

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° :...../2022

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Electrotechnique**

**SPECIALITE: Electrotechnique Industrielle**

### **Thème**

## **Etude de la distribution du champ magnétique à la présence des écrans supraconducteurs.**

**Présenté Par : MERABET Abdessalam**

**Encadré Par : Hocine BOUCHEKHOU**

**CHETIBI Yazid**

**Date de soutenance: 13/07/2022**

### **Jury de Soutenance**

**Président : IKHLEF Nabil**

**Grade :Professeur**

**UnivMSB jijel**

**Encadreur : BOUCHEKHOU Hocine**

**Grade :MCA**

**Univ MSB jijel**

**Examineur: HAMANE Ahmed**

**Grade :MAA**

**Univ MSB jijel**

**Promotion :2021 /2022**

# Remerciements

*Remerciements et louanges à Dieu, de m' avoir donné la foi et la force pour accomplir ce modeste travail. Prière et salut sur notre prophète Mohammed et sur sa famille et ses compagnons.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr. Hocine Bouchekhou pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et n'ont jamais oublié dans leurs prières.*

*Finalement, nous tenons à remercier chaleureusement, tous nos proches et tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté leurs sollicitudes pour accomplir ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À mon père*

*À ma mère*

*À nos frères et sœurs*

*À tous nos proches sans exception*

*À tous nos amis sans exception*

*À mes amis Boussbit Aymene et Troudi*

*Seif Eddine*

*À toutes les personnes qui ont contribué*

*à la Couronnement et à la réussite de ce travail*

*Merabet Abdessalam*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À mon père*

*À ma mère*

*À nos frères et sœurs*

*À tous nos proches sans exception*

*À tous nos amis sans exception*

*À toutes les personnes qui ont contribué*

*à la Couronnement et à la réussite de ce travail*

*Chetibi Yazid*



# *Sommaire*

## *Sommaire*

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### *Chapitre I : Généralités sur les matériaux supraconducteurs*

I.1 Introduction .....	3
I.2 Histoire et découverte des supraconducteurs .....	3
I.3 Les propriétés des supraconducteurs .....	7
I.3.2 Champ magnétique critique.....	8
I.3.3 Température critique/Température de transition .....	8
I.3.4 Densité du courant critique $J_c$ .....	9
I.3.5 Diamagnétisme Parfait (Effet Meissner) .....	9
I.3.6 Surface critique.....	10
I.4 Types des supraconducteurs .....	11
I.4.1 Supraconducteurs de type I.....	11
I.4.2 Supraconducteurs de type II .....	12
I.4.3 Les familles de supraconducteurs .....	13
I.5 Les formes industrielles des matériaux supraconducteurs .....	14
I.5.1 Les supraconducteurs sous forme massive .....	14
I.5.2 Les supraconducteurs sous forme de fil .....	15
I.6 Les modèles des supraconducteurs .....	16
I.6.2 Modèle de la loi en puissance $E - J$ .....	17
I.6.3 Le modèle de Kim .....	17
I.6.4 Modèle de loi exponentiel .....	18
I.7 Méthodes d'aimantation .....	18
I.7.1 Le refroidissement sous champ ou « Field Cooling » (FC).....	18
I.7.2 Le refroidissement sous champ (ZFC) .....	19
I.7.3 Aimantation par champ impulsionnel ou « Pulse Field Magnétisation » (PFM).....	20
I.8 Mécanisme « d'écrantage » .....	21
I.9 Conclusion.....	22

### *Chapitre II : Domaines d'applications des matériaux supraconducteurs*

II.1 Introduction .....	23
II.2 Application des supraconducteurs .....	23
II.2.2 Trains à lévitation magnétique .....	23

II.2.3	Stockage de l'électricité (SMES) .....	24
II.2.4	Moteurs et Générateurs supraconducteurs .....	25
II.2.4.1	Les moteurs supraconducteurs.....	25
II.2.4.2	Les générateurs supraconducteurs .....	26
II.2.5	Limiteur de courant de défaut (FCL).....	26
II.2.6	Les premiers câbles électriques supraconducteurs .....	27
II.3	Les application des écrans SHTc dans les machines électriques.....	29
II.3.1	Machines à barrières de flux.....	29
II.3.2	Machine à modulation de flux .....	30
II.3.3	Machine synchrone à flux axial.....	31
II.3.4	Moteur synchrone à réluctance .....	31
II.4.1	Moteur synchrone à concentration du flux .....	34
II.4.2	Moteur synchrone à pan coupé.....	35
II.5	Conclusion .....	36

### ***Chapitre III :***

#### ***Etude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc***

III.1	Introduction .....	37
III.2	Objectif du travail.....	37
III.3	Présentation du modèle d'étude.....	38
III.3.1	Choix de type de la pastille SHTc .....	39
III.3.2	Paramètres de la structure étudiée .....	40
III.3.3	Choix du modèle de la pastille SHTc .....	41
III.3.4	Méthode de calcul adoptée .....	42
III.4	Etapas de simulation.....	42
III.5	Résultats de simulation.....	43
III.5.2	Simulation avec pastille entre les bobines.....	46
III.5.3	Simulation avec pastille inclinée .....	50
III.5.4	Simulation avec quatre pastilles inclinées .....	52
III.6	Conclusion.....	56
	Conclusion générale .....	57
	Références Bibliographiques	



*Listes des figures*



## Listes des figures

<b>Figure I.1:</b> Liquéfaction de l'hélium par Heike <i>Kamerlingh Onnes</i> et son élève .....	4
<b>Figure I.2 :</b> Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année ...	7
<b>Figure I.3 :</b> Résistivité du mercure en fonction de la température.....	7
<b>Figure I.4 :</b> Variation du champ magnétique critique avec la Température.....	8
<b>Figure I.5 :</b> Résistivités d'un supraconducteur et d'un métal normal en fonction de la température. ....	8
<b>Figure I.6 :</b> Etat de matériau supraconducteur selon la densité du courant critique $J_c$ .....	9
<b>Figure I.7 :</b> Effet Meissner d'un supraconducteur .....	10
<b>Figure I.8 :</b> Surfaces critiques.....	11
<b>Figure I.9:</b> Diagramme de phase d'un supraconducteur du type I.....	12
<b>Figure I.10 :</b> supraconducteur de type II.....	12
<b>Figure I.11 :</b> Exemple de matériaux supraconducteurs massifs de composition <i>YBCO</i> commercialisés par l'entreprise <i>EVICO</i> .....	13
<b>Figure I.12:</b> Exemples de supraconducteurs filamenteux.....	15
<b>Figure I.13 :</b> Modèle de Bean.....	16
<b>Figure I.14 :</b> Etapes d'aimantation par Field Cooling d'un supraconducteur .....	19
<b>Figure I.15 :</b> Exemple d'aimantation par ZFC. Le champ magnétique est appliqué après avoir atteint la température du supraconducteur $T_c$ .....	20
<b>Figure I.16:</b> Exemple d'aimantation par PFM. Le champ magnétique est appliqué après avoir atteint la température critique du supraconducteur $T_c$ , avec une durée n'excédant pas plusieurs millisecondes ..	21
<b>Figure I.17 :</b> Expulsion du champ par une pastille .....	21
<b>Figure II.1 :</b> supraconducteurs en imagerie par résonance magnétique .....	23
<b>Figure II.2 :</b> Le train à sustentation magnétique japonais JR-Maglev en 2005.....	24
<b>Figure II.3 :</b> Bobine supraconductrice pour stockage d'énergie. ....	25
<b>Figure II.4 :</b> Moteur supraconducteur fabriqué par Sumitomo .....	26
<b>Figure II.5:</b> Limiteurs de courants supraconducteurs .....	27
<b>Figure II.6 :</b> Câble supraconducteur .....	28
<b>Figure II.7 :</b> Effet d'écran obtenu avec une pastille supraconductrice refroidie hors champ.....	29

