

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

Etude de comportement d'un matériau supraconducteur

Par :

Mr : MECHEKKEF Zakaria

Et

Mr : AYADI Ayyoub

Travail proposé et dirigé par :

Mr : BOUCHEKHOU Hocine

Promotion 2020

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89
<http://www.univ-jijel.dz>



Remerciements

*En achevant ce modeste travail nous remercions ALLAH qui nous a
Permis d'arriver jusque-là.*

*Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont
faits pour que nous terminons nos études.*

*Nous tenons à exprimer nos vives gratitudee et notre profonde
Reconnaissance à notre encadreur **Mr. Bouchekhou. H** pour son aide
et ses conseils judicieux nous faisant partager ainsi ses connaissances
et son expérience, afin de mener à bien ce travail dans les délais
répartis.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à tous
Nos professeurs de la faculté de génie électrique pour tout le savoir que
nous*

Avons acquis grâce à eux durant notre formation

Enfin, nos remerciements à tous nos amis et nos collègues.

Zakaria et Ayoub





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mon père, que dieu ait pitié de lui

À Ma chère mère

À toute ma famille

À tous mes amis

À mon ami Soufyan, que dieu ait pitié de lui

À tous les gens qui mon aidés

À toute la promotion de génie électrique2020

Zakaria





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents

À toute ma famille

À tous mes amis

À mon ami Soufyan, que dieu ait pitié de lui

À tous les gens qui m'ont aidés

À toute la promotion de génie électrique 2020

Ayoub



Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur la supraconductivité	
I.1 Introduction	3
I.2 Découverte de la supraconductivité	3
I.3 Caractéristiques des supraconducteurs	7
I.3.1 Résistivité nulle	7
I.3.2 Champ magnétique critique (H_c)	7
I.3.3 Densité de courant critique (J_c)	7
I.3.4 Température critique (T_c)	8
I.3.5 Surface critique	9
I.3.6 Effet Meissner	9
I.4 Types des supraconducteurs	10
I.4.1 Supraconducteurs de type I	10
I.4.2 Supraconducteurs de type II	11
I.4.3 Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)	12
I.4.4 Supraconducteurs à haute température critique (SHTC)	13
I.5 Formes industrielles des matériaux supraconducteurs	15
I.5.1 Ruban	15
I.5.2 Pastille « Bulk »	15
I.5.3 File	16
I.6 Application des supraconducteurs en électrotechnique	17

I.6.1 Limiteurs du courant	18
I.6.2 Câbles de transport	18
I.6.3 Machines tournantes	19
I.6.4 Les transformateurs	19
I.6.5 Les systèmes de stockage de l'énergie	20
I.6.6 Les aimants permanents supraconducteurs	20
I.7 Conclusion	20

Chapitre II : Phénomènes magnétiques et électriques dans un supraconducteur

II.1 Introduction	21
II.2 Modèles macroscopiques des supraconducteurs	21
II.2.1 Modèle de Bean	21
II.2.2 Modèle de Kim	22
II.2.3 Modèle de la loi en puissance	23
II.2.4 Modèle exponentiel	23
II.3 Comportement des supraconducteurs vis-à-vis des champs externes	23
II.3.1 Piégeage du champ magnétique dans les SHTC	24
II.3.2 Mécanisme d'écrantage du champ magnétique	25
II.4 Pertes dans les matériaux supraconducteurs	27
II.4.1 Pertes en courant continu (DC)	27
II.4.2 Pertes en courant alternatif (AC)	27
II.4.2.a. Pertes AC en champ propre	27
II.4.2.b. Pertes AC en champ extérieur	28

II.5 Formes de matériaux supraconducteurs	28
II.5.1 Fabrication du ruban en BSCCO (1G)	29
II.6 Conclusion	30
 Chapitre III : Etude de comportement d'un ruban supraconducteur	
III.1 Introduction	31
III.2 Présentation du problème d'étude	31
III.3 Formulation du problème	32
III.3.1 Formulation en plan 2D	33
III.4 Présentation du modèle étudié	35
III.4.1 Dimensionnement et caractéristique de l'échantillon	35
III.5 Etude de comportement de matériau supraconducteur	36
III.5.1 Etude des courants induits	36
III.5.1.a Résultats de simulations	38
III.5.2 Etude des pertes AC	43
III.5.2.a Résultats de simulations	45
III.6 Conclusion	46
Conclusion générale	47
Bibliographie	49

Introduction Générale

Introduction Générale

La découverte des supraconducteurs dits à haute température critique en 1986 a suscité un grand intérêt nouveau pour ces matériaux. Leur utilisation en électrotechnique peut être sérieusement envisagée dans des domaines tels que la production, le transport, le stockage d'énergie, etc. Dans le domaine de puissance, on envisage l'utilisation des supraconducteurs pour entre autres, la fabrication de câble, de machines ou de limiteurs de courant. Par ailleurs, les deux propriétés remarquables des supraconducteurs est de faire léviter de manière stable un aimant permanent d'une part, d'autre part, de pouvoir piéger le champ magnétique. Cette première propriété des supraconducteurs permet d'envisager leur utilisation pour des dispositifs en suspension auto-stable, la seconde, permet de concevoir des aimants supraconducteurs.

Les matériaux supraconducteurs à haute température critique (SHTc) sont utilisés en électrotechnique pour leurs propriétés exceptionnelles. Ils peuvent transporter des courants électriques plus importants que dans le cas des conducteurs classiques et écranter ou piéger de forts champs magnétiques. De plus, ces matériaux SHTc permettent le transport de courant continu avec des pertes négligeables, inférieures à celles des conducteurs classiques en courant alternatif. Pour cela, il est intéressant, voire indispensable, d'évaluer le niveau des pertes afin de vérifier la faisabilité des installations avec des SHTc et celles des capacités de transport de courant des supraconducteurs. Donc la caractérisation de ces matériaux SHTc est nécessaire pour leur mise en œuvre dans des applications dans le domaine de l'électrotechnique.

Ce travail consiste à étudier le comportement des matériaux supraconducteurs soumis aux champs magnétique externe (due à l'application d'un champ magnétique) et propre (due au passage d'un courant alternatif dans le matériau). Pour cela notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Au niveau du premier chapitre, nous présentons des généralités sur la supraconductivité ; les différents types et formes de matériaux supraconducteurs utilisés dans l'industrie ainsi les domaines d'applications des matériaux supraconducteurs en électrotechnique.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillons les modèles macroscopiques qui décrivent le comportement des supraconducteurs tel que le modèle de la loi en puissance et le modèle de

l'état critique. Ensuite, nous expliquons le mécanisme d'écrantage et du piégeage du champ magnétique dans les supraconducteurs. A la fin de ce chapitre nous présentons les pertes dans les matériaux supraconducteurs.

Dans le dernier chapitre, nous étudions l'évolution des courants induits et du champ de pénétration dans un matériau SHTc utilisant la loi en puissance comme loi de comportement du matériau. Pour notre simulation nous adoptons une formulation en H sous le logiciel COMSOL.

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

Chapitre I

*Etat de l'art sur les matériaux
Supraconducteurs*

I.1 Introduction

Le terme supraconductivité vient de la propriété que possèdent certains matériaux à présenter une résistivité non mesurable ($<10^{-25} \Omega.m$). Il a été proposé par Kamerlingh Onnes en 1911 quand il découvrit que pour certains matériaux la résistance non seulement diminuait avec la température, mais présentait également une baisse soudaine à une certaine température critique notée T_c . Il appela cet état un état supraconducteur en opposition à un état normal, et les matériaux qui présentent un tel comportement sont appelés par conséquence des supraconducteurs [1].

Les supraconducteurs sont des matériaux qui conduisent l'électricité sans résistance et expulsent les champs magnétiques du matériau. Tout matériau qui présente ces propriétés est un supraconducteur. Cela signifie que contrairement aux conducteurs plus courants tels que le cuivre ou l'acier, un supraconducteur peut transporter le courant indéfiniment sans perdre d'énergie.

Les supraconducteurs prennent une place importante dans la recherche actuelle en électrotechnique, des promesses extraordinaires que toute une communauté tente d'exploiter.

En effet, deux propriétés de ces matériaux, le diamagnétisme et une possibilité de transporter des courants élevés sous fort champs magnétiques, permettent d'envisager une réelle évolution des systèmes électrotechniques [2].

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'histoire et de la découverte des matériaux supraconducteurs. Les propriétés et les types de matériaux supraconducteurs seront considérés. Enfin, nous présenterons les différentes formes industrielles et applications des matériaux supraconducteurs.

I.2 Découverte de la supraconductivité

L'histoire de la supraconductivité commence en 1911 dans un laboratoire de l'Université de Leiden aux Pays-Bas. Le physicien hollandais Kamerlingh Onnes, ayant réussi à atteindre des températures inférieures à 4 Kelvins en liquéfiant de l'hélium, décida de tester différents conducteurs de l'électricité à très basse température. Aidé par G. Holtz, il s'aperçut que la résistance électrique du mercure devenait brutalement non mesurable lorsque la température devenait inférieure à 4 K, cette température à laquelle le matériau devient

supraconducteur est appelée température critique. La supraconductivité était découverte [3]. La photo de la Figure. I.1 montre la première liquéfaction de l'hélium (1908).

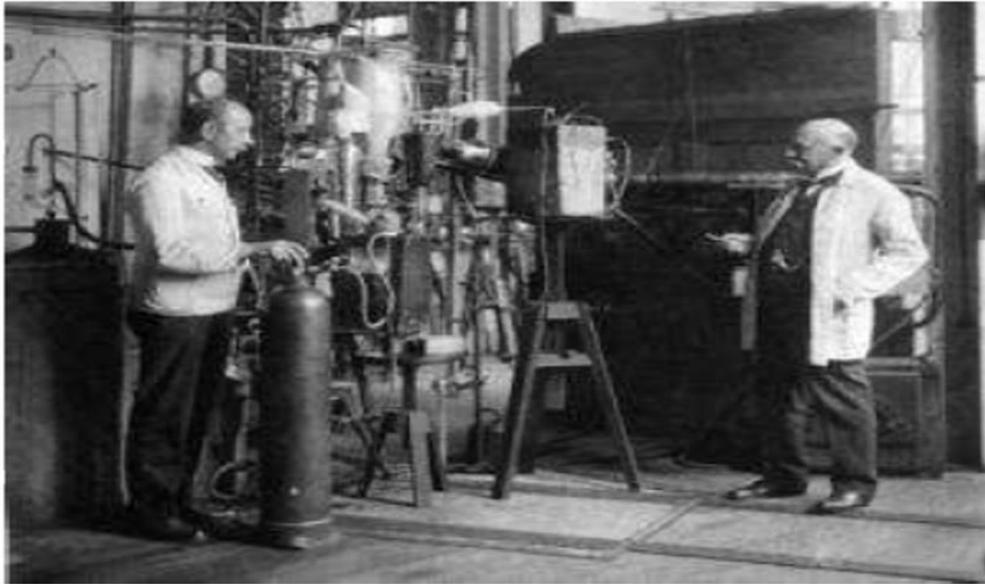


Figure. I.1 : Première liquéfaction de l'hélium du laboratoire de H.K.onnes, sont présents *H.K. Onnes* (à droite) et *G.J. Flim* (à gauche), (1908) [2].

En 1933, *Walter Meissner et Robert Ochsenfeld* découvrent une seconde propriété à ce type de matériaux supraconducteurs : le diamagnétisme. Le champ magnétique est totalement expulsé tant que celui-ci reste inférieur au champ critique. Cependant, ce phénomène n'est observable que pour des valeurs de champs magnétiques très faibles [4].

En 1950, Théorie de *Ginzburg-Landau* qui permet d'expliquer les propriétés macroscopiques des supraconducteurs. Le Russe *Vitaly L. Ginzburg* émet l'idée, avec son compatriote *Lev Davidovitch Landau*, qu'il existe deux types de supraconducteurs [4].

Une théorie microscopique (BCS) a été émise en 1957 par *John Bardeen, Leon N.Cooper et John Schrieffer* (tous trois prix Nobel de physique en 1972) pour expliquer la supraconductivité. Cette théorie explique qu'à très basse température, les électrons s'apparient, en quelque sorte se mettent en couple. On dit qu'ils forment des paires de Cooper. Avec cette théorie, le mécanisme de la supraconductivité ne permettait pas d'obtenir des températures critiques supérieures à une trentaine de Kelvins (au-delà, l'agitation thermique casse les paires). Pour cette raison la découverte en 1986 par *Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller* de la supraconductivité dans un oxyde synthétique de cuivre, lanthane et baryum à une température critique de 35 K, plus élevée que toutes celles connues

jusqu'alors, a eu un retentissement considérable. Cette découverte relance alors la recherche dans ce domaine, et permet la mise en évidence de ce phénomène jusqu'à 164 K, en 1998 [5].

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

En 2001, un nouveau supraconducteur attire l'attention, le diborure de magnésium (MgB₂). Ce supraconducteur situé à mi-chemin des supraconducteurs à basses et hautes températures critiques à l'avantage de proposer un fil facilement réalisable, grâce sa structure et son processus de fabrication PIT (Powder In Tube). Il permet d'envisager des applications à des températures d'environ 20K, ou il présente des caractéristiques intéressantes (matériel médical, moteur électrique, transformateur...) [2].

Malgré les importantes découvertes faites durant un siècle sur la supraconductivité, ils restent encore énormément de questions sur les phénomènes mise en jeu dans les matériaux à température critique élevée, l'évolution de la température critique des matériaux supraconducteurs en fonction du temps est représentée à la Figure. I.2.

