cryogenics, Vol.34, N.9.1994.
- [**Ter11**] : Yutaka Terao, Masaki Sekino, Hiroyuki Ohsaki, Hidekazu Teshima, and Mitsuru Morita, “Magnetic Shielding Characteristics of Multiple Bulk Superconductors for Higher Field Applications” IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 21, N.3, 2011.

U

- [**Urb04**] : J. A. Urbahn, “The Thermal Performance of a 1.5 MVA HTS Generator” , Vol.710, p. 849-858, 2004.

V

- [**Val07**] : N. D. Valle, A. Sanchez, E. Pardo, C. Navau, and D. X. Chen, “Enhanced stability by field cooling in superconducting levitation with translational symmetry,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.91, 2007.
- [**Vin01**] : Vincent-Viry, O.; Mailfert, A.; Trassart, D., “New SMES coil configurations”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.11, N.1, pp.1916-1919, 2001.

W

- [**Wol13**] : Wolsky, A. M “HTS from precommercial to commercial: a roadmap to future use of higher temperature superconductors by the power sector”. Available from: [http://www.superconductivityiea.org/document/HTS%20Roadmap%20Complete%20Report%20A Wolsky%2010Sept 2013](http://www.superconductivityiea.org/document/HTS%20Roadmap%20Complete%20Report%20A%20Wolsky%2010Sept%202013).
- [**Wil 96**] : M.N. Wilson, “Superconducting materials for magnets.” In S. Turner (ed.), *Proc. of CERN Accelerator School on Superconductivity in Particle Accelerators*, CERN/96–03, Geneva, Switzerland: CERN, pp. 47–69, 1996.
- [**Woo05**] : S. Woodruff et al., “Testing a 5 MW high-temperature superconducting propulsion motor” , in *Electric Ship Technologies Symposium*, 2005 IEEE, p. 206 – 213, 2005

X

- [**Xia11**] : W. Xian, Y. Yan, W. Yuan, R. Pei, and T. A. Coombs, “Pulsed Field Magnetization of a High Temperature Superconducting Motor” *IEEE Transactions on applied superconductivity*, Vol. 21, N.3, 2011.