<b>Figure II.8 :</b> Illustration d'une machine à modulation de flux .....	30
<b>Figure II.9 :</b> Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5 kW par IHI .....	31
<b>Figure II.10 :</b> Rotors supraconducteurs « Zèbre » (a) et (b), « Pilz » (c) et « Zelz » (d), moteur à réluctance .....	32
<b>Figure II.11 :</b> Moteur à réluctance 150kW 3000tr/min.....	33
<b>Figure II.12 :</b> Pompe immergée pour le transport d'hydrogène liquide .....	33
<b>Figure II.13 :</b> Moteur synchrone à concentration du flux, gauche : principe de l'inducteur, droite : le moteur sur le banc de test .....	35
<b>Figure II.14</b> Principe de moteur à pan coupé.....	35
<b>Figure III.1 :</b> Schéma de principe de fonctionnement de moteur synchrone .....	38
<b>Figure III.2 :</b> Schéma de Principe de modèle étudié : (a) Schéma de deux solénoïdes alimentés en opposition ; $H_b$ : champ magnétique axial crée par chaque bobine, $I_a$ : courant appliqué dans les solénoïdes, $Air$ : la zone d'emplacement des écrans SHTc. (b) Forme de lapastille supraconductrice utilisée (écran magnétique).....	39
<b>Figure III.3 :</b> Forme réelle d'une pastille supraconductrice en YBCO (50mmx30mm).....	40
<b>Figure III.4 :</b> Paramètres de dispositif étudié.....	40
<b>Figure III.5 :</b> Schéma des bobines et maillage du domine d'étude en 3D.....	43
<b>Figure III.6 :</b> Chemin pour la représentation de l'induction magnétique entre les deux solénoïdes ; grille 1 : dans le plan XY, grille 2 : dans le plan YZ.....	44
<b>Figure III.7 :</b> Représentation de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes, sur lagrille 1 ; « a » : en 3D et « b » : en 2D dont V_GRID_2D_1 représente l'axe Y. ....	45
<b>Figure III.8 :</b> Représentation de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes, sur lagrille 2 ; « a » : en 3D et « b » : en 2D dont V_GRID_2D_2 représente l'axe Z.....	46
<b>Figure III.9 :</b> Représentation 3D du domaine d'étude (solénoïdes & pastille SHTc).....	47
<b>Figure III.10 :</b> Représentation 3D du maillage au niveau de la pastille SHTc. ....	47
<b>Figure III.11 :</b> Représentation 3D des valeurs de l'induction magnétique dans la pastilleSHTc. ....	48
<b>Figure III.12 :</b> Représentation de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à laprésence de la pastille SHTC. Sur la grille 1 ; « a » : en 3D et « b » : en 2D dont V_GRID_2D_1 représente l'axe Y. Sur la grille 2 ; « c » : en 3D.....	49
<b>Figure III.13 :</b> Schéma 3D du domaine d'étude (à gauche) et maillage de la pastille inclinée(à droite).....	50

**Figure III.14** : représentation de la distribution de champ dans la pastille inclinée ..... 50

**Figure III.15** : Représentation tridimensionnelle de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de la pastille SHTC sous forme inclinée ; « **a** » : Sur la grille **1** et ..... 51

**Figure III.16** : Schéma 3D du domaine d'étude ; « **a** » : 4 pastilles entre les solénoïdes, ..... 52

**Figure III.17** : Représentation de la distribution de champ dans les quatre pastilles SHTc ..... 52

**Figure III.18** : Représentation 3D de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de quatre pastilles SHTC; « **a** » : Sur la grille **1**, « **b** » : Sur la grille **2**. ..... 53

**Figure III.19** : Représentation de la distribution de B dans les quatre pastilles SHTC avec un courant de ; « **a** » : 100 A, « **b** » : 125 A et « **c** » : 150 A..... 54

**Figure III.20** : Représentation 3D de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de quatre pastilles SHTC sur la grille 2 pour un courant de ; « **a** » : 100 A, « **b** » : 125 A « **b** » : 150 A..... 55

# *Introduction générale*

### Introduction Générale

La plupart des matériaux électriques que l'homme utilise dans les champs électriques sont des conducteurs électriques tels que l'aluminium, le cuivre, etc., ou des isolants électriques à haute résistance électrique. Quant aux conducteurs, ce sont les moins résistants.

Les scientifiques et les ingénieurs ont travaillé depuis l'antiquité pour provoquer une grande révolution électrique qui change l'industrie moderne dans le domaine de l'électricité en trouvant des conducteurs avec moins de résistance électrique, appelés conducteurs supraconducteurs, qui se caractérisent par une résistivité nulle ou presque inexistante. Ces matériaux peuvent donc conduire le courant électrique sans aucune perte (cas de courant continu) et avec des pertes très faibles (cas de courant alternatif) comparant avec des conducteur conventionnel. Ils ont aussi la capacité de piéger et d'exclure des densités de champs importants (effet Meisner).

L'histoire de la supraconductivité a commencé avec la découverte par le physicien néerlandais *Heike Kamerlingh Onnes* de la supraconductivité dans le mercure en 1911 [1]. Depuis lors, de nombreux autres matériaux supraconducteurs ont été découverts et la théorie de la supraconductivité a été développée.

L'année 1986 a marqué un tournant majeur dans la recherche sur les supraconducteurs. Bednorz et Müller ont découvert un oxyde à base de Baryum, de Lanthane, de Cuivre et d'Oxygène (BaLaCuO) supraconducteur à une température de 34 K, c'est-à-dire une température critique beaucoup plus élevée que la  $T_c$  des supraconducteurs précédents. Ces dernier matériaux sont appelés supraconducteurs à haute température critique (SHTC).

Les matériaux SHTC ont des applications industrielles dans plusieurs domaines, tels que le domaine médical, la fusion nucléaire, le stockage d'énergie électrique ou les transports (trains à lévitation magnétique) et les machines électriques. En génie électrique, le supraconducteur est donc le matériau a priori idéal pour l'électrotechnicien puisqu'il transporte des densités de courant élevées sans être dissipatif. Cet état non dissipatif est cependant limité par trois grandeurs : la température critique ( $T_c$ ), la densité de courant critique ( $J_c$ ) et le champ critique ( $H_c$ ). Ces trois grandeurs forment une surface, dite critique, dans l'espace. Cette surface est affranchie quand l'environnement électromagnétique du matériau ne reste pas constant, comme l'augmentation de la densité de courant et du champ magnétique appliqué.