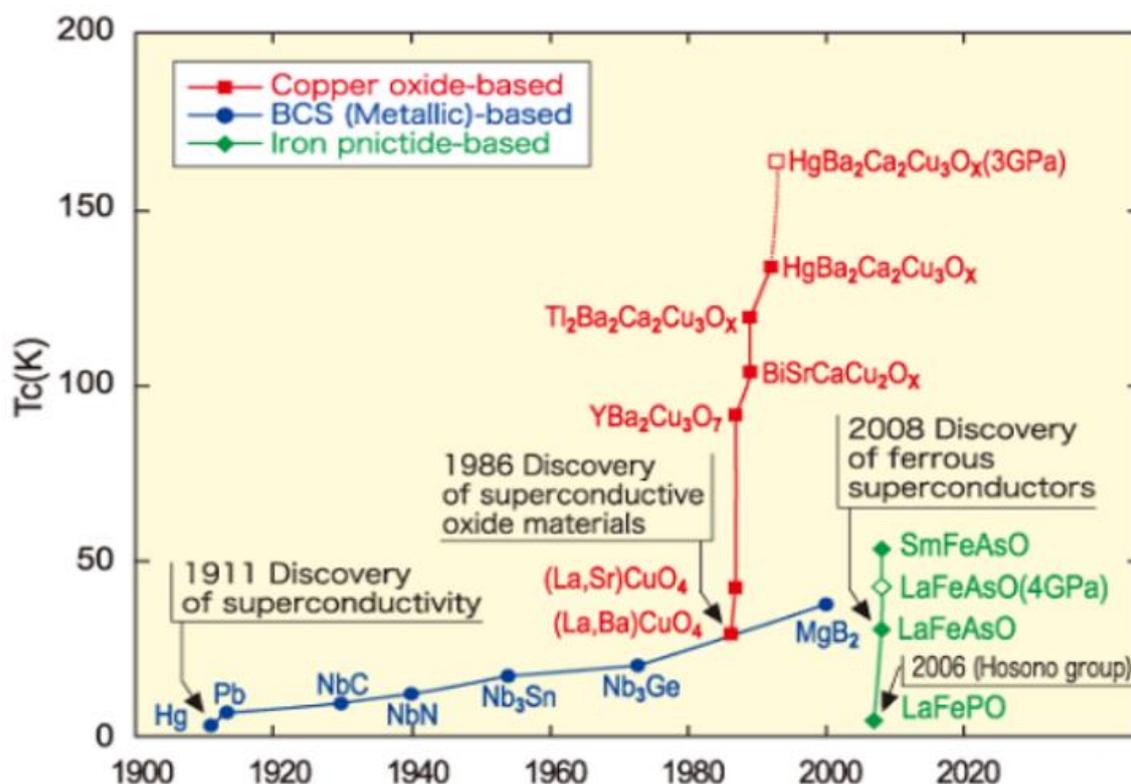


Figure. I.2 : Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année de découverte [6].

Le tableau suivant indique les dates importantes dans la recherche autour de la supraconductivité :

Année	Faits ayant marqué la recherche autour de la supraconductivité
1908	Liquéfaction de l'hélium par K. Onnes
1911	Découverte de la supraconductivité par K. Onnes et G. Holst sur un échantillon de mercure dans un bain d'hélium liquide
1913	Échec du premier aimant supraconducteur
1933	Mise en évidence du diamagnétisme des supraconducteurs par Meissner et Ochsenfeld
1954	Premier aimant supraconducteur (Nb)
1957	Théorie microscopique de la supraconductivité par Bardeen Cooper et Schrieffer
1958	Mise au point de conducteurs NbZr et Nb ₃ Sn
1960	Découverte des fortes densités de courant sous induction élevée
1962	B. Josephson prédit les effets quantiques qui portent son nom (effet Josephson)
1964	Première application significative des supraconducteurs à Argonne
1965	Premiers cryoalternateurs
1968	Définition du brin multifilamentaire par le laboratoire Rutherford
1974	Mise en service de la chambre à bulle BEBC au CERN
1982	Premières images IRM, et première application industrielle et commerciale des supraconducteurs
1983	Mise au point des câbles multifilamentaires supraconducteurs alternatifs par Alcatel Alstom. Premier accélérateur supraconducteur (TEVATRON)
1986	Berdnoz et Muller découvrent la supraconductivité à haute température critique de céramiques à base d'oxyde
1987	Envolée des températures critiques (YBaCuO, 93 K). Démarrage de TORE SUPRA à Cadarache
1988	Mise en fonctionnement de T15 (Nb ₃ Sn, 6.4 T, 4.5 K)
1989	Mise en fonctionnement du système de champ toroïdale de TORE SUPRA
1999	Test du premier système RMN à 900 MHz (instrument de mesure utilisé pour l'analyse par spectroscopie)
1999	Test des bobines modèles d'ITER (Le réacteur thermonucléaire expérimental international)
1999	Début de construction du LHC (Large Hadron Collider ou Grand collisionneur de hadrons, est le plus puissant accélérateur de particules au monde)
2001	Découverte des propriétés supraconductrices du composé MgB ₂

Tableau. I.1 : Petit historique de la supraconductivité [7].

I.3 Caractéristiques des supraconducteurs

I.3.1 Résistivité nulle

La propriété principale d'un matériau supraconducteur est sa résistance nulle, sous une température bien définie appelée température critique T_c . Ainsi, la température spécifique sépare le comportement à l'état normal de la matière de l'état supraconducteur. Cela indique que l'état de supraconducteur est un nouvel état de la matière, c'est -à dire un état qui correspond à une disposition spécifique du système électronique. On peut donc dire que le transit de température critique correspond à la transition de phase.

I.3.2 Champ magnétique critique (H_c)

L'intensité du champ magnétique est également une condition d'existence de la supraconductivité. Au-delà d'une certaine valeur de champ magnétique, le supraconducteur passe à l'état normal et perd ses propriétés supraconductrices. On distingue alors deux types de supraconducteurs: Les supraconducteurs de type I et de type II. Le supraconducteur de type I est caractérisé par une valeur de champ magnétique critique H_c en dessous duquel il devient supraconducteur et expulse intégralement les champs magnétiques de l'intérieur du matériau (diamagnétique parfait) c'est l'effet Meissner. Au-delà de cette valeur ce matériau passe à l'état normal. Les supraconducteurs de type II possèdent, quant à eux, deux champs critiques H_{c1} et H_{c2} [8].

L'induction magnétique à l'intérieur du matériau est donnée par la relation suivante :

$$B = \mu_0(H + M) \quad (I. 1)$$

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide.

H: le champ magnétique à l'intérieur du matériau.

M: l'aimantation.

I.3.3 Densité de courant critique (J_c)

La densité de courant critique J_c est un paramètre important et déterminant pour un matériau supraconducteur. Si le courant appliqué au matériau est supérieur au courant critique, le matériau transite à l'état normal et cesse d'être supraconducteur, Fig.I.3.

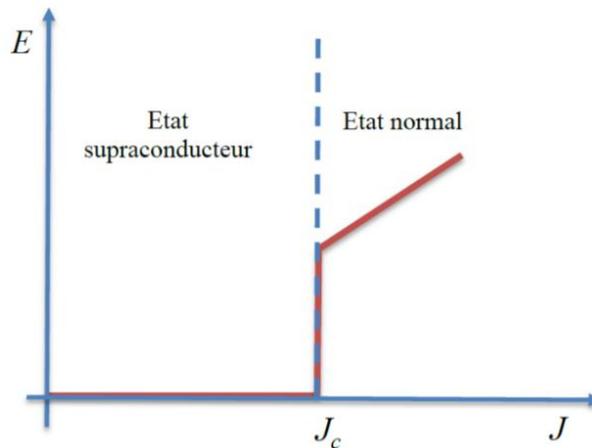


Figure. I.3 : Caractéristique E(J) d'un supraconducteur en fonction du courant appliqué.

I.3.4 Température critique (T_c)

La supraconductivité est caractérisée par une résistance nulle en dessous d'une certaine température appelée "température critique T_c ". Autrement dit, c'est aussi la propriété d'un matériau perdant sa résistivité électrique dans certaines conditions de température, de champ magnétique et de courant électrique. Ainsi le courant électrique circule dans un matériau supraconducteur sans aucune perte d'énergie. Ce courant peut ainsi circuler indéfiniment dans un circuit supraconducteur à condition de maintenir celui-ci en dessous de sa température critique [8]. La Figure. I.4 illustre la chute de résistance du supraconducteur (mercure) en fonction de la température.

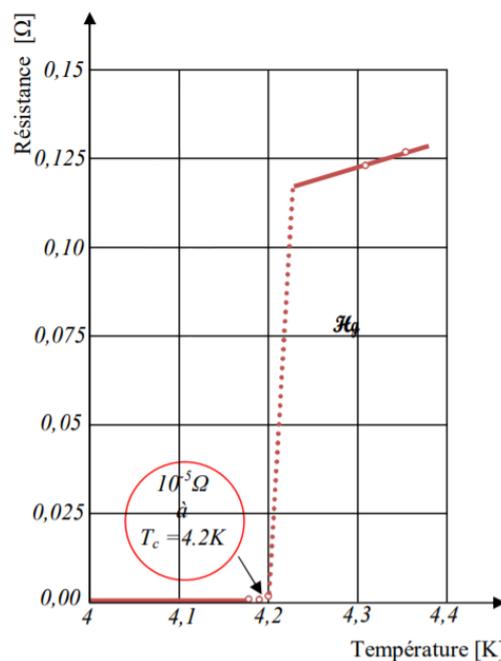


Figure. I.4 : Résistance du mercure en fonction de la température.

I.3.5 Surface critique

La supraconductivité ne se manifeste que lorsque $T < T_c$, $H < H_c$, et $J < J_c$. D'autre part, les valeurs critiques : T_c , H_c et J_c dépendent des deux autres paramètres. Nous devons donc définir une surface critique (Fig.I.5) en dessous de laquelle le matériau est à l'état supraconducteur et au contraire au-dessus, il est à l'état normal.

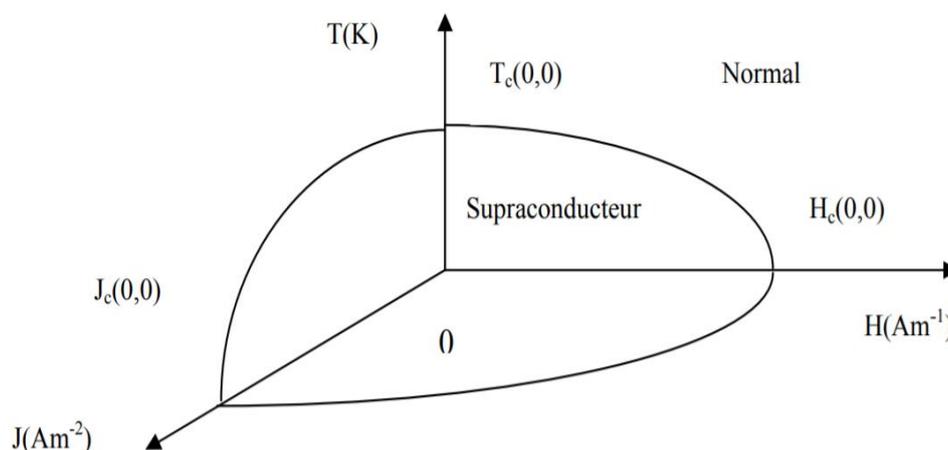


Figure. I.5 : Surface critique délimitant la région où existe la supraconductivité.

I.3.6 Effet Meissner

Pour activer l'effet Meissner, on refroidit le supraconducteur jusqu'à ce que la température critique T_c soit atteinte, au milieu d'un champ magnétique qui fera automatiquement apparaître des boucles de courants électriques à la surface de l'échantillon. Ces courants tournant dans les circuits créent un champ magnétique, comme dans un électroaimant. Ces courants sont adaptés pour compenser complètement le champ magnétique appliqué à l'intérieur du supraconducteur. Ainsi, le champ magnétique total devient nul dans le volume de l'échantillon et ainsi le supraconducteur est protégé, à l'exception de la surface de l'échantillon, où des courants se développent. Grâce à ce super courant, le supraconducteur est capable d'expulser le champ magnétique. Puisqu'il n'y a pas de résistance électrique dans le supraconducteur, ces courants peuvent exister en permanence sans consommer d'énergie [9], Fig. I.6.

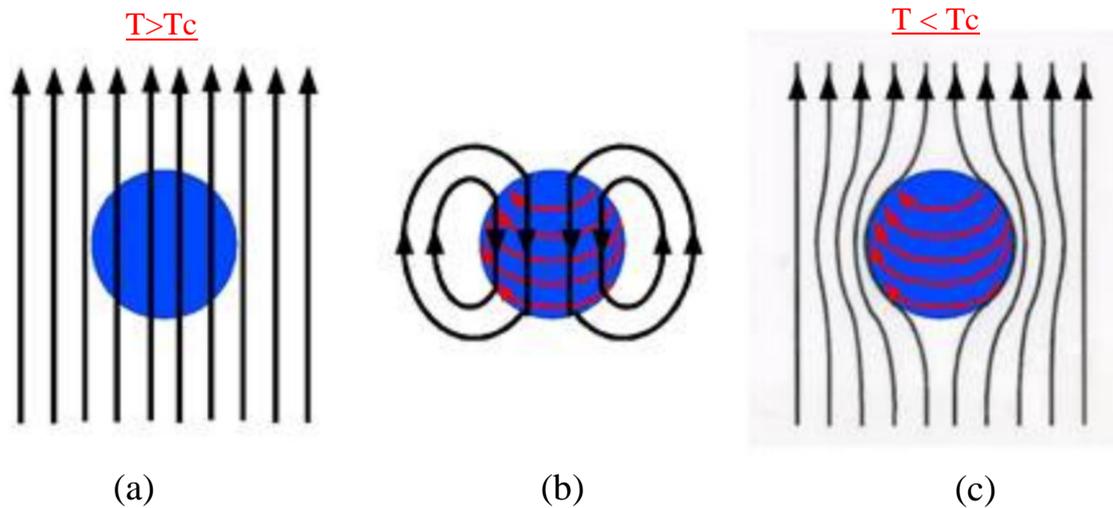


Figure. I.6 : Image montrant l'effet Meissner dans un supraconducteur.

a) Les flèches noires représentent le champ magnétique extérieur B appliqué sur l'échantillon supraconducteur, Dans le cas où $T > T_c$, le matériau trouve son état normal et il est complètement traversé par les lignes de champ B .

b) Des courants apparaissent à la surface du supraconducteur (en rouge). Ces courants créent un champ magnétique (le champ magnétique extérieur n'est pas représenté).

c) Le champ magnétique total est la somme du champ appliqué B et du champ qui apparaît en réaction. Dans le volume du supraconducteur le champ magnétique est nul. Si $T < T_c$, le matériau garde sa propriété supraconductrice et empêche toute pénétration de lignes de champ magnétique (*effet Meissner*).

I.4 Types des supraconducteurs

Existe deux types de supraconducteurs. Les supraconducteurs de type I, et Les supraconducteurs de type II. Chaque espèce est en réalité un regroupement de différents matériaux présentant les mêmes aspects généraux bien qu'ils soient tous différents.

I.4.1 Supraconducteurs de type I

Ces supraconducteurs sont les plus simples, car ils n'ont qu'un seul champ magnétique critique, H_{c1} et définissent alors deux états: l'état normal correspond à une valeur élevée de la résistance du matériau, et l'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme parfait, Fig. I.7. Quand un champ magnétique externe est appliqué à ce type de supraconducteur, ce dernier repousse parfaitement le champ jusqu'à le matériau incriminé passe brusquement de

l'état supraconducteur à l'état normal. Ces types de supraconducteurs sont essentiellement des corps purs comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'indium (In) et l'étain (Sn), alors que le champ magnétique critique de ces corps est relativement faible (ne dépasse pas 0.2 tesla) [10].

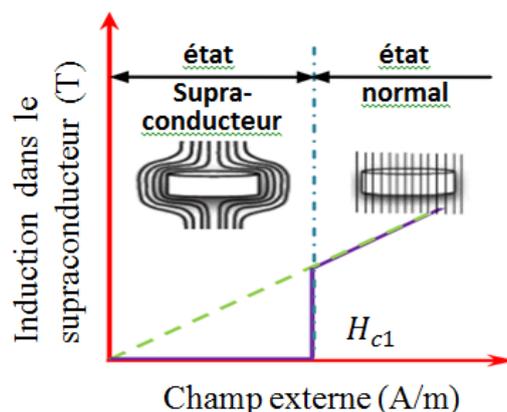


Figure. I.7 : Supraconducteur de type I.

Le tableau suivant représente quelques exemples des matériaux supraconducteurs de type I à pression atmosphérique normale :

Eléments	Température critique (K)
Carbon (C)	15
Plomb (Pb)	7.2
Lanthane (La)	4.9
Mercure(Hg)	4.15
Indium(In)	3.4
Aluminium (Al)	1.175
Zinc (Zn)	0.85
Uranium (U)	0.20
Rhodium (Rh)	0.000325

Tableau. I.2: Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I [11].

I.4.2 Supraconducteurs de type II

Les supraconducteurs de type II, illustrés sur la Figure. I.8, offrent un diamagnétisme parfait jusqu'au champ H_{c1} . Cependant, ils possèdent un troisième état intermédiaire, « état mixte » entre H_{c1} et H_{c2} . L'état mixte se présente comme un ensemble de zones supraconductrices et de zones non supraconductrices. En effet, un réseau de tubes à l'état normal se forme dans le matériau. Lorsque le champ magnétique appliqué (champ propre

et/ou champ externe) augmente, alors ce réseau se densifie jusqu'au champ H_{c2} , où le matériau repasse à l'état normal [4].

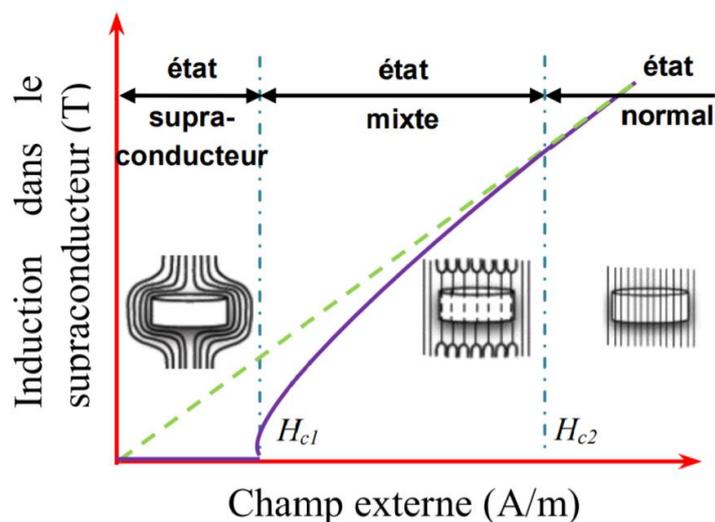


Figure. I.8 : Supraconducteur de type II.

I.4.3 Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)

Précurseurs de la supraconductivité dans le monde industriel, ces matériaux, fonctionnant à une utilisation inférieure à 18K, reposent sur des alliages métalliques ; la majorité est employée à 4,2K. Afin de les différencier des céramiques, l'appellation « Supraconducteur à Basse Température Critique » (SBTC) leur est attribuée.

De nombreux alliages SBTC se distinguent. Le niobium-titane (NbTi), et le niobium-étain (Nb₃Sn), restent les plus employés jusqu'à aujourd'hui, notamment dans la réalisation de bobines de champ magnétique (Médical, LHC, ITER, ...) [4]. La Figure. I.9 présente un aperçu de ces conducteurs.

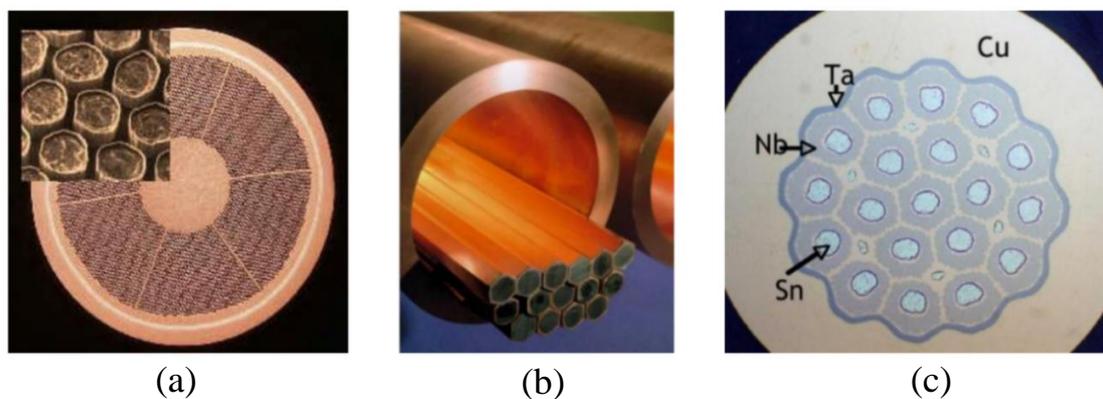


Figure. I.9 : (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb₃Sn avant traitement thermique [12].

I.4.4 Supraconducteurs à haute température critique (SHTC)

Découverts en 1986, les supraconducteurs à haute température critique reposent sur des matériaux céramiques comme le Barium et l'Yttrium. Deux catégories ressortent donc, les BSCCO et YBCO. Le premier cité a une structure de type PIT (Powder In Tube), ce qui en fait un fil robuste et pouvant facilement composer des bobines pour des applications comme les moteurs électriques, une longueur maximale de câble de 1000m est atteinte actuellement. Le second, de structure multicouche de matériaux cuits et recuits, a des caractéristiques qui permettent d'envisager une utilisation à une densité de courant et un champ magnétique plus important, il peut atteindre actuellement près de 500 m. Il trouve une utilisation avantageuse dans le domaine des lignes de transport.

Les recherches actuelles sur ces matériaux sont principalement dédiées à l'YBCO. On doit également considérer le cas des matériaux massifs réalisés avec des mono-domaines, ils peuvent permettre de s'opposer à des flux magnétiques très élevés, pour réaliser un écran magnétique, ou de piéger du champ magnétique pour concevoir un aimant supraconducteur. Actuellement les pastilles réalisées peuvent atteindre des diamètres de 50mm, des formes rectangulaires voire même hexagonales [2], Fig. I.10.

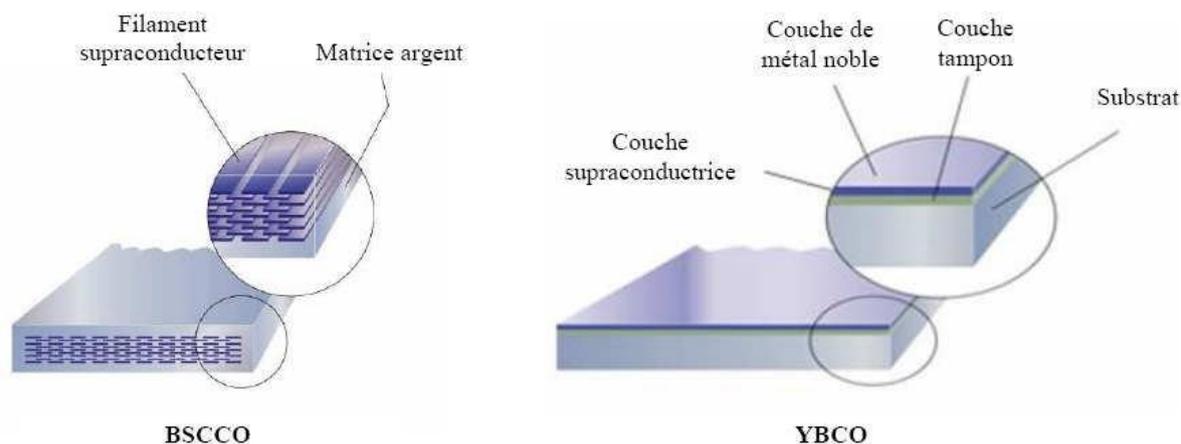


Fig.I.10 : Fils supraconducteurs HTC [2].

Le tableau. I.3 donne quelques exemples des matériaux supraconducteurs à haute température critique :

Supraconducteur	Abréviation	T _c (K)
La _{1.85} Ba _{0.15} CuO ₄	LBCO	35
La _{1.85} Sr _{0.5} CuO ₄	LSCO	40
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	YBCO	95
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	BSCCO ₈	85
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	BSCCO ₁₀	110
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	TBCCO ₈	108
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₁₀	TBCCO ₁₀	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{6+δ}	HBCCO	133.5

Tableau. I.3 : Matériaux supraconducteurs à Haute Température critique (SHTC) [10].

En 2001, un nouveau supraconducteur fait son apparition le diborure de magnésium (MgB₂), caractérisé par un plusieurs segments dans une armature en cupro-nickel. Ce supraconducteur se trouve à mi-chemin des SBTC et SHTC, avec une température critique de 39 K. Utilisé sous des températures de 20 K, il permet d'obtenir des résultats intéressants, même s'il est moins performant que les SHTC. De plus, sa base métallique en fait un fil facilement utilisable, par exemple pour la réalisation de bobines [2].



Figure. I.11 : Fil en MgB₂ [2].

I.5 Formes industrielles des matériaux supraconducteurs

I.5.1 Ruban

La forme supraconducteurs déposés sur rubans d'acier ou de nickel sont de plus en plus considérés comme des solutions pour le transport d'électricité ou comme composants possibles pour différents dispositifs électrotechniques tels que les transformateurs, les limiteurs de courant (*Superconducting Fault Current Limiters -SFCL*) ou le stockage d'énergie magnétique (*Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES*).

Il y a deux propriétés des rubans supraconducteurs :

- La densité de courant critique et l'existence d'un possible gradient de température critique.
- Le comportement au-delà du courant critique.

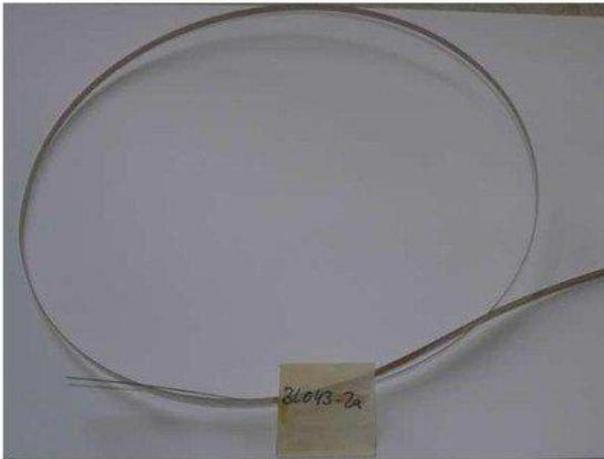


Figure. I.12 : Échantillon du ruban et image d'une bobine supraconductrice [13].

I.5.2 Pastille « Bulk »

Les matériaux supraconducteur sous forme de pastille sont fabriqués à partir de MgB_2 , $BiSrCaCuO$ et $YBCO$.

La pastille présente deux avantages :

- Densité de courant critique élevée.
- Refroidissement plus simple (azote liquide 77 K) [14].



Figure. I.13 : Supraconducteur sous forme de pastille.

I.5.3 File

Les fils supraconducteurs sont des fils électriques en matériau supraconducteur. Lorsqu'ils sont refroidis en dessous de leurs températures de transition, ils ont une résistance électrique nulle. Le plus souvent, des supraconducteurs conventionnels tels que le niobium-titane sont utilisés, mais des supraconducteurs à haute température tels que YBCO arrivent sur le marché.

Les avantages du fil supraconducteur par rapport au cuivre ou à l'aluminium comprennent des densités de courant maximales plus élevées et une dissipation de puissance nulle. Ses inconvénients comprennent le coût de la réfrigération des fils à des températures supraconductrices (nécessitant souvent des cryogènes tels que l'azote liquide ou l'hélium liquide), le danger de trempe du fil (une perte soudaine de supraconductivité), les propriétés mécaniques inférieures de certains supraconducteurs, et le coût de matériaux et de construction en fil métallique.

Sa principale application est dans les aimants supraconducteurs, qui sont utilisés dans les équipements scientifiques et médicaux où des champs magnétiques élevés sont nécessaires [15].



Figure. I.14 : Supraconducteur sous forme de File [16].

I.6 Application des supraconducteurs en électrotechnique

La découverte en 1986 des supraconducteurs à haute température critique a encouragé l'application des supraconducteurs en électrotechnique. Ce changement est dû à la capacité de ces matériaux à conduire du courant électrique de très forte densité pour des températures assez élevées par rapport aux supraconducteurs à basse température critique.

Les applications des supraconducteurs sont variées et intéressent de nombreux secteurs industriels (production d'énergie, médical, transport de courant). Celles rencontrées en électrotechnique exploitent généralement la capacité élevée de transport de courant [17].

On distingue trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique suivant la valeur utile de l'induction magnétique générée par le supraconducteur:

-**Très forts champs magnétiques** : Cette catégorie concerne les bobines de champs, les systèmes de stockage d'énergie.

-**Forts champs magnétiques** : Cette catégorie concerne les moteurs, les alternateurs, les transformateurs, les systèmes de stockage de l'énergie.

-**Faible champ magnétique** : Cette catégorie concerne les lignes du transport d'électricité, les transformateurs, les limiteurs de courant [11].