Ce travail consiste à étudié le comportement d'une pastille SHTC, qui caractérise par sa capacité d'écrantage du champ, en présence d'un champ magnétique externe appliqué. On

## **Introduction Générale**

---

s'intéresse, en particulier, à la distribution du champ magnétique au volume et à l'entourage de la pastille. Pour cela, le présent mémoire est structuré comme suit:

Le premier chapitre est consacré aux aspects phénoménologiques de la supraconductivité, nous présentons les principales définitions concernant le phénomène ainsi que les théories phénoménologiques qui ont tenté de donner une explication du phénomène à l'échelle macroscopique (modèles mathématiques). On a cité les principales familles supraconductrices avec leurs caractéristiques ainsi que des brèves introductions à leurs techniques de mise au point. Dans ce chapitre on a détaillé aussi le mécanisme d'écrantage et de piégeage de champ magnétique par les supraconducteurs massifs à haute température critique.

Le deuxième chapitre est consacré aux diverses applications de la supraconductivité, notamment dans les domaines liés à l'électrotechnique, tel que le transport de l'énergie, le système de la lévitation magnétique, les machines électriques...etc. D'autres domaines d'applications ont été aussi abordés tel que le domaine médical imagerie par résonance magnétique (IRM), et le domaine énergétique. On a donné aussi une récapitulation sur la prise en compte des écrans SHTC dans la conception des machines électrique notamment de nouvelle topologie.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la distribution de champ magnétique autour d'une pastille (écran) SHTC, utilisant la loi en puissance comme loi de comportement du matériau. Notre simulation tridimensionnelle est faite à l'aide du logiciel numérique FLUX3D.

Une conclusion générale clôture le présent manuscrit commentant les différents chapitres et relatant les perspectives de continuation de ce travail.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les matériaux*  
*supraconducteurs*

## I.1 Introduction

La supraconductivité est un phénomène caractérisé par l'absence de résistance électrique et l'annulation du champ magnétique au sein de certains matériaux dit supraconducteurs. Ces derniers peuvent conduire alors de l'électricité sans résistance à des températures particulièrement basses, proches de zéros absolu ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) [2]. Expérimentalement, la résistivité d'un supraconducteur est inférieure à  $10^{-25} \text{ W.m}$  par comparaison avec la résistivité du cuivre à **300 K** qui est de l'ordre de  $10^{-7} \text{ W.m}$  [3]. Une autre propriété fondamentale est le diamagnétisme parfait ou « *l'effet Meissner* » ; un supraconducteur expulse les lignes de flux magnétiques appliquées hors de son volume.

Le phénomène de supraconductivité n'apparaît qu'en dessous d'une certaine température appelée température critique  **$T_c$** , mais il existe aussi une limite de l'intensité du courant qui le parcourt et qui est appelé intensité critique  **$I_c$** . En plus, le supraconducteur doit être exposé à un champ magnétique externe inférieur à la valeur de son champ magnétique critique  **$H_c$** . Donc l'état supraconducteur est limité par ces trois paramètres critiques.

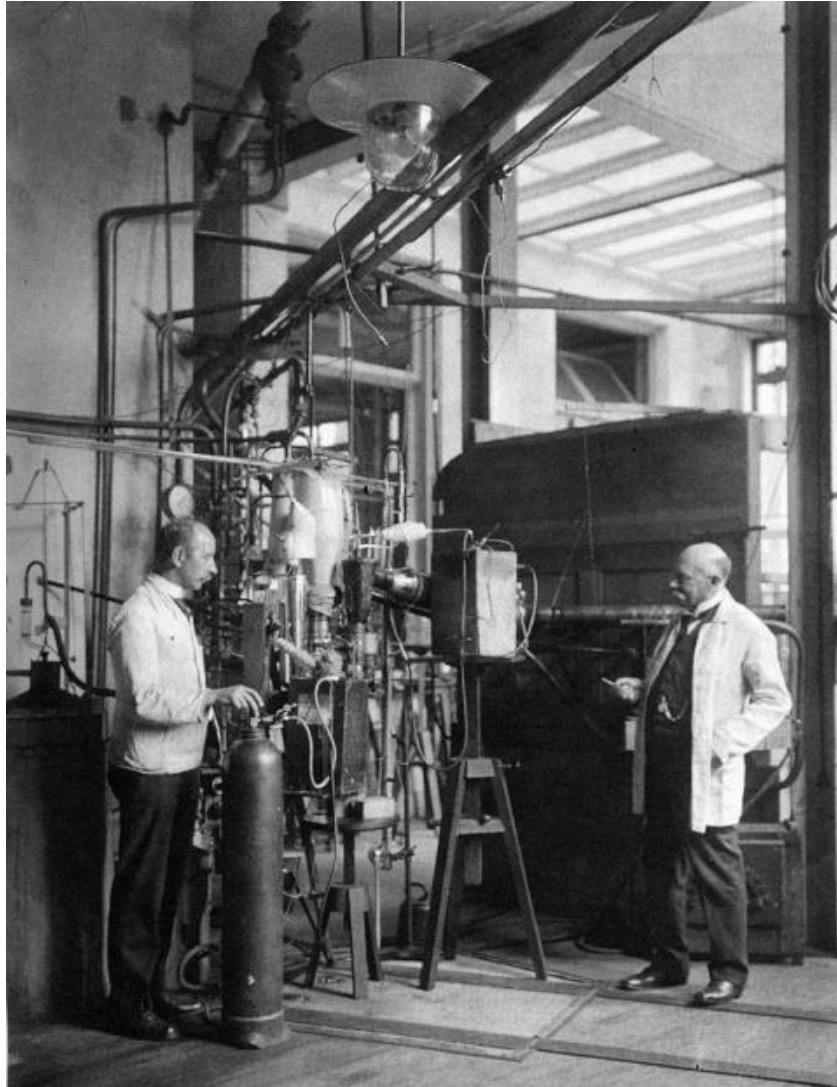
Les matériaux supraconducteurs sont employés dans de nombreux domaines tels que le transport, les machines et transformateurs, l'imagerie par résonance magnétique et la science médicale.

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'histoire et de la découverte de la supraconductivité. Nous présenterons en détaille les propriétés et les types de matériaux supraconducteurs ainsi que les modèles mathématiques décrivent le comportement de ces matériaux. Nous montrerons également dans cette partie les principales caractéristiques des supraconducteurs massifs ainsi que leurs formes industrielles existent.