Nous présentons ci-dessous quelques applications majeures des supraconducteurs en Electrotechnique :

I.6.1 Limiteurs du courant

Les limiteurs du courant sont des éléments de circuit non linéaire utilisés pour protéger des grilles en cas d'erreur. Cependant, une nouvelle génération de limiteurs supraconducteurs est apparue. Tout système supraconducteur nécessite un environnement cryogénique composé d'un cryostat et d'un fluide cryogénique ou d'un Cryo-générateur. Le principe des limiteurs du courant supraconducteur repose sur le passage de l'état supraconducteur à l'état normal quand la valeur du courant électrique dépasse la valeur critique (I_c). Cette transition doit s'effectuer dans un temps généralement très bref pour limiter le premier pic de courant à une valeur seuil ne dépassant pas trois à cinq fois le courant nominal [18].

I.6.2 Câbles de transport

Les câbles supraconducteurs de transport intéressent de plus en plus les chercheurs et les industriels, avec ce type de lignes, on peut augmenter la puissance transmise avec des niveaux de tensions faibles par rapport à ceux permis par les lignes conventionnelles. Le paramètre le plus compliqué à réaliser dans ce type de lignes est l'isolation diélectrique. Cette isolation, qui est un paramètre important en haute tension, devient difficile à réaliser en milieu cryogénique [19].

Au Japon, la compagnie Furukawa Electric a installé en mars 2004 un câble, refroidi à l'azote, de 500 m de longueur, de 77 kV et 1 kA dans le réseau électrique pour le tester pendant une année.

La plupart des études effectuées sur les câbles supraconducteurs de transport concernent des tensions alternatives, qui entraînent des pertes dans le supraconducteur.

Pour transport en continu et alternatif, les performances par rapport aux câbles conventionnels sont meilleures. Les pertes peuvent être réduites de moitié en utilisant un câble de transport supraconducteur pour la même puissance transitée.

En Chine, un programme ambitieux concerne l'introduction de lignes supraconductrices pour le réseau de transport Est-Ouest. Actuellement, une ligne en supraconducteur à haute température critique de 33,5 m de longueur, de 35 kV et 2 kA fonctionne déjà.

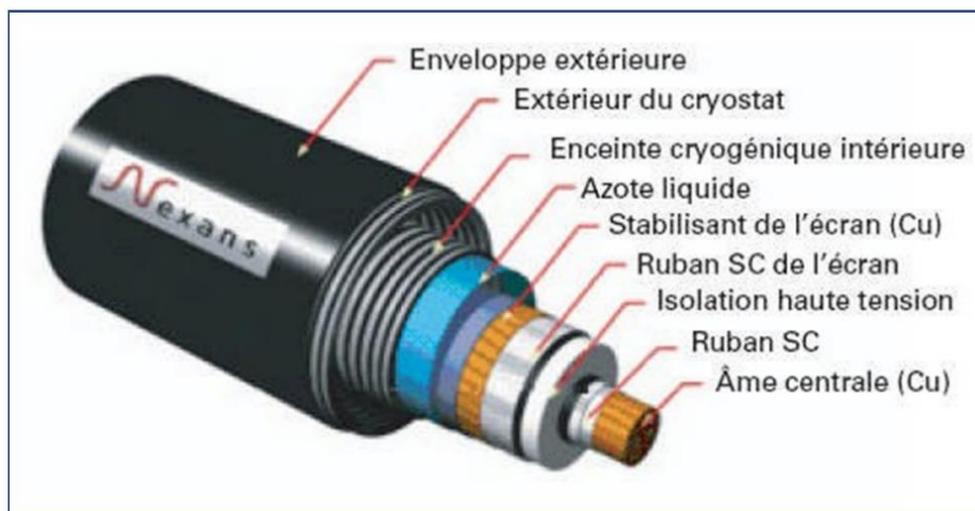


Figure. I.15 : Coupe du câble supraconducteur du projet Long Island (USA) (photo Nexans) [20].

I.6.3 Machines tournantes

Dans les moteurs électriques, il existe généralement deux critères de base caractérisant la puissance du moteur (le couple et la vitesse). Le couple du moteur tel qu'on le connaît est dû à l'interaction de deux champs magnétiques (rotor et stator), Par conséquent, la force du couple est limitée à l'augmentation de l'intensité de l'un ou de ces deux champs. Dans un moteur classique, l'amplitude de l'induction dans l'entrefer est de l'ordre de 0,8 Tesla. Or, les matériaux supraconducteurs permettent d'atteindre des niveaux d'induction magnétique que nous ne pourrions envisager avec les matériaux classiques (d'atteindre des inductions d'entrefer d'environ 2T) et ainsi obtenir une augmentation de la puissance et du couple massique dans les mêmes proportions [21].

I.6.4 Les transformateurs

Les enroulements dans le transformateur représentent le point de base, et donc une amélioration positive sur ce point est préférable pour le transformateur dans son ensemble. En raison de la chaleur émise par les bobines dans les transformateurs, sous la forme d'un effet joule, ce dernier reste contraint par divers facteurs, mais le domaine de la supraconductivité à bientôt ouvert ces limites. Le remplacement des enroulements classiques par d'autres en supraconducteur, permet d'avoir des transformateurs très performants. Selon les études, une comparaison a été faite entre les transformateurs conventionnels et les nouvelles générations (dans les mêmes conditions), comme suit : Les pertes peuvent diminuer de 30 %, le volume de 50 % et le poids de 70 % [22].

I.6.5 Les systèmes de stockage de l'énergie

Cette technologie repose sur le stockage d'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant électrique dans une bobine supraconductrice court-circuitée et refroidie sous sa température critique, ces bobines sont appelées SMES « *Superconducting Magnetic Energy Storage* ». Donc le courant circule sans perte dans ces bobines, stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie [23].

I.6.6 Les aimants permanents supraconducteurs

Un supraconducteur massif peut aussi être utilisé comme aimant permanent. En refroidissant à champ nul un supraconducteur à haute température critique, puis en l'exposant à une variation rapide du champ magnétique, il va piéger le champ magnétique. Le champ piégé dans le supraconducteur est lié à des courants induits par la loi de Lenz. Ces courants se développent comme dans un métal normal, à partir de la surface extérieure, mais contrairement aux matériaux résistifs, ils ne s'amortissent pas puisque la résistivité est nulle. Lorsque le champ extérieur diminue, la répartition des courants change pour s'opposer à cette nouvelle variation et tendre à piéger l'induction. Pour que le supraconducteur piège efficacement le champ magnétique il faut que le champ extérieur atteigne une valeur appelée champ de pénétration H_P [22].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude sur les matériaux supraconducteurs. Sachant qu'il existe deux types de matériaux supraconducteurs : type I et type II, ces derniers sont limités par des grandeurs magnétiques et thermiques appelées grandeurs critiques qui sont : la température critique (T_C), le champ magnétique critique (H_C) et enfin la densité de courant critique (J_C). Les supraconducteurs en particulier les supraconducteurs à haute température critique ont des propriétés remarquables qui rendent leur utilisation envisageable dans divers domaines d'application industriels, ils sont des candidats sérieux pour des applications liées à l'électromagnétisme en génie électrique et à l'électronique, l'optimisation de ces dispositifs nécessite de connaître leur comportement électromagnétique. Les matériaux supraconducteurs ont diverses applications dans le domaine du génie électrique. Parmi ces applications nous avons présentés les plus utilisées et les plus prometteuses.

Chapitre II

*Phénomènes magnétiques et
électriques dans un matériau
supraconducteur*

II.1 Introduction

Le comportement électrique et magnétique est les deux principales caractéristiques de la supraconductivité, qui en a fait des matériaux d'applications illimitées. On sait que la résistance au courant électrique dans tous les matériaux ordinaires est la cause d'une grande quantité de perte d'énergie électrique ainsi que la cause de la panne et de la surchauffe de nombreux appareils électriques. D'autre part, le champ magnétique est utilisé pour pénétrer tous les matériaux ordinaires sans exception. Quant aux supraconducteurs, leur résistance au courant électrique atteint zéro, et en revanche, les champs magnétiques ne peuvent pas pénétrer le corps du supraconducteur alors qu'il est sous sa forme supraconductrice, ce qui promet de nombreuses applications qui dépendent spécifiquement sur cette propriété.

Dans ce chapitre, nous traiterons des modèles macroscopiques et du comportement des supraconducteurs par rapport aux grandeurs externes, et nous présenterons aussi le problème des pertes.

II.2 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.

II.2.1 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 [24]. L'équation qui décrit le comportement de supraconducteur selon ce modèle de Bean est illustrée comme suit :

$$J = \pm J_c \text{ ou } 0 \quad (\text{II.1})$$

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \pm J_c \text{ ou } 0 \quad (\text{II.2})$$

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 II.1.

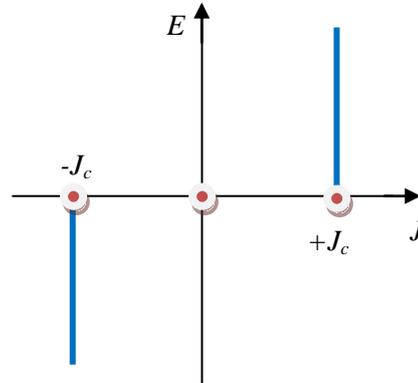


Figure II.1: Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur, selon le modèle de Bean [26].

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. II.3) :

$$J = J_c(|B|) \frac{E}{|E|} \quad (\text{II.3})$$

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

II.2.2 Modèle de Kim

Le modèle de Bean ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme. Ils ne tiennent pas compte de l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est supposée constante quel que soit le champ magnétique extérieur. Dans la réalité la densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique, B . Une expression de $J_c(B)$ dans le cas isotrope a été donnée par Kim et al.

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (\text{II.5})$$

II.2.3 Modèle de la loi en puissance

C'est un modèle qui modélise bien le comportement des supraconducteurs à haute température critique (HTC) autour de J_c [27].

L'expression mathématique de ce modèle est donnée comme suit :

$$\vec{E}(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c}\right)^{n-1} \vec{J} \quad (\text{II. 6})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II. 7})$$

Les paramètres de variation de cette loi sont la densité de courant critique J_c et l'exposant « n ». Avec ce modèle on peut faire varier les courbes $E(J)$ de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour $n = 1$ (loi de comportement linéaire) jusqu'à l'obtention d'une courbe raide comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un $n > 100$ [25].

II.2.4 Modèle exponentiel

Une autre expression de la dépendance de J_c de l'induction magnétique est proposée par ce modèle comme suit [28] :

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

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 $J_c(B)$.

II.3 Comportement des supraconducteurs vis-à-vis des champs externes

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

II.3.1 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.

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. II.3 présente les différentes étapes pour aimanter une pastille supraconductrice selon les trois méthodes citées au-dessus (FC, ZFC, PFM).

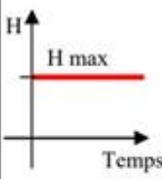
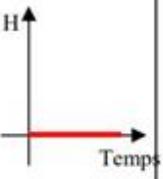
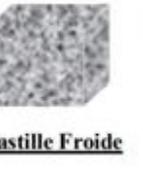
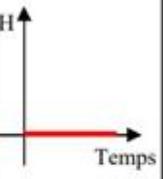
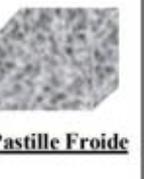
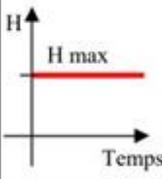
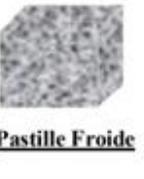
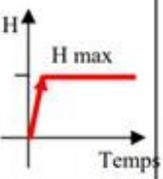
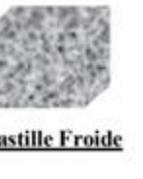
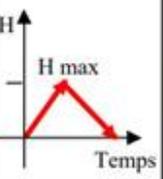
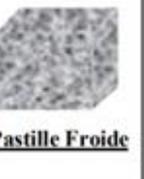
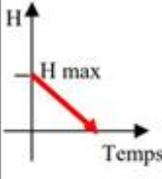
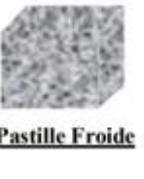
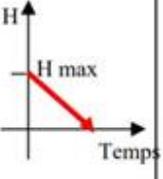
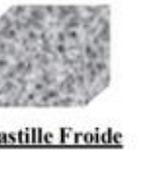
	La méthode FC		La méthode ZFC		La méthode PFM	
	H appliqué	Etat SHTc	H appliqué	Etat SHTc	H appliqué	Etat SHTc
Etape -1-		 Pastille chaude		 Pastille Froide		 Pastille Froide
Etape -2-		 Pastille Froide		 Pastille Froide		 Pastille Froide
Etape -3-		 Pastille Froide		 Pastille Froide		

Figure. II.3 : Tableau récapitulatif des méthodes d'aimantation d'une pastille SHTC.

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, afin d'avoir un champ piégé dans la pastille quand le champ externe s'annule. 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.

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 impulsionnel), 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.

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. Cette valeur est inférieure de deux fois dans le cas de la méthode ZFC pour le même champ appliqué. 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 [29].

II.3.2 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 Fige (II.4), étape -1-), dans ce cas la pastille supraconductrice fonctionne comme un écran magnétique.

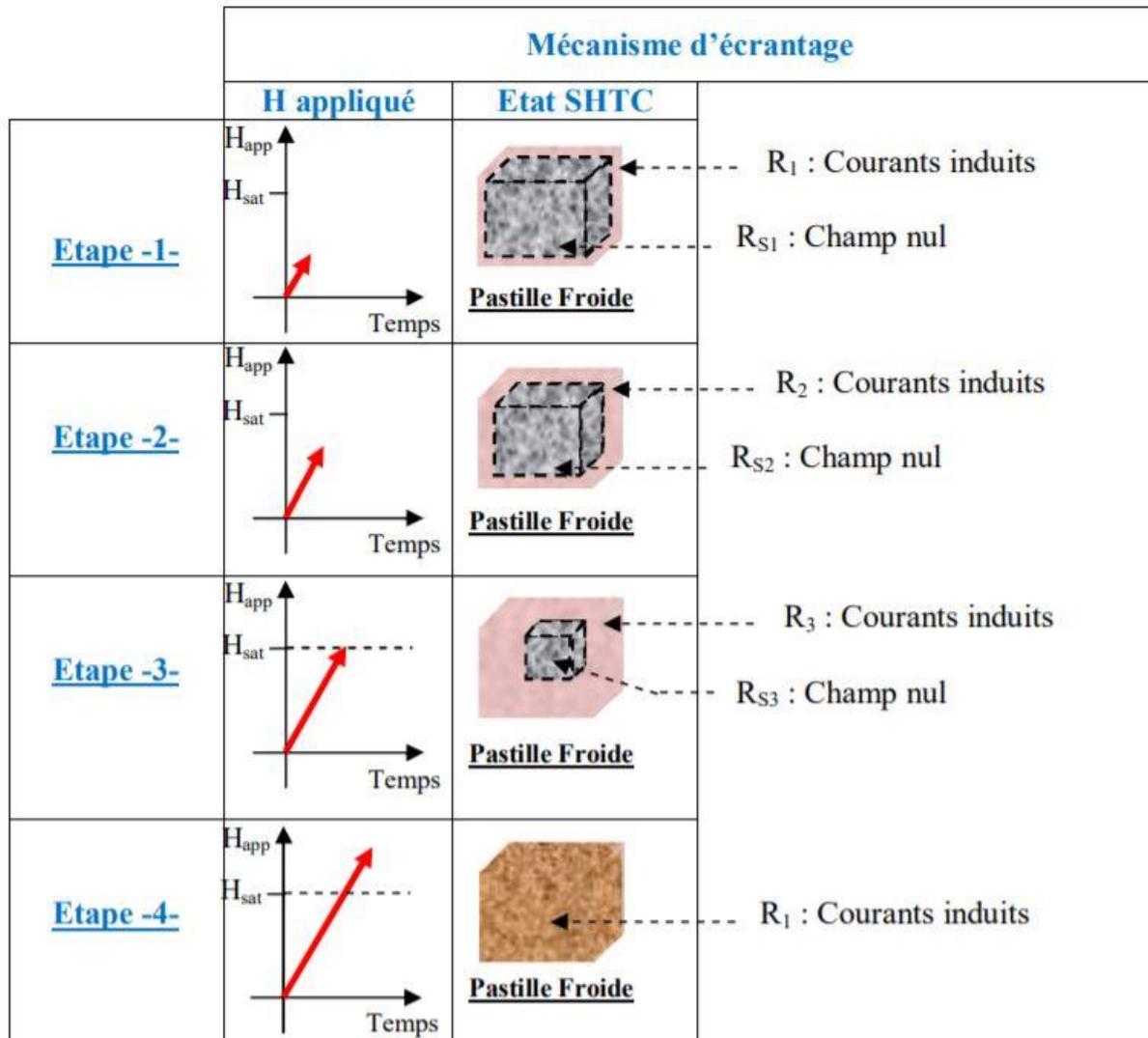


Figure. II.4 : Pastille SHTC soumise à un champ magnétique externe « mécanisme d'écrantage ».

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 (dépassé 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 [29].

II.4 Pertes dans les matériaux supraconducteurs

II.4.1 Pertes en courant continu (DC)

Lorsqu'un matériau supraconducteur est traversé par un courant continu, on parle dans ce cas des pertes DC en champ propre puisque le matériau est soumis uniquement au champ créé par le courant qui le traverse. À température constante et champ magnétique extérieur nul, l'évolution du champ électrique est en fonction de la valeur du courant continu qui traverse un échantillon de supraconducteur HTC.

En courant continu, la résistivité d'un supraconducteur peut être considérée comme nulle ($\rho < 10^{-25} \Omega.m$) [30], Donc pas ou très peu de pertes.

En générale, les pertes en courant continu (pertes DC) sont totalement négligeables.

II.4.2 Pertes en courant alternatif (AC)

II.4.2.a Pertes AC en champ propre

Si le supraconducteur est traversé par un courant alternatif, celui-ci crée un champ magnétique variable. Les variations temporelles de ce champ magnétique entraînent la création ou la disparition permanente de vortex dans le matériau, donc un déplacement et une réorganisation du réseau, donc un champ électrique qui, combiné au courant de transport, crée une dissipation d'énergie. On parle alors de pertes AC en champ propre.

L'utilisation des supraconducteurs à haute température critique (SHTC) pour le transport du courant électrique alternatif est maintenant une réalité et l'évaluation des pertes en champ

propre est nécessaire. Bien que ces pertes soient faibles, il convient de les évaluer avec précisions [31].

Lorsque le supraconducteur est traversé par un courant alternatif, celui-ci crée un champ magnétique variable engendrant des pertes appelées AC.

II.4.2.b Pertes AC en champ extérieur

Lorsqu'un supraconducteur est soumis à un champ magnétique extérieur variable, celui-ci entraîne, pour les mêmes raisons que précédemment, la création d'un champ électrique dans le matériau qui, combiné au courant qui se crée pour écranter ce champ (loi de Lenz), amène une dissipation d'énergie dans le matériau. On parle alors de pertes AC en champ extérieur.

Les pertes AC, elles, sont souvent non négligeables, même pour des courants dont la valeur maximale est 3 à 4 fois plus petite que I_c .

De façon plus macroscopique, on peut dire que toute modification de l'état magnétique du matériau crée un champ électrique et donc, potentiellement, des pertes. En effet, quelle que soit l'origine du champ électrique, celui-ci est relié à une densité de courant par une «loi de comportement du matériau»; or la présence d'un champ électrique et d'une densité de courant colinéaire entraîne des pertes.

Les phénomènes de pertes en champ propre ou extérieur peuvent bien évidemment se combiner à l'intérieur des dispositifs supraconducteurs. De plus, un champ magnétique extérieur continu ou un courant continu peuvent s'ajouter au champ ou courant alternatif et venir modifier l'état électromagnétique du matériau, donc les pertes [32].

Ces pertes restant faibles par rapport aux pertes joules créent dans un métal conventionnel [32].

II.5 Formes de matériaux supraconducteurs

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.

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

D’après le Tableau II.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 coté [33].

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 [34].

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.

II.5.1 Fabrication du ruban en BSCCO (1G) [35]

Comme indiqué ci-dessus (Fig.II.5), 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 II.5.



Figure II.1: Forme de matériau SHTC en BSCCO (*Bi-2223*)

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 $Ca_2PbO_4 + Bi2212$ + 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 et enfin l'ensemble est fritté à une température suffisante.

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 [36].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les différents modèles macroscopiques décrivant le comportement des supraconducteurs comme la loi de Bean et en puissance. D'après ces lois nous constatons que ces matériaux sont très sensibles vis-à-vis quelques grandeurs comme le champ magnétique externe et le courant de transport. Ces derniers provoquent soit des courants induits dans le matériau (champ de pénétration) ou bien des pertes sous forme de chaleur.

La forme du supraconducteur en BSCCO est ainsi détaillée aussi dans cette partie afin de bien familiariser avec ce type de matériau et de l'utiliser dans notre simulation au prochain chapitre.

Chapitre III

*Etude de comportement d'un
ruban supraconducteur*

III.1 Introduction

Comme abordé dans le Chapitre 2 et l'étude bibliographique des matériaux supraconducteurs, nous allons nous intéresser dans cette partie à la possibilité qu'offrent ces matériaux en termes d'écrantage magnétique. En effet, lors d'un blindage ou d'un piégeage de flux avec un supraconducteur, le matériau supraconducteur crée naturellement des courants induits en inverse dans le matériau afin de s'opposer à la variation du champ magnétique extérieur.

Cette problématique s'insère dans le cadre de l'étude d'une structure d'un ruban supraconducteur à haute température critique. Les rubans SHTC sont utilisés pour la réalisation des différents dispositifs en électrotechnique de hautes puissances, comme les moteurs électriques et les transformateurs supraconducteurs. En effet, lors du fonctionnement de ces derniers, les rubans peuvent soumis à des champs magnétiques externes élevés créant des courants induits dans le ruban ou de transporter des courants électriques de valeurs importantes provoquant un échauffement dans le matériau.

Dans ce chapitre nous allons effectuer une modélisation numérique d'un ruban supraconducteur afin de déterminer le comportement de ce dernier vis-à-vis un champ magnétique externe appliqué, d'un côté, et d'estimer les pertes dues au passage du courant alternatif (AC) d'un autre côté.

III.2 Présentation du problème d'étude

L'objectif de notre travail est d'étudier les performances d'écrantage de champs magnétiques avec des matériaux supraconducteurs sous forme de rubans. Celles-ci dépendent directement de la capacité de ces matériaux à induire des courants importants.

Pour traiter ce problème fortement non linéaire de courants induits, plusieurs formulations peuvent être utilisées. Nous avons choisi une *formulation en H* , où le vecteur du champ magnétique H est considéré comme variable d'état.

Selon [37,38], la formulation en H est bien adaptée à la résolution de problèmes de courants induits dans les supraconducteurs. En effet, la modélisation par éléments finis nécessite l'utilisation d'éléments d'arête qui permettent d'assurer la continuité du champ magnétique à l'interface d'éléments adjacents.

Nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour implémenter cette formulation. Ce logiciel offre diverses possibilités d'écriture des équations aux dérivées partielles avec une bibliothèque très riche de solveurs directs et itératifs. L'utilisation des contraintes de type intégrale permet d'imposer aussi un courant de transport au matériau, par exemple.

Auparavant, nous avons vu différents types de matériaux supraconducteurs à haute température critique qui ont des propriétés physiques intéressantes et parmi eux se trouve le BSCCO qui peut être utilisé avec une densité de courant et un champ magnétique plus élevés. Dans cette partie, nous allons faire une étude numérique sur un matériau supraconducteur en BSCCO avec le logiciel COMSOL. Lors de cette étude nous allons traiter :

- Les courants induits dans le matériau : dues par l'application d'un champ magnétique externe.
- Les pertes AC : dues par l'alimentation du matériau par un courant alternatif.

III.3 Formulation du problème

D'un point de vue macroscopique, les phénomènes électromagnétiques qui sont produit dans un matériau supraconducteur peuvent être décrits à l'aide des équations de *Maxwell*. Dans ce cadre, nous pourrions écrire :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III. 1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III. 2})$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{III. 3})$$

A ces équations, il faut rajouter des lois de comportements qui lient les différents champs dans le matériau. Dans le cas linéaire on écrit :

$$\vec{E} = \rho \vec{j} \quad (\text{III. 4})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III. 5})$$

Où :

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{H} : Champ magnétique (A/m).

\vec{B} : Induction magnétique (T).

μ : Perméabilité magnétique du milieu (H/m).

ρ : Résistivité de milieu ($\Omega.m$).

\vec{J} : Densité de courant (A/m^2).

Cependant, pour un supraconducteur, ces lois de comportement sont fortement non-linéaires.

Toujours d'un point de vue macroscopique, la relation qui lie la densité de courant au champ électrique dans un matériau supraconducteur est caractérisée par une résistivité non-linéaire (Equ. III.6). Dans ce cas, le champ électrique E et la densité de courant J sont liés par une relation dite loi en puissance (voir chapitre 2).

$$\rho(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left| \frac{\vec{J}}{J_c} \right|^{n-1} \quad (\text{III. 6})$$

L'utilisation des équations (III.1), (III.2) et (III.3), associées aux lois de comportement (III.4) et (III.5) dans le vide ($\mu=\mu_0$) permet d'écrire l'équation aux dérivées partielles (PDE) suivante :

$$\overrightarrow{rot} \left(\rho(\vec{J}) \overrightarrow{rot}(\vec{H}) \right) = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{III. 7})$$

L'équation (III.7) est la relation utilisée pour les supraconducteurs dans la modélisation des problèmes de courants induits. Avec μ_0 est la perméabilité magnétique dans le vide ($4\pi.10^{-7}$ H/m). La résistivité électrique non-linéaire $\rho(J)$ est donc introduite à l'aide de l'équation (III.6).

III.3.1 Formulation en plan 2D

Nous considérons un problème bidimensionnel dans le plan xy . La densité de courant et le champ électrique n'ont alors qu'une seule composante dirigée suivant l'axe Oz et ne dépendent que des coordonnées x et y . Nous écrivons donc :

$$\vec{J} = J_z(x, y) \vec{u}_z \quad (\text{III. 8})$$

$$\vec{E} = E_z(x, y)\vec{u}_z \quad (III. 9)$$

En effet, le champ magnétique à deux composantes :

$$\vec{H} = H_x(x, y)\vec{u}_x + H_y(x, y)\vec{u}_y \quad (III. 10)$$

On peut déduire une écriture plus détaillée, permet une implémentation simple sous COMSOL, à partir de l'équation (III. 1) ou bien (III. 7).

L'équation (III.1) peut écrire de la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \\ \vec{E}_z \end{pmatrix} = -\mu_0 \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{H}_x \\ \vec{H}_y \\ \vec{H}_z \end{pmatrix} \quad (III. 11)$$

En utilisant l'équation (III.9) et (III.10), l'équation (III.11) peut simplifier comme suit :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial E_z}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix} = -\mu_0 \begin{pmatrix} \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (III. 12)$$

Enfin, on trouve la forme simplifier d'écrite par l'équation (III.13) suivante :

$$\begin{cases} \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial E_z}{\partial y} = 0 \\ \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (III. 13)$$

A partir de l'équation (III.2) et (III.8), on peut aboutir aussi à la formule simplifié de la densité de courant suivant J_z :

$$J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (III. 14)$$

De la même façon, On obtient :

$$E_z = \rho(J_z) J_z \quad (III. 15)$$

Les expressions (III.13), (III.14) et (III.15) nous ont permis d'implémenter simplement notre problème sous COMSOL à l'aide du module « **PDE, General form** ». Le module PDE est un outil qui résout une équation générale, où chaque paramètre est défini par l'utilisateur.

III.4 Présentation du modèle étudié

Comme on a vu dans le chapitre 1, il existe plusieurs formes de matériaux supraconducteurs dans l'industrie. Les plus connus sont de la forme filaires, les tubes, les pastilles (bulks) et les rubans. On s'intéresse dans notre étude au ruban supraconducteur en BSCCO. La figure III.1 montre une section d'un ruban BSCCO, sur laquelle nous pouvons distinguer la matrice d'argent et les filaments.

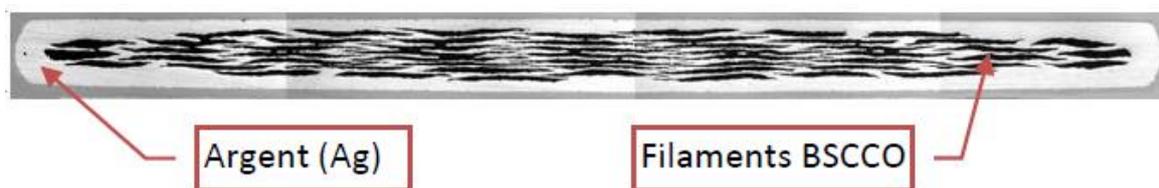


Figure. III.1 : Section d'un ruban en BSCCO par Sumitomo Electric (Bi-2223).