## I.2 Histoire et découverte des supraconducteurs

- En **1911**, deux ans après avoir réussi la liquéfaction de l'Hélium - atteignant alors la plus basse température connue : **4,2 Kelvin (K)**, c'est-à-dire  **$-269^{\circ}\text{C}$**  - le physicien *Heike Kamerlingh Onnes* proposa à son élève *Gilles Holst* de mesurer la résistivité d'un barreau de mercure. Ils découvrirent que celle-ci s'annulait en dessous de **4,15 K**. *Holst* fit et refit les expériences, vérifia les instruments de mesure mais le doute n'était plus permis : le comportement se confirmait.





**Figure I.1:** Liquéfaction de l'hélium par Heike *Kamerlingh Onnes* et son élève

- L'année suivante (**1912**), *Onnes* découvrit que l'étain et le plomb (qui est un très mauvais conducteur à température ambiante), perdaient leur résistance respectivement à **3,7 K** et **6 K**. L'absence de résistivité du matériau, c'est-à-dire que celle-ci ne soit ni faible ni très faible mais totalement absente, est le premier phénomène spectaculaire de la supraconductivité.
- En **1933**, *W. Meissner* et *R. Oschenfeld* découvrirent la propriété d'un barreau de métal pur à être imperméable aux champs magnétiques : le diamagnétisme parfait, que l'on appelle depuis *effet Meissner*. Ce diamagnétisme, qui est le second effet surprenant de la supraconductivité, se traduit par la capacité d'un supraconducteur à émettre un champ magnétique opposé à un autre champ qui lui serait appliqué, et ce, quelle que soit la polarité du champ appliqué.

Sans aucune théorie sur laquelle s'appuyer, les chercheurs durent se contenter d'expérimenter, presque au hasard, différents alliages à base de titane, de strontium, de germanium et surtout de niobium, qui donnait les meilleurs résultats.

➤ Mais en **1957**, apparut la théorie *B.C.S*, du nom de ses découvreurs *John Bardeen*, *Leon Cooper* et *John Schiffer*, qui décrivait en partie le principe fondamental de la supraconductivité. Cette théorie stipule qu'à basse température, les électrons se déplacent par paires, appelées paires de Cooper, sous la forme de phonons. C'est grâce à cette théorie de base que les chercheurs ont pu progresser dans leur recherche de matériaux supraconducteurs à « haute température ». Les alliages contenant du Niobium se révélant les plus efficaces, on l'utilisa donc dans la majorité des composés supraconducteurs. Malheureusement, tous les alliages testés ne dépassaient pas une température supérieure à **23 K** et la théorie *B.C.S* semblait avoir trouvé ses limites.

Parallèlement à ces recherches, *Brian Josephson* prédit en **1962** les effets quantiques qui portent son nom et sont utilisés en détection ultrasensible des champs magnétiques. La découverte de *Josephson*, qui laissa pantois tous les chercheurs, explique qu'un courant électrique non nul pouvait circuler d'un bloc supraconducteur à un autre bloc supraconducteur séparé du premier par une mince couche isolante, en l'absence même de différence de potentiel entre les deux blocs. Cette théorie fut vérifiée expérimentalement quelques années plus tard, ce qui valut à *Josephson* et *Giaver* de recevoir le prix Nobel en **1974**.

➤ C'est en **1986**, année charnière dans l'histoire des supraconducteurs, que la théorie *B.C.S* fut remise en cause, avec la découverte, par des ingénieurs *d'IBM Zurich* (Suisse), d'un supraconducteur à **34 K** puis, neuf mois plus tard, à **92 K**. Ainsi virent le jour de nouvelles générations de composés tels que *Ba-La-Cu-O*, *Y-Ba-Cu-O* et *Ti-Sr-Ca-Cu-O*, les deux derniers permettant de dépasser la température de l'azote liquide (**77 K**, soit **-196 °C**), coûtant dix fois moins cher que l'hélium liquide et refroidissant vingt fois mieux. Ainsi *Ti-Sr-Ca-Cu-O* atteignait une température critique de **125 K**, laissant loin derrière la barrière psychologique de liquéfaction l'azote liquide.

Cette découverte suscita l'engouement de toute la communauté scientifique, qui repartit dans la course aux supraconducteurs à « Haute Température Critique (*HTc*)», espérant alors découvrir un supraconducteur à température ambiante. Mais plus cette température augmentait et plus les performances des matériaux diminuaient, le courant pouvant être transporté sans déperditions devenant faible. Le record de température critique reproductible fut atteint en **1995** avec une température de **164 K** mais nécessitant de hautes pressions.

La course aux  $T_c$  s'essoufflant faute de compréhension au niveau atomique, les recherches se sont donc orientées vers la compréhension des phénomènes physiques régissant la supraconductivité. Cette nouvelle recherche conduit à des théories qu'il est actuellement difficile de confirmer ou infirmer. Toutefois, les scientifiques ne désespèrent pas de trouver des matériaux supraconducteurs à température ambiante.

1908	<b>Liquéfaction de l'hélium (4,2 K soit -269 °C) par Kamerlingh Onnes.</b>
1911	<i>Kamerlingh Onnes</i> découvre la supraconductivité en proposant à <i>G. Holst</i> de mesurer la résistivité du mercure à très basse température.
1913	Echec du premier aimant supraconducteur.
1933	Mise en évidence du diamagnétisme des supraconducteurs ( <i>Meissner et Ochsenfeld</i> ).
1954	Premier aimant supraconducteur (Nb) qui fonctionna (0,71 Tesla (T) à 4,2 K).
1957	Théorie microscopique BCS de la supraconductivité ( <i>Bardeen, Cooper et Schieffer</i> ). Théorie d'A. Abrikosov des supraconducteurs de type II (réseau de vortex).
1958	Mise au point de conducteurs de type II en NbTi et Nb 3 Sn.
1960	Découverte des fortes densités de courant sous induction élevée (Nb 3 Sn).
1962	<i>B. Josephson</i> prédit les effets quantiques qui portent son nom et qui sont utilisés en détection ultrasensible de champ magnétique (jonctions Josephson et SQUID).
1964	Première application significative des supraconducteurs : chambre à bulles d'Argon (2,5 T dans plusieurs m <sup>3</sup> ).
1965	Premiers cryoalternateurs.
1968	Définition du brin multi filamentaire par le <i>laboratoire Rutherford</i> .
1974	Mise en service de la plus puissante chambre à bulles au CERN (830 MJ).
1982	Première images IRM, elles assureront à la supraconductivité sa première application industrielle et commerciale.
1983	Mise au point des brins multi filamentaires alternatifs. Premier accélérateur supraconducteur.
1986	<i>Bednorz et MÜLLER</i> découvrent la supraconductivité dans de nouveaux oxydes.
1987	Envolée des températures critiques. Démarrage de TORE SUPRA, tokamak supraconducteur refroidi à 1,8 K et installé à Cadarache ( <i>France</i> ).
1995	Record reproductible à 164 K (-109 °C).

**Tableau I.1** : Résumé de l'histoire de la supraconductivité.

La supraconductivité est donc un phénomène dont la découverte et la compréhension s'étalent sur tout le XX<sup>ème</sup> siècle, permettant l'attribution de pas moins de quatre prix Nobel, ainsi que la découverte de nouveaux domaines d'utilisation liés aux nouveaux matériaux qui ont été créés. Nul doute que cette compréhension s'étendra encore sur les siècles à venir, mais voyons d'abord les principes de fonctionnement de la supraconductivité [4].

L'évolution de la température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de l'année de découverte est présentée en figure I.2 [5].

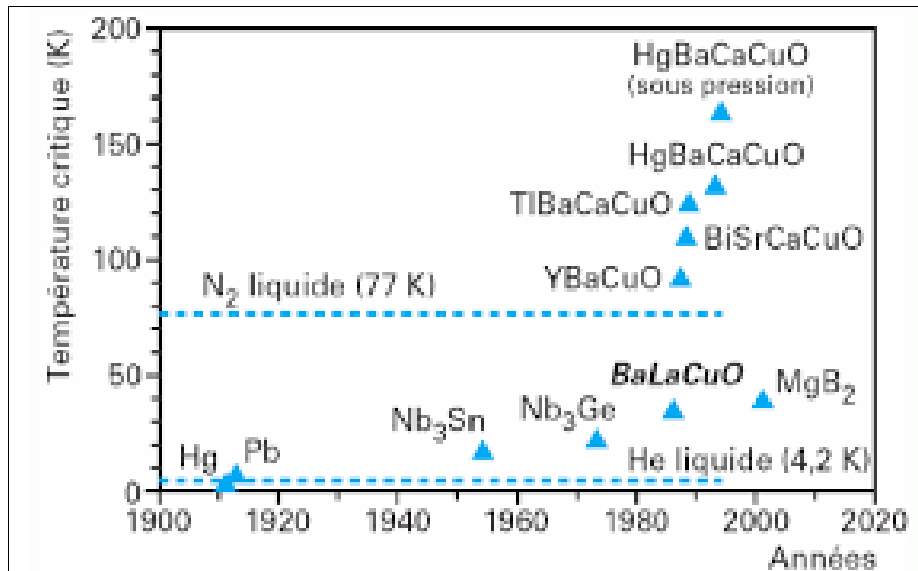


Figure I.2 : Température critique de certains matériaux supraconducteurs en fonction de leur année.

### I.3 Les propriétés des supraconducteurs

#### I.3.1 Résistivité nulle

La propriété fondamentale d'un matériau supraconducteur est sa résistivité nulle (figure I.3) en dessous d'une température bien déterminée appelé température critique noté  $T_c$ . La température ainsi défini sépare le comportement de l'état normal du matériau de celui de son état supraconducteur. Ceci indique que l'état supraconducteur est un nouvel état de la matière, autrement dit un état qui correspond à un arrangement particulier du système des électrons. On peut donc dire que le franchissement de la température critique correspond à une transition de phase [5].

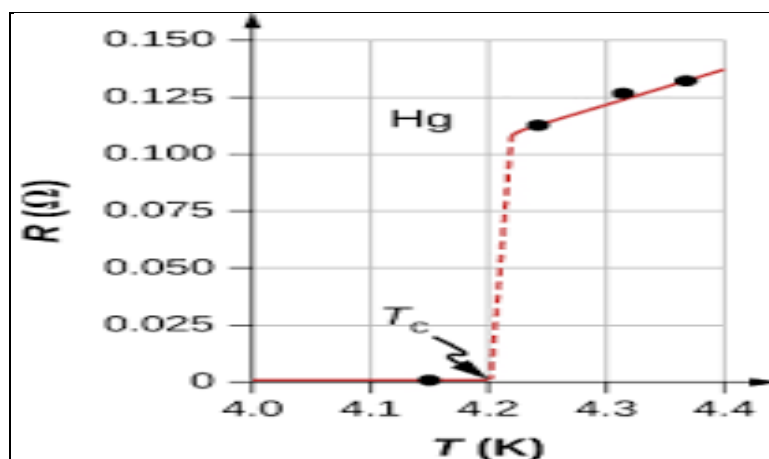


Figure I.3 : Résistivité du mercure en fonction de la température

### I.3.2 Champ magnétique critique

L'état / phase supraconducteur d'un matériau supraconducteur se rompt lorsque le champ magnétique (soit externe, soit produit par le courant supraconducteur lui-même) augmente au-delà d'une certaine valeur et l'échantillon commence à se comporter comme un conducteur ordinaire. Cette certaine valeur de champ magnétique au-delà de laquelle le supraconducteur revient à l'état ordinaire, est appelée champ magnétique critique. La valeur du champ magnétique critique dépend de la température. Lorsque la température (inférieure à la température critique) réduit la valeur de l'augmentation du champ magnétique critique. La variation du champ magnétique critique avec la température est illustrée dans la figure ci-dessous [6].

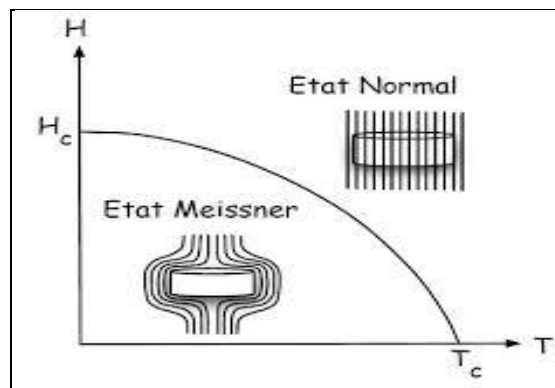


Figure I.4 : Variation du champ magnétique critique avec la Température.

### I.3.3 Température critique/Température de transition

La température critique d'un matériau supraconducteur est la température à laquelle le matériau passe de l'état conducteur normal à l'état supraconducteur. Cette transition de l'état conducteur normal (phase) à l'état supraconducteur (phase) est soudaine / nette et complète. La transition du mercure de l'état conducteur normal à l'état supraconducteur est illustrée dans la figure ci-dessous [6].

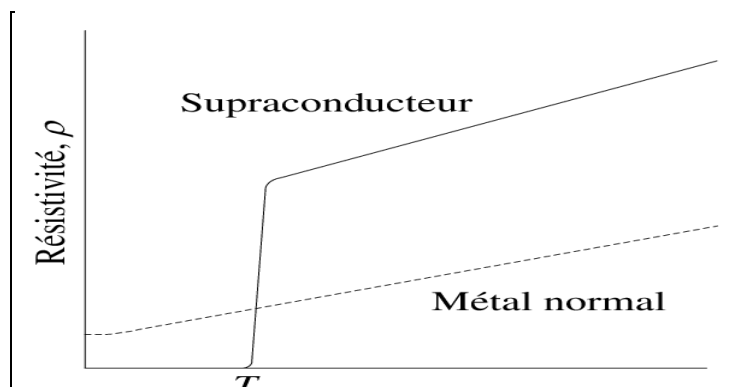


Figure I.5 : Résistivités d'un supraconducteur et d'un métal normal en fonction de la température.