Le tableau III.1 présente les paramètres critiques des rubans en BSCCO (Bi-2212 et Bi-2223).

Paramètre	Bi-2212	Bi-2223
T_c (Kelvin)	87	110
J_c (A /mm ²) à 4,2 K	5000	3000
J_c (A /mm ²) à 77 K	100	500

Tableau. III.1 : paramètres critiques des principaux SHTC en BSCCO utilisés dans les applications en puissances [39].

III.4.1 Dimensionnement et caractéristique de l'échantillon

Dans notre étude on considère que le ruban est une matière supraconductrice (filaments) de forme rectangulaire et on néglige la surface de la matrice en argent Ag (voir Fig.III.2). Nous considérons aussi le modèle de la loi en puissance, présenté dans le chapitre 2, comme loi de comportement du matériau supraconducteur.

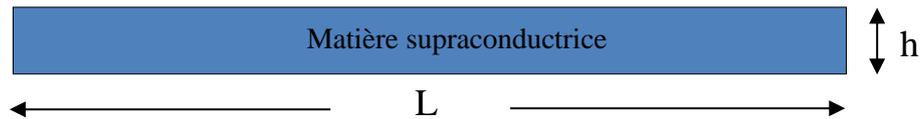


Figure. III.2 : Forme géométrique 2D du ruban supraconducteur étudié.

Avec :

h : Epaisseur du ruban.

L : Largeur du ruban.

Le tableau III.2 regroupe les caractéristiques globales du ruban.

Caractéristique	Valeur	Description
E_c	10^{-4} V	Champ électrique critique
J_c	$5 \cdot 10^8$ A /m ²	Densité de courant critique
n	40	Exposant de la loi en puissance
L	0,04 m	Largeur du ruban
h	0,005 m	Epaisseur du ruban

Tableau. III.2 : Caractéristiques géométriques et physiques du ruban supraconducteur étudié.

III.5 Etude de comportement d'un ruban supraconducteur

III.5.1 Etude des courants induits

Nous étudierons le comportement d'un supraconducteur, sous forme d'un ruban, dans le cadre d'un problème plan 2D-cartésien. La figure (III. 3) représente une coupe 2D d'un ruban supraconducteur dans le plan (xy), soumis à un champ magnétique normal (suivant l'axe y). Ce champ homogène est appliqué sur le ruban avec une rampe croissante, comme indiqué sur l'équation suivante :

$$H_{app}(t) = \frac{1}{100 \cdot \mu_0} \cdot t \quad (\text{III. 16})$$

Avec H_{app} représente le champ magnétique externe appliqué en fonction du temps (t).

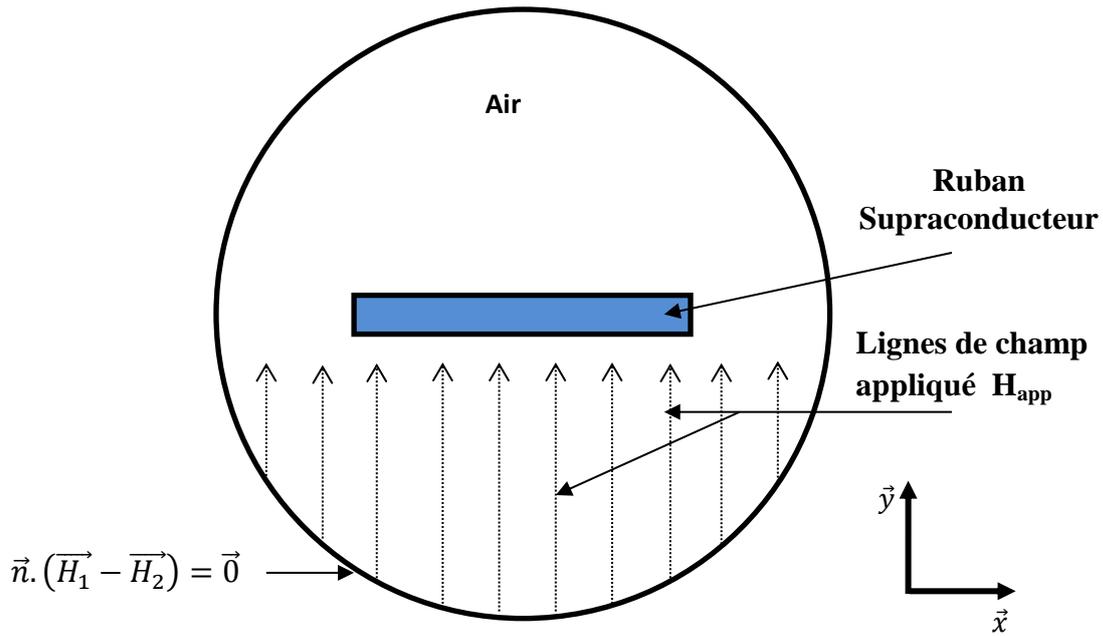


Figure. III.3 : Représentation 2D d'un ruban supraconducteur soumis à un champ normal (suivant y).

Pour l'étude de notre problème nous considérons les hypothèses suivantes :

- ✚ Pour éviter les problèmes de convergences dans l'outil informatique, une résistivité résiduelle ρ_0 est ajoutée arbitrairement. Donc l'équation (III.6) devient :

$$\rho(J_z) = \frac{E_c}{J_c} \left| \frac{J_z}{J_c} \right|^{n-1} + \rho_0 \tag{III.17}$$

Le paramètre ρ_0 doit être choisi de telle sorte que sa valeur n'entraîne pas d'erreur sur les calculs réalisés. Nous avons choisi une valeur faible soit : $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-15} \Omega \cdot m$.

- ✚ Le champ magnétique appliqué est donné par l'expression suivante :

$$\begin{cases} H_x = 0 \\ H_y = H_{app}(t) \end{cases} \tag{III.18}$$

- ✚ Le champ électrique dans l'espace d'air entouré par le cercle de 1m de diamètre (voir Fig. III.3) est donné comme suit :

$$E_z = \rho_{air} J_z \tag{III.19}$$

Avec ρ_{air} est la résistivité électrique de l'air, égale à 1.

- ✚ Le matériau supraconducteur est conservé dans une température inférieure à sa température critique T_c .

III.5.1.a Résultats de simulations

Dans le COMSOL 3.5a, nous avons choisi un maillage triangulaire pour le ruban supraconducteur avec une taille d'élément maximale de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ (Fig. III. 4).

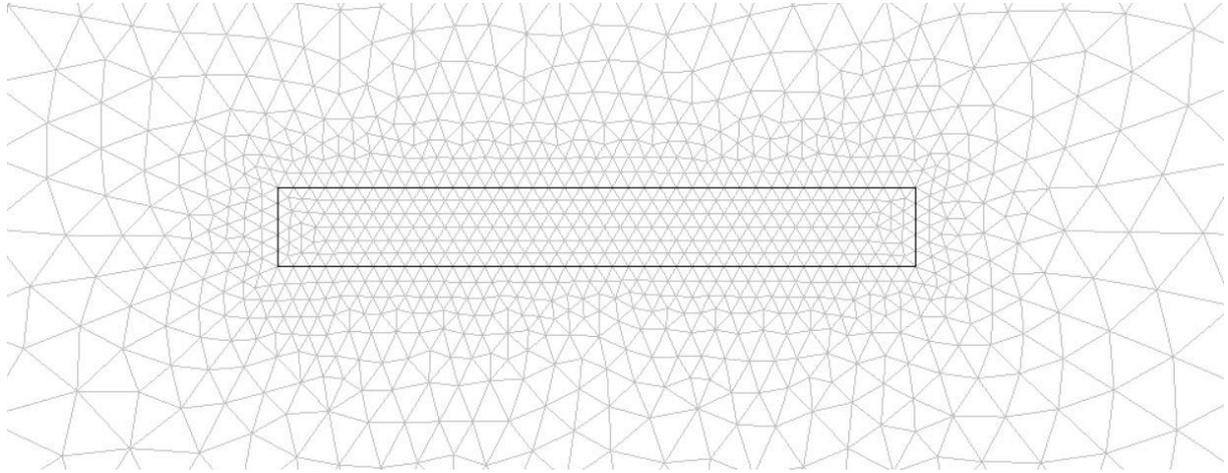


Figure. III.4 : Maillage du domaine d'étude dans COMSOL.

Comme observé dans les chapitres précédents, les supraconducteurs sont fortement dépendants de l'induction magnétique à laquelle ils sont soumis. Cette caractéristique est aussi liée à la température de fonctionnement et au matériau utilisé. Pour notre application, un ruban supraconducteur est choisi à une température de fonctionnement autour de 77 Kelvin.

La figure III.5 montre la distribution de l'induction magnétique et de la répartition de la densité de courant dans le matériau (section du ruban) aux différents instants $t = 20, 40, 60, 80, 100$ et 120 S correspond respectivement aux inductions de $0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1$ et $1,2$ Tesla appliquées au ruban supraconducteur. D'une notre façon, nous avons présenté sur cette figure (Fig.III.5) le mécanisme d'écrantage dans un ruban supraconducteur selon l'effet du champ magnétique extérieur appliqué. Conformément à la loi de Lenz, des courants induits se développent principalement sur le bord extérieur du ruban afin de supposer au champ extérieur appliqué, figure III.5-(**J/J_c**). Cette zone à forte densité de courant propage vers le centre de la section du ruban, due à l'augmentation de B_{app} , provoque une diminution dans la largeur de la zone d'écrantage du matériau supraconducteur. On remarque une faible pénétration de champ avec des valeurs de B_{app} inférieures à $0,8$ T (Fig. III .5-(**B**)), mais au-delà de 1 et $1,2$ Tesla une pénétration remarquable est observer dans le matériau. Du fait des symétries de la géométrie de ruban, pour tout le reste du document, seul un demi de la géométrie est présentée. De plus la densité de courant induit J_z et notée simplement J .

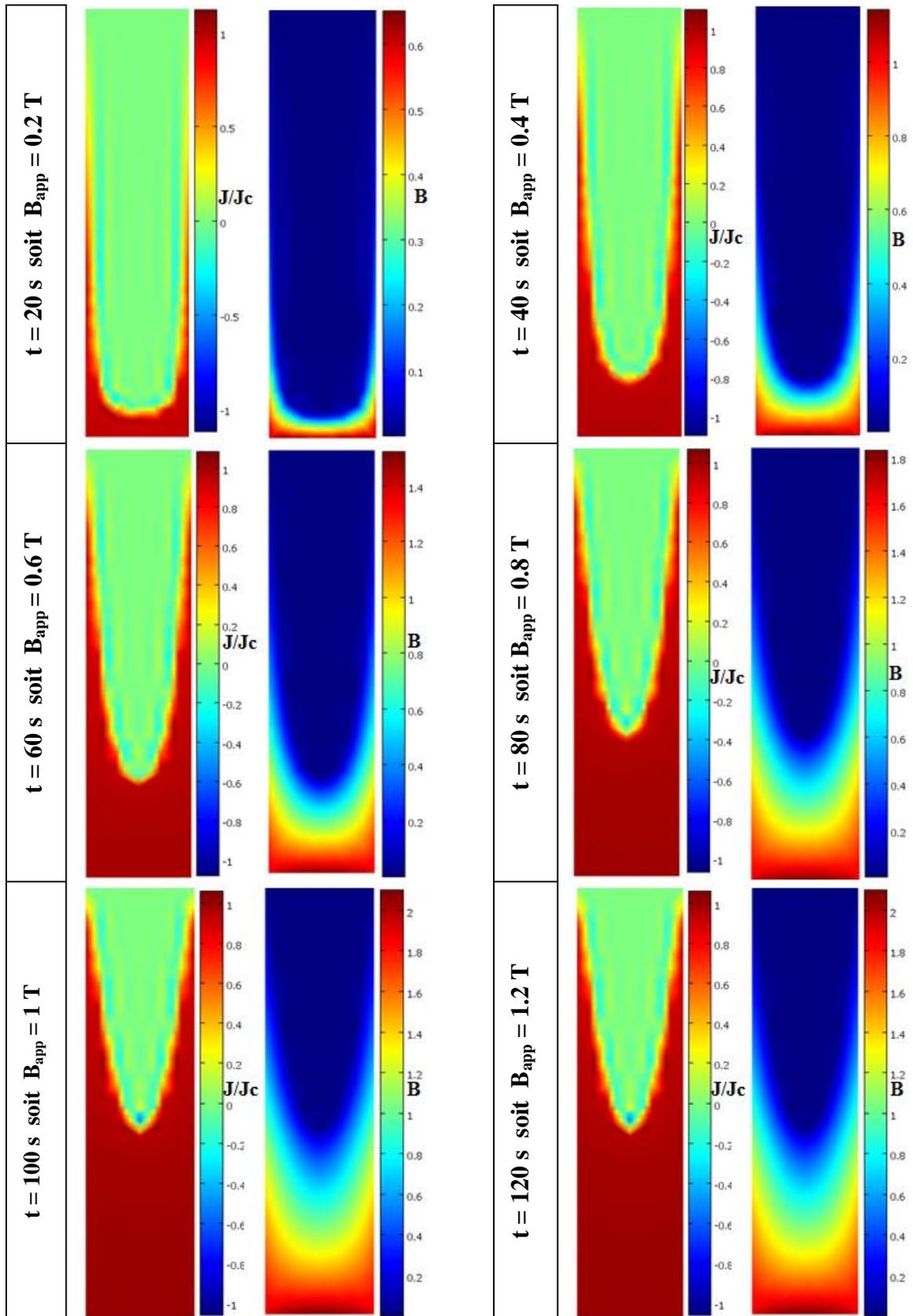


Figure. III.5 : Courants induits dans un ruban SHTc soumis à des valeurs de champs appliqués, à droite l'évolution de (B) et à gauche du rapport (J/J_c) en fonction de (B_{app}), pour le modèle de la loi en puissance ($J_c=5e^8$ A/m², $n=40$).