### I.3.4 Densité du courant critique $J_c$

C'est la deuxième grandeur qui limite l'état supraconducteur. la densité de courant critique est la valeur maximale correspondante au delà de laquelle une résistivité apparaît. Des fils relativement fins réalisés de matériaux supraconducteurs peuvent être employés pour transporter de forts courants puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie thermique. Cependant, ces matériaux sont conçus pour transporter un certain courant maximum limite. au-dessus de ce courant critique ils cessent d'être supraconducteurs et passent à l'état normal même s'ils sont au-dessous de la température critique. Ce courant critique représenté par sa densité  $J$  est utilisé dans les limiteurs de courant supraconducteurs.

La densité de courant critique ( $J_c$ ) est une fonction non linéaire de la température et du champ magnétique. Plus le supraconducteur est refroidi, plus le courant à transporter sans transition est élevé. La figure I.6 représente la tension en fonction du courant circulant à travers un fil supraconducteur [7].

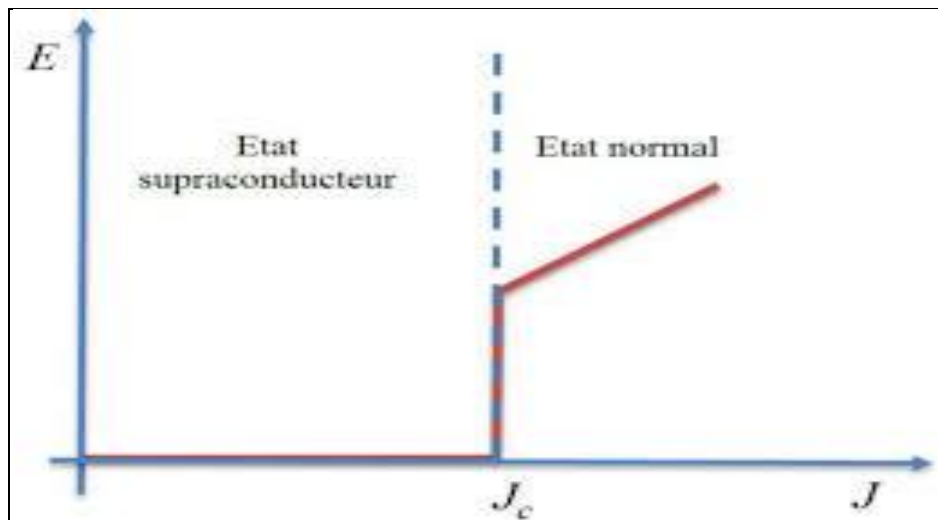


Figure I.6 : Etat de matériau supraconducteur selon la densité du courant critique  $J_c$

### I.3.5 Diamagnétisme Parfait (Effet Meissner)

La température critique  $T_c$ , définit clairement comment se comporte un supraconductrice depuis ses propriétés sont différentes au-dessous et au-dessus de la température. Ci-dessous  $T_c$ , l'expulsion des champs magnétiques est due à l'Effet Meissner, ce qui crée la condition diamagnétique parfaite. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué à un matériau supraconducteur en dessous de sa température critique, selon la loi de Lenz, le changement de flux induit un courant ainsi que le champ magnétique qui s'oppose aux champs d'origine. En l'absence de champ magnétique appliqué, le courant de surface circule sans résistance créant une magnétisation interne dans le supraconducteur, de sorte qu'aucun champ



magnétique ne peut pénétrer dans le matériau puisque la susceptibilité magnétique est égale à  $-1$ . La lévitation magnétique est l'une des observations permettant de démontrer l'effet Meissner dans les supraconducteurs. L'effet peut être désactivé en augmentant la température au-dessus de sa valeur critique ou en supprimant le champ magnétique, d'où la disparition du courant de surface et de l'amplification. L'absence de champs magnétiques internes ne dépend pas de l'ordre des champs appliqués, que ce soit après que le matériau devient un super-conducteur ou avant qu'elle ne soit refroidie à sa supraconducteur [8].

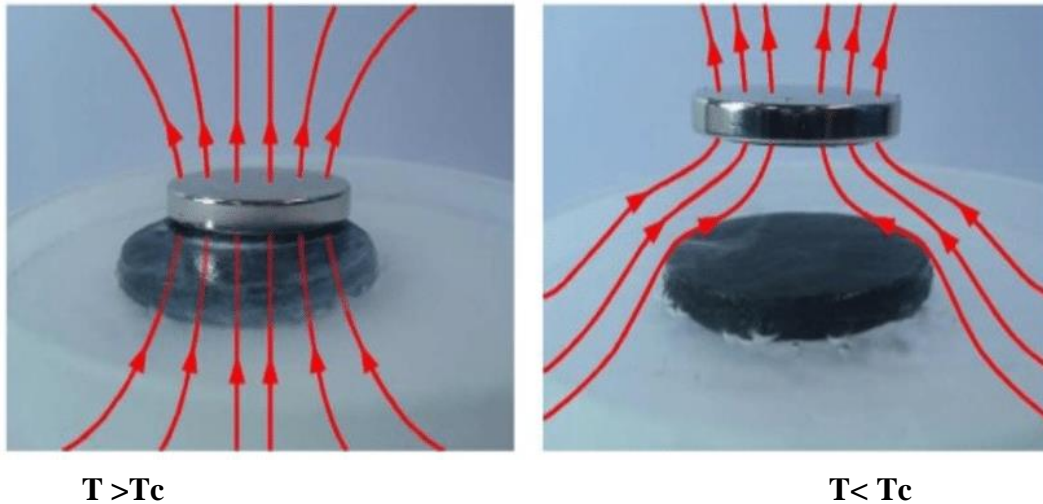


Figure I.7 : Effet Meissner d'un supraconducteur

Les deux situations ont expulsé le champ magnétique appliqué de l'intérieur du matériau. Les figures 1.7 quand  $T > T_c$  et  $T < T_c$  illustrent respectivement l'effet Meissner pour une température supérieure et inférieure à la température critique du matériau. Elle montre l'expulsion magnétique de l'intérieur du supraconducteur lorsque la température est refroidie en dessous de  $T_c$  [8].

### I.3.6 Surface critique

L'état supraconducteur est limité par trois grandeurs définissant une surface critique au-delà de laquelle le matériau transite vers un état dissipatif caractérisé par l'apparition d'un champ électrique. La température critique ( $T_c$ ) et le champ magnétique d'irréversibilité ( $H_c$ ) sont des grandeurs intrinsèques au matériau, tandis que la densité de courant critique ( $J_c$ ) dépend du procédé de fabrication (Figure I.8). Au-delà de  $T_c$  le supraconducteur se trouve dans un état normal caractérisé par une résistivité  $\rho$  [9].