Chaque supraconducteur est caractérisé par des grandeurs spécifiques liées au matériau comme la densité de courant critique. Cette dernière contribue fortement pour connaître le comportement de ses matériaux et par conséquent les limites de fonctionnement. La figure (III.6) montre la variation des courants induits dans le ruban en fonction des différentes valeurs de J_c avec l'application d'un champ magnétique de 1 Tesla. Pour $J_c=5e^6$ et $5e^7$ (A/m^2), le supraconducteur perd la totalité de sa surface d'écrantage qui se traduit par la forte densité de courants présentée sur la majorité de la surface du ruban. Par contre, pour des valeurs supérieures ou égale à $5e^8$ (A/m^2) on observe une faible surface des courants induits dans le supraconducteur dont un meilleur écrantage est constaté pour J_c égale $5e^9$ (A/m^2).

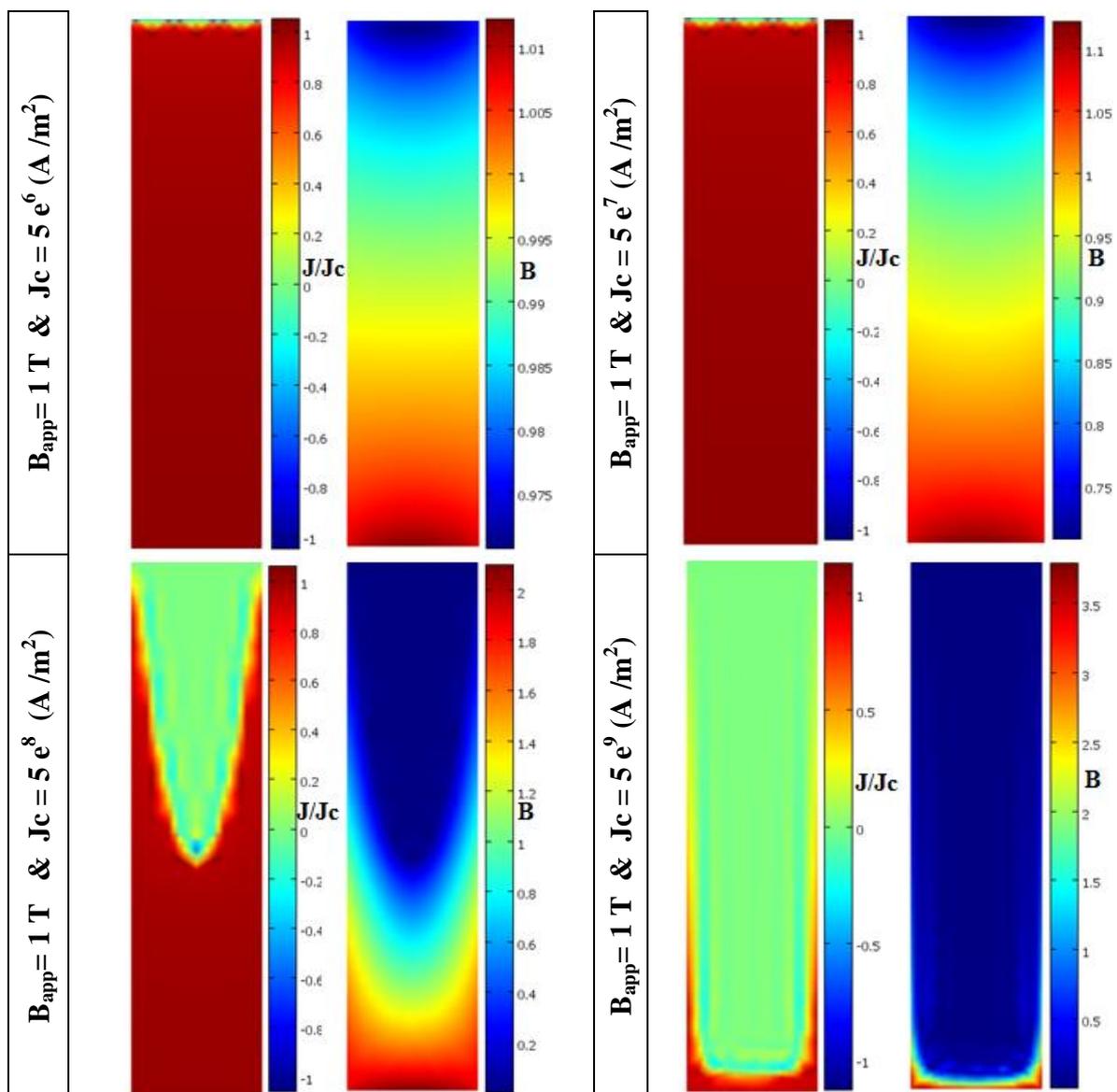


Figure. III.6 : Courants induits dans le ruban SHTc soumis à $B_{app}= 1$ Tesla, à droite l'évolution de (B) et à gauche du rapport (J/J_c) en fonction de la densité de courant critique (J_c).

Généralement, l'utilisation des rubans supraconducteurs est sous la forme de bobines à plusieurs enroulements, comme le montre sur la figure III.7. Le résultat de simulation des courants induits dans ce cas est montré sur la figure III.8, dont une demi de la section de la bobine est représentée à cause de la symétrie.



Figure. III.7 : Bobine réalisée à l'aide d'un ruban supraconducteur

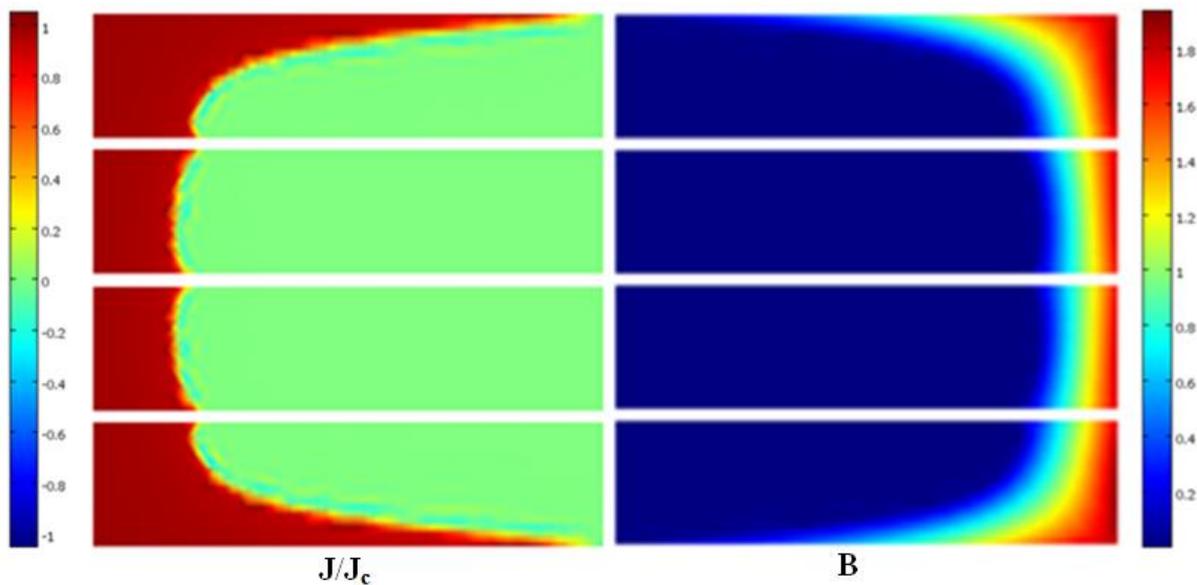


Figure. III.8 : Courants induits dans la bobine SHTc soumis à $B_{app} = 1$ Tesla, à droite l'évolution de (B) et à gauche du rapport (J/J_c) pour $J_c = 5e^8$ A/m² et $n=40$.

D'après la figure III.8, nous observons une pénétration de champ magnétique B à partir des bords extérieurs de la bobine vers le centre comme dans le cas d'un ruban seul (Fig.III.5), par contre, pour une bobine les rubans situant dans les couches intérieures sont moins pénétrés par B , car les couches externes (rubans) de la bobine sont les plus exposées au champ magnétique externe par rapport aux couches intérieures. On constate que la bobine

supraconductrice se comporte généralement comme un ruban vis-à-vis le champ magnétique appliqué. On remarque aussi qu'il n'existe pas de concentration de champ magnétique dans les zones entre les rubans, cela se traduit par l'absence des courants induits circulant entre deux rubans supraconducteurs.

Sur la figure (III.9), le champ magnétique maximal sur la bobine (B_{\max}) est représenté en fonction de champ extérieur appliqué (B_{app}).

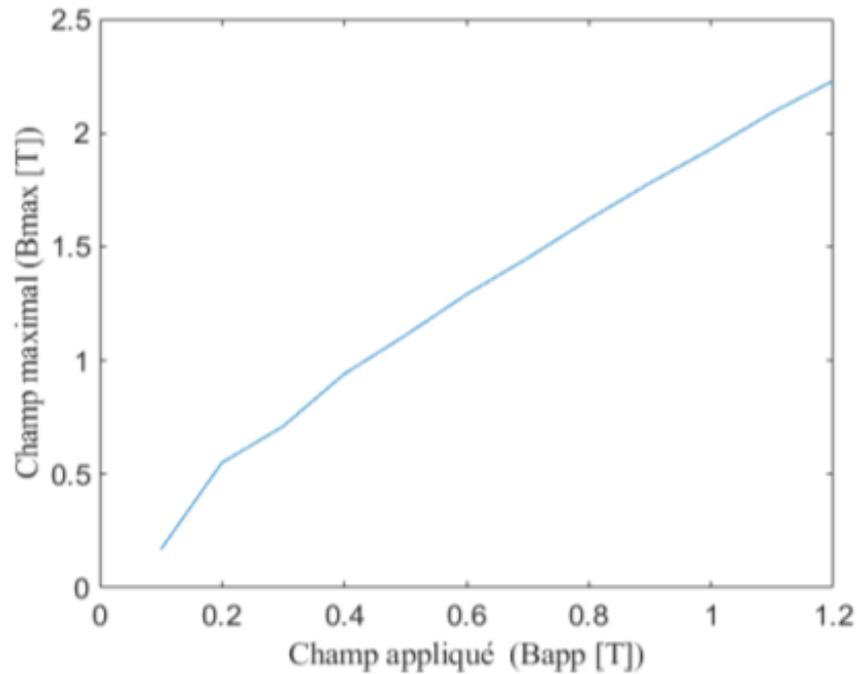


Figure. III.9 : Variation de champ de pénétration B_{\max} dans la bobine supraconductrice en fonction de champ appliqué B_{app} ($J_c=5e^8$ A/m² et $n=40$).

Selon la figure III.9, On remarque que le champ de pénétration dans la bobine augmente suivant l'augmentation de champ appliqué. Une valeur de B_{\max} plus de 2T est constaté avec un champ appliqué égale à 1,2T. A partir de cette valeur de B_{app} la surface d'écrantage commence à diminuer petit à petit jusqu'à ce que la bobine perde son état supraconducteur. La connaissance du champ magnétique maximal qu'on peut appliquer sur la bobine nous a donné une estimation sur les limites de fonctionnement de cette bobine dans les dispositifs électromagnétique.

Comme abordé précédemment, le supraconducteur caractérise par une forte dépendance entre la densité de courant critique (J_c), le champ magnétique critique (H_c) et la température critique (T_c). L'augmentation de la concentration des courants induits dans le ruban favorise

la pénétration des lignes de flux ce qui provoque par conséquent l'échauffement du matériau, jusque ce dernier trouve son état non supraconducteur.

III.5.2 Etude des pertes AC

Dans cette partie, on néglige tout champ magnétique appliqué externe et on alimente le même ruban supraconducteur, étudié précédemment, par un courant alternatif sinusoïdal (I_{app}) comme illustré à la figure (III. 10).

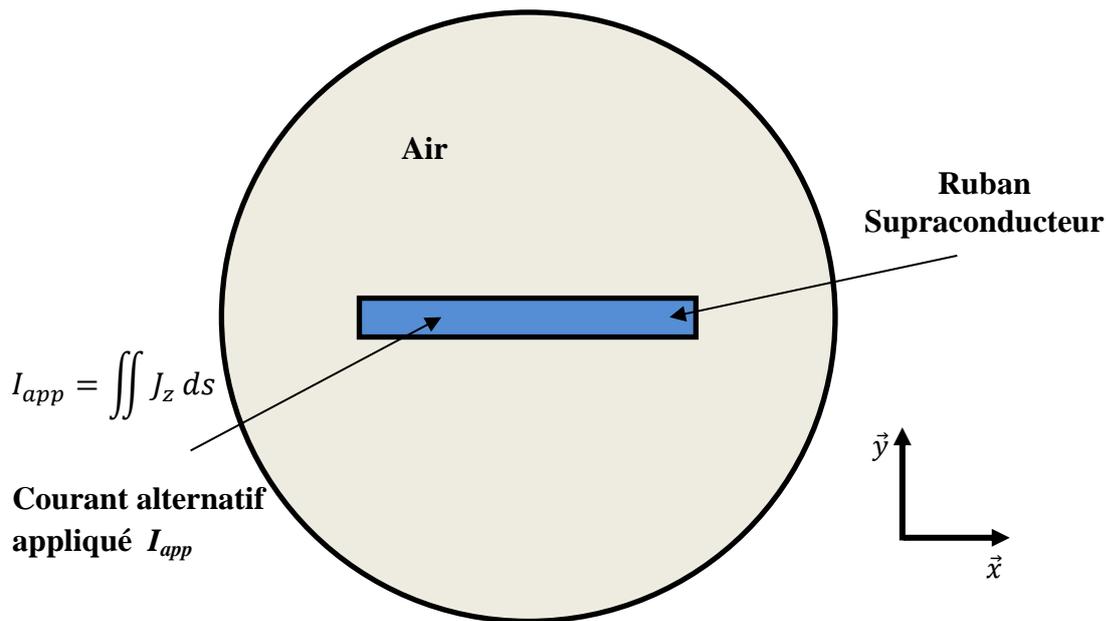


Figure. III.10 : Représentation 2D d'un ruban supraconducteur parcouru par un courant AC (suivant z).

Le passage d'un courant alternatif dans un ruban supraconducteur crée des pertes traduites par échauffement du matériau. La détermination de ces pertes nous a permis d'améliorer les performances des dispositifs électromagnétiques réalisés à base des matériaux supraconducteurs.