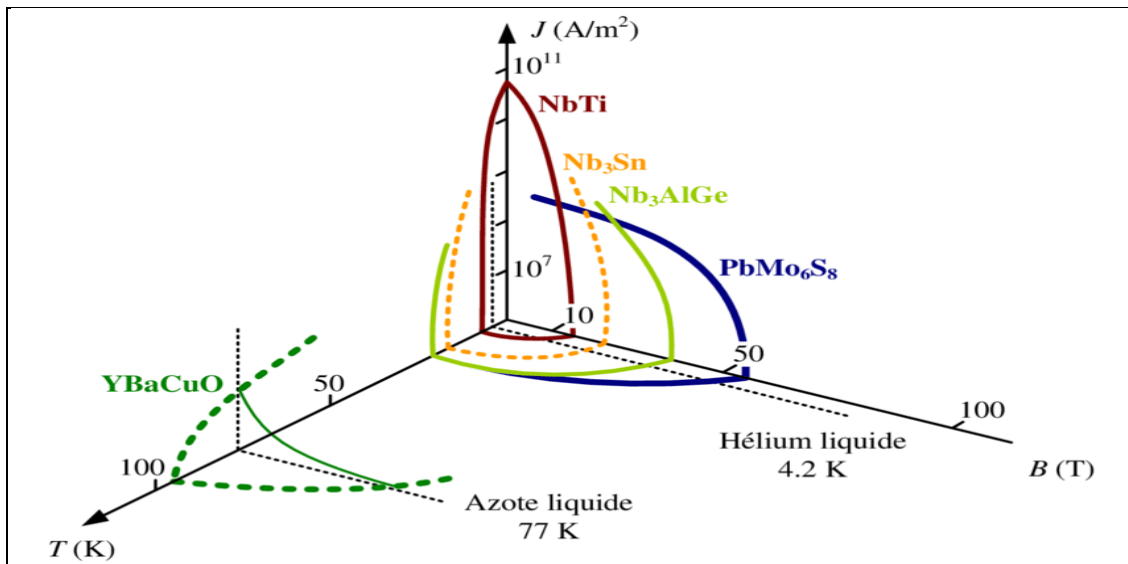


Figure I.8 : Surfaces critiques

### I.4 Types des supraconducteurs

Il 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 [10].

#### I.4.1 Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I ont été découvert en premier et requièrent une très basse température pour obtenir la supraconductivité. Ces types de matériaux sont caractérisés par une transition brutale vers un état de supraconductivité et un parfait diamagnétisme (capacité de repousser un champ magnétique).

Le tableau I.2 présente un ensemble de matériaux supraconducteurs de type I et leurs températures critiques de transition.

éléments	Température critique
Carbone (C)	15k
plomb(Pb)	7.2k
Lanthane (La)	4.9k
Mercure (Hg)	4.15k
Aluminium (Al)	1.175k
Zinc (Zn)	0.85k
Uranium (U)	0.20k
Rhodium (Rh)	0.000325K

Tableau I.2 : Liste de quelques matériaux supraconducteurs de type I [10]



Les supraconducteurs de type **I** sont caractérisés par un seul champ critique  $H_c$ . Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique extérieur  $H$  l'induction magnétique  $B$  est nulle à l'intérieur tant que  $H < H_c$  et l'aimantation  $M = -H$ . Par contre à la surface du matériau dans une épaisseur appelée longueur de London (de l'ordre de  $\lambda_L$ ), l'induction pénètre le matériau et des courants supraconducteurs d'écrantage se développent [10].

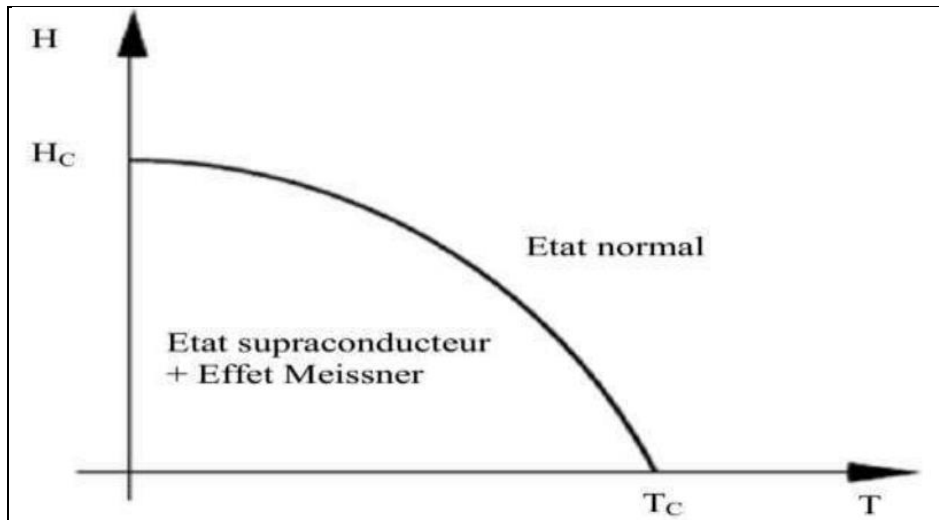


Figure I.9: Diagramme de phase d'un supraconducteur du type I [9].

#### I.4.2 Supraconducteurs de type II

Les supraconducteurs type **II** possèdent deux champs critiques, le deuxième nettement plus grand que le premier ( $H_{c2} \gg H_{c1}$ ), puisqu'il peut atteindre plusieurs dizaines de Tesla. En plus de cela la densité de courant critique peut atteindre des valeurs élevées. Ces deux caractéristiques favorisent l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de l'électrotechnique.

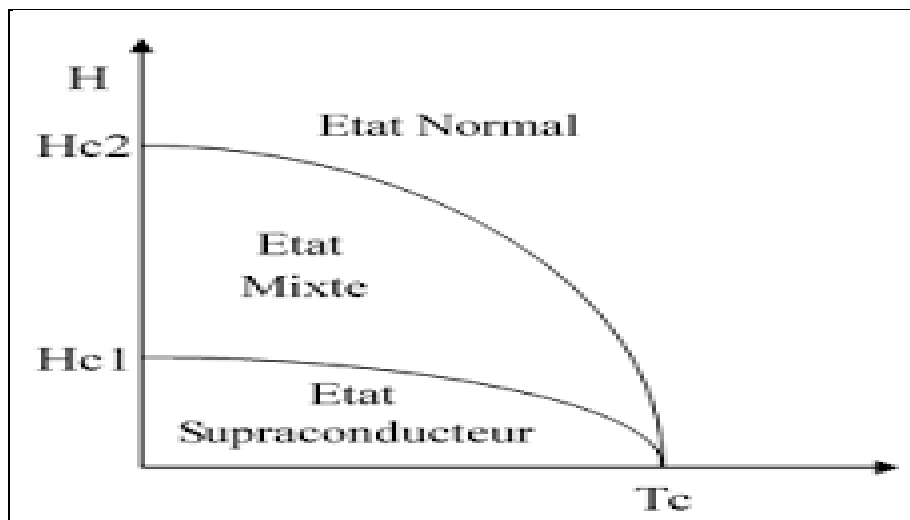


Figure I.10 : supraconducteur de type II

Le diagramme de phases d'un supraconducteur de type **II** est plus complexe que celui d'un supraconducteur de type **I**. Même si l'état Meissner existe aussi, il est séparé de l'état normal par une zone supplémentaire, souvent appelée état mixte.