On exprime l'équation des pertes joules dans le cas d'un conducteur conventionnel comme le cuivre par exemple, en fonction de la résistance du matériau et le courant de transport :

$$P = RI^2 \quad (III. 20)$$

Avec :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{III. 21})$$

Dont ρ est la résistivité électrique du matériau, l et S sont la longueur et la section du conducteur respectivement.

La différence entre un conducteur conventionnel et un ruban supraconducteur est dans la résistivité électrique. Cette dernière est représentée avec une expression non-linéaire (Equ. III.17). Donc l'expression des pertes AC (perte à champ propre) due par le passage d'un courant alternatif dans un conducteur supraconducteur est :

$$P_{\text{sup}} = \rho(J) \frac{l}{S} I_{\text{app}}^2 \quad (\text{III. 22})$$

Tel que :

P_{sup} : Pertes AC en (W/m).

I : Courant de transport en (A).

$\rho(J)$: résistivité du matériau supraconducteur.

l : longueur du ruban (m).

s : section du ruban (m^2).

On a:

$$J_z = \frac{I_{\text{app}}}{S} \quad (\text{III. 23})$$

L'expression de courant appliqué est donnée comme suite :

$$I_{\text{app}} = I_{\text{max}} \sin(\omega t) \quad (\text{III. 24})$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{III. 25})$$

Tel que :

ω : Pulsation du courant.

f : Fréquence du courant (50 Hz).

III.5.2.a Résultats de simulations

Le ruban supraconducteur est alimenté avec un courant alternatif de valeur maximale égale à $I_{\max}=6.10^3$ A. On considère aussi les mêmes caractéristiques du matériau supraconducteur ($J_c=5.10^8$ A/m², n = 40). De plus, une longueur de 1m pour le ruban est fixée dans de notre simulation. Cette dernière est basée sur l'équation III.22.

La figure III.11 montre l'allure des pertes AC de ruban en fonction du temps.

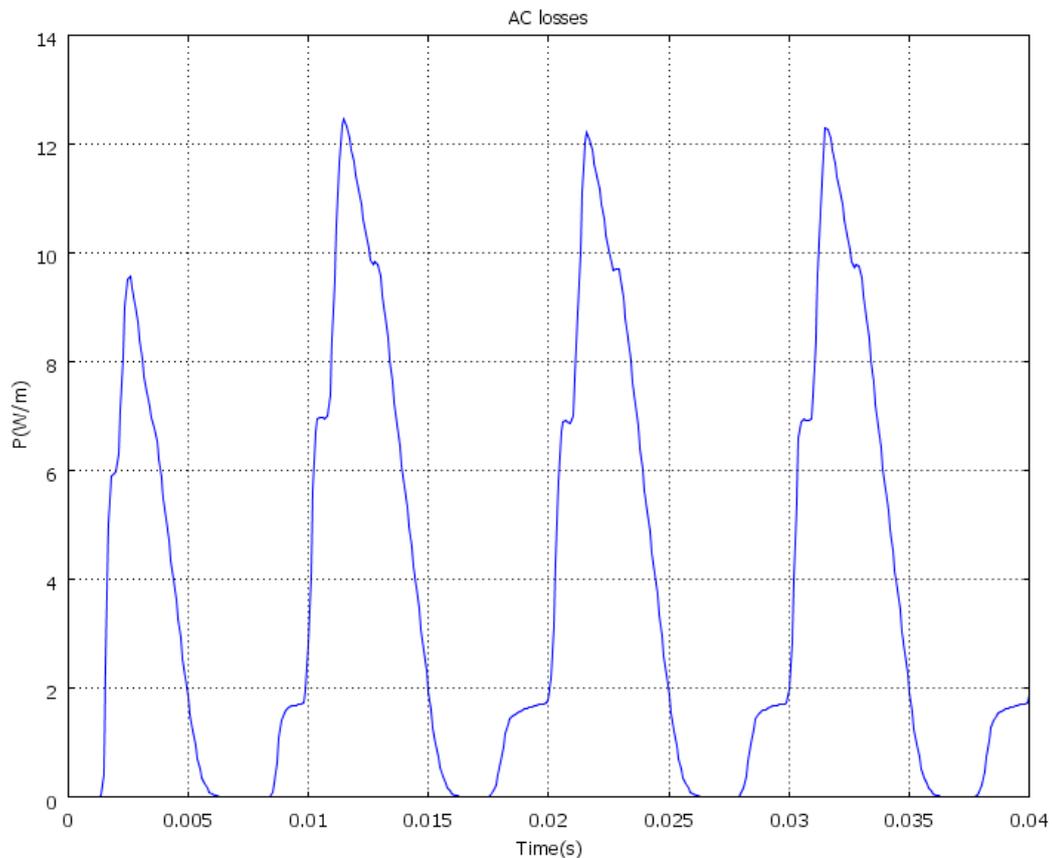


Figure. III.11 : Représentation des pertes AC à champ propre.

Une estimation des pertes d'environ 12 W/m est observée sur la figure III.10. Cette valeur est reste faible comparé cela à un conducteur conventionnel. Alors, les conducteurs supraconducteurs peuvent conduire des valeurs de courants alternatifs importants (6.10^3 A) avec faible pertes.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les courants induits et les pertes AC à champ propre dans un ruban supraconducteur à haute température critique. Une étude numérique sur le logiciel COMSOL a été réalisée.

L'étude, basée sur l'implémentation d'une formulation en H comme variable d'état, a permis de considérer la dépendance des matériaux supraconducteurs au champ magnétique appliqué pour diverses amplitudes d'inductions magnétiques. De plus, une étude des pertes AC due à une valeur élevée du courant de transport alternatif a été considérée. Nous avons constaté que les matériaux supraconducteurs, avec faible pertes, sont avantageux par rapport aux conducteurs conventionnels.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement des matériaux supraconducteurs à hautes température critiques soumis à des champs magnétiques externes ou propres, respectivement, comme dans le cas des dispositifs électromagnétiques supraconducteurs et les systèmes de transport d'énergies électriques importantes.

D'abord pour qu'un matériau soit supraconducteur il faut que les trois paramètres ; température T , densité de courant J et champ magnétique H soient inférieurs à ses paramètres critiques T_c , J_c et H_c . Les supraconducteurs n'ont pas le même comportement en présence d'un champ magnétique, on distingue les supraconducteurs de type I et les supraconducteurs type II.

A la première partie de notre travail (chapitre I et II), nous avons commencé par rappeler l'histoire de la supraconductivité en particulier les propriétés spécifiques des matériaux supraconducteurs à basse et à haute température critiques. Ensuite nous avons présenté les formes industrielles des matériaux supraconducteurs et leurs domaines d'application en électrotechnique. Des modèles macroscopiques des supraconducteurs tels que le modèle de Bean et le modèle en puissance ont été aussi détaillés. A la fin de cette partie nous avons parlé sur les pertes (DC et AC) dans les matériaux supraconducteurs.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié les densités de courants dans un matériau SHTc. Une formulation en H a été adoptée pour notre simulation dont le modèle en puissance a été utilisé comme loi du comportement du supraconducteur. Comme première étape nous avons simulé les courants induits et le champ de pénétration dans un ruban SHTc soumis à un champ magnétique externe appliqué. Nous avons également montré le comportement d'une bobine, réalisée à l'aide d'un ruban supraconducteur, exposée au champ magnétique externe. Au niveau de la deuxième étape une étude des pertes AC, due au passage d'un courant électrique alternatif dans le ruban SHTc, a été présentée.

Pour l'étude du comportement non linéaire de notre matériau supraconducteur, nous avons présenté une simulation numérique à l'aide du logiciel COMSOL. Des résultats de calcul des densités de courants induits dans la surface du ruban ont été présentés pour but de déterminer la manière de pénétration de champ magnétique dans le ruban ainsi que dans une bobine supraconductrice. Une simulation aussi avec différentes valeurs de la densité de

courant critique a été faite afin de déterminer la valeur de J_c la plus adaptée à notre matériau SHTc.

D'après notre étude, nous constatons que lorsqu'un matériau supraconducteur soumis à un champ magnétique appliqué, des courants induits se développent principalement sur le bord extérieur du ruban afin de s'opposer à ce champ extérieur (selon la loi de Lenz). Cette concentration de la densité de courants induits propage vers le centre du ruban une fois qu'on augmente la valeur du champ appliqué.

La connaissance de la valeur maximale du champ de pénétration ainsi que les pertes AC en champ propre nous a permis de déterminer les limites de fonctionnement de notre matériau. Nous avons montré avec la simulation des pertes AC que les rubans supraconducteurs présentent des pertes faible comparant au conducteur conventionnel.

En termes de perspectives, il reste à appliquer une méthode analytique ou semi-analytique pour le calcul des courants induits pour différents formes de matériaux supraconducteurs comme les pastilles (bulks) et les dépôts. De plus, l'utilisation de ces matériaux dans des dispositifs électromagnétiques tels que les machines électriques, les transformateurs et les limiteurs de courants.

Références

Bibliographiques

Bibliographie

- [1] **Kevin Berger.** " Etude des phénomènes couplés magnétothermiques dans les supraconducteurs à haute température " Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [2] **Renaud Moulin.** "Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs" Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2010.
- [3] **West-million Nicolas, Lemoine Julien et Solt Edouard.** "Les matériaux supraconducteurs ". Rapport d'Epistémologie, 2002.
- [4] **Gaël Malé.** "Étude d'une structure d'inducteur supraconducteur à modulation de champ magnétique". Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 2012.
- [5] **Iszabela Klutsch.** " Modélisation des supraconducteurs et mesures " Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [6] **Julien Leclerc.** " Méthodes et outils de caractérisation électrique et magnétique des supraconducteurs ".Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 2013.
- [7] **Joseph Duron.** " Modélisation de matériaux supraconducteurs - application à un limiteur de courant " Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [8] **Louis Dupont.** "Développement d'un dispositif de champ magnétique réversible à base des Cryo-aimants supraconducteurs". Thèse de doctorat de, Normandie Université, 2018.
- [9] **Source:**<http://www.supraconductivite.fr/fr/index.php?p=supra-levitation-meissner>.
- [10] **Khaled Ben Alia.** "Etude de la Lévitiation Magnétique entre les Aimants Permanents et les Supraconducteurs" Thèse de Magister de l'Université de Biskra, 2009.
- [11] **Khaled Ben Alia.** "Etude des systèmes de guidage magnétique abbaside supraconducteur HTc" Thèse de doctorat de l'Université Mohamed Khider de Biskra ,2003
- [12] **Source :**<http://www.neel.cnrs.fr>.

- [13] **Source:** <https://www.researchgate.net/figure/Echantillon-du-ruban-supraconducteur-BSCCO2212-et-image-de-la-bobine-s>.
- [14] **Bashar Gony.** " Aimantation de pastilles supraconductrices ". Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 2015.
- [15]**Source:**http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_wire#/media/File:V3GaTape1.jpg.
- [16] **Source:** https://french.alibaba.com/promotion/promotion_superconducting-wire-promotion-list.html
- [17] **Kamenintichi Abelin.** " Etude par des méthodes analytiques et numériques de la répartition des champs induits dans les supraconducteurs à haute température critique " Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2009.
- [18] **Djellouli Tawfiq et Berkane Tawfiq.** " Etude et réalisation d'un circuit magnétique en présence d'une pastille supraconductrice". Mémoire de master de l'Université Djilali Bounaama Khmis Miliana, 2018.
- [19] **Meghatria Sofiane et Ouzougrou Abderrahmane.** " Conception et réalisation d'un induit triphasé d'une machine axiale supraconductrice. " Mémoire de master de l'Université de Djilali Bounaama, 2015.
- [20] **Pascal Tixador et Yves Brunet.** " Supraconducteurs - Applications de puissance à haute température critique " Article dans le Technique de l'ingénieur, D2705, 2008.
- [21] **Yannick Cointe.** " Limiteur supraconducteur de courant continu " Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [22] **El hadj Ailam.** " Machine synchrone à plots supraconducteurs : Etude et réalisation" Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [23]**Source :**<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche.pedagogique/supraconductivite>.
- [24] **Joseph Duron.** " Modélisation de matériaux supraconducteurs – application à un limiteur de courant" Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.

- [25] **Belkhiri Salah.** "Modélisation des matériaux supraconducteurs application à la limitation de courant de défaut dans un réseau électrique à neuf (09) jeux de barres" Mémoire de master de l'Université Mohamed Boudiaf- M'sila.
- [26] **Yannick Cointe.** " Limiteur supraconducteur de courant continu" Thèse de Doctorat de L'institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [27] **C.P. Bean.** "Magnetization of high-field superconductors" Reviews of modern physics, 31:39, January 1964.
- [28] **Iszabela Klutsch.** " Modélisation des supraconducteurs et mesures" Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [29] **Bouckekhhou Hocine.** " Etude d'un machine synchrone à base d'élément supraconducteur "Thèse de Doctorat de l'Université de Jijel, 2019.
- [30] **Yannick Cointe.** " Limiteur supraconducteur de courant continu " Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [31] **K. Berger, B. Douine, J. Leveque, D. Netter, A. Rezzoug, T. Satramatekul et F. Bouillault.** " Etude des pertes dans un tube supraconducteur HTC : comparaison de méthode de calculs "Electrotechnique du futur, GIF-Yvette : France, 2003.
- [32] **Emmanuel Vinot.** "Modélisation des supraconducteurs HTC Applications au calcul des pertes AC "Thèse de Doctorat de Institut National Polytechnique De Grenoble, 2000.
- [33] **Bastien Dolisy,** "Étude d'un moteur supraconducteur à flux axial avec une transmission magnétique supraconductrice intégrée ", Thèse doctorat de l'université de Lorraine, 2015.
- [34] **Rada Alhasan** " Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur". Thèse doctorat de l'université de Lorraine, 2015.
- [35] **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.

- [36] **J. C Grivel** et **R. Flukiger** “Visualization of the formation of the $(\text{Bi, Pb})_{(2)}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ + delta phase”, *Superconductor Science and Technology*, Vol. 9, p. 555, 1996.
- [37] **F. Grilli, R. Brambilla, F. Sirois, A. Stenvall** et **S. Memiaghe**, « Development of a three dimensional finite-element model for high-temperature superconductors based on the H formulation », *Cryogenics*, no. 0.
- [38] **Z. Hong, A. M. Campbell** et **T. A. Coombs**, « Numerical solution of critical state in superconductivity by finite element software », *Superconductor Science and Technology*, vol. 19, no. 12, p. 1246-1252, déc. 2006.
- [39] **S. Stravrev**. “Modelling of high temperature superconductors for AC power applications”. Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2002.