On se trouve donc en présence de deux champs critiques différents, notés  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$ : Dans l'état mixte, le champ magnétique pénètre l'échantillon localement, sous la forme de "lignes de flux" isolées. Ces lignes sont entourées de courants circulaires locaux, d'où leur nom de vortex (par analogie avec les tourbillons que l'on trouve dans les fluides).

A l'intérieur de ces vortex, l'échantillon est dans l'état normal (c'est-à-dire non supraconducteur).

Ces petits "tubes" de champ magnétique ont la propriété de tous contenir exactement le même flux; les vortex ont une importance fondamentale dans le comportement des supraconducteurs de type **II**, aussi bien sur le plan des propriétés magnétiques qu'électriques [10].

### I.4.3 Les familles de supraconducteurs [11]

À la suite des diverses découvertes, une grande variété de supraconducteurs a vu le jour. Ainsi, pour permettre une bonne classification, ces supraconducteurs ont été regroupés par famille, en tenant compte de leur température critique et de leur forme (fil ou massive) :

- ***BTc*** (basse température critique)
- ***HTc*** (haute température critique)

La découverte des cuprates en **1985** a donné naissance à des matériaux supraconducteurs possédant des températures critiques supérieures à **77K**. À partir de cet instant, l'azote liquide permettait un refroidissement très simple et peu coûteux des supraconducteurs donnant ainsi la possibilité à de nombreux laboratoires non spécialistes de la cryogénie, de s'intéresser aux futurs domaines d'applications. De plus, cela a permis, à travers d'expériences simples mais impressionnantes, comme la lévitation d'un aimant sur une pastille supraconductrice de présenter le phénomène au grand public.

La différence est depuis faite entre les supraconducteurs ***HTc*** (Haute Température critique) et les supraconducteurs ***BTc*** (Basse Température critique). Les plus connus et les plus utilisés dans les applications sont :

- Pour les ***HTc***: le ***BSCCO*** à **110 K** et l'***YBCO*** à **93 K**.
- Pour les ***BTc***: le niobium étain à **10 K** (***NbTi***) et le niobium titane à **18,3 K** (***NbSn***)

Durant l'année **2000**, un composé appelé le *MgB2* intrigue le monde scientifique. Sa structure se rapproche des supraconducteurs *BTc* alors que sa température critique est de **39 K**. Ce matériau est prometteur par sa simplicité de fabrication qui permet aujourd'hui une production industriellement très bon marché. Malgré sa température critique inférieure à **77 K**, ce matériau est habituellement classé dans la catégorie des matériaux *HTc*.

Le Tableau I.3 présente les supraconducteurs *HTc* et *BTc* les plus répandus.

Catégorie	Matériau	Composition	Température critique (K)
<i>HTc</i>	BSCCO	Oxydes de bismuth, strontium, calcium et cuivre	110
	YBCO	Oxydes d'yttrium, baryum et cuivre	93
	MgB2	Diborure de magnésium	36
<i>BTc</i>	NbSn	Niobium et étain	18.3
	NbTi	Niobium et titane	10

**Tableau 1.3 :** Classification des supraconducteurs *HTc* et *BTc* les plus utilisés [7]

### I.5 Les formes industrielles des matériaux supraconducteurs [11]

Dans les applications « forts champs magnétiques », on peut rencontrer des matériaux supraconducteurs *HTc* de deux aspects différents en fonction de leur utilisation.

#### I.5.1 Les supraconducteurs sous forme massive

Sont utilisés pour leur faculté de piégeage ou d'écrantage du champ magnétique. Ils peuvent être de forme cylindrique, cubique ou de tube. La Figure I.11 est une photographie de supraconducteurs massifs en *YBCO* commercialisé par l'entreprise *EVICO*.

Les pastilles commercialisées par cette entreprise peuvent avoir un diamètre allant jusqu'à 10 cm.

Ces supraconducteurs massifs peuvent être utilisés pour deux raisons :

- Le piégeage de champ magnétique dans un matériau supraconducteur est une alternative aux aimants permanents. Ce champ magnétique est piégé par l'intermédiaire de courants induits résultants de la variation d'un champ magnétique appliqué sur le supraconducteur. Le record à ce jour est détenu par des *Japonais* en **2003** avec une induction de **17 T**, au milieu d'une pastille d'*YBCO* de 2 cm de diamètre, refroidie à **29 K**.
- L'écrantage de champ magnétique est basé également sur l'apparition de courant induit dans le matériau. Ces courants vont s'opposer au champ magnétique appliqué

sur la pastille. On observe alors un comportement diamagnétique du matériau. Cette faculté est utilisée pour la réalisation de barrières magnétiques ou pour guider le flux magnétique (concentration de flux).

A ce jour, les meilleures performances en matière de piégeage et d'écrantage sont relevées sur des supraconducteurs massifs de composition *YBCO* [8].



**Figure I.11 :** Exemple de matériaux supraconducteurs massifs de composition *YBCO* commercialisés par l'entreprise *EVICO* [10].

### I.5.2 Les supraconducteurs sous forme de fil [11].

Les supraconducteurs sous forme de fil sont destinés à remplacer les âmes conductrices conventionnelles comme le cuivre ou l'aluminium. Ils peuvent être utilisés sous forme bobinée pour la fabrication d'électro aimants ou sous forme de câble pour des applications de transport d'énergie. Pour comparaison, la densité de courant admissible d'un ruban *YBCO* refroidi à **30 k** peut atteindre **1000A/mm<sup>2</sup>** soit 200 fois plus élevée que la densité de courant dans le cuivre, fixée habituellement à **5 A/mm<sup>2</sup>**.

La Figure I.12 présente des photographies de fils supraconducteurs.



**Figure I.12:** Exemples de supraconducteurs filamenteux [11].

## I.6 Les modèles des supraconducteurs

### I.6.1 Modèle de Bean

Plusieurs modèles existent pour décrire la relation entre la densité de courant et le champ électrique dans les supraconducteurs. Le plus connu est certainement le modèle de Bean, appelé aussi le modèle d'état critique. C'est au début des années 60 que C. Bean introduit ce nouveau modèle basé sur l'existence d'une densité de courant macroscopique limite, notée  $J_c$  et indépendante du champ magnétique, que le supraconducteur peut transporter.

Dans le modèle de Bean, il existe seulement deux états possibles dans le supraconducteur : un état normal où la densité de courant est nulle pour les régions où le champ magnétique ne varie pas, et une densité de courant  $\pm J_c$  dans les régions qui s'opposent aux variations du champ magnétique.

Le modèle de Bean connaît un grand succès auprès des supraconducteurs à basse température et l'on y fait souvent référence dans la littérature [12].

Le supraconducteur est considéré comme non magnétique.

$$J = J_c(|B|) \frac{E}{|E|} \quad \text{I.1}$$

$$B = \mu_0 H \quad \text{I.2}$$

D'un point de vue plus mathématique, on traduit ces expressions avec les équations de Maxwell:

$$\text{rot } B = \mp \mu_0 J_c \quad \text{ou} \quad \text{rot } B = 0 \quad \text{I.3}$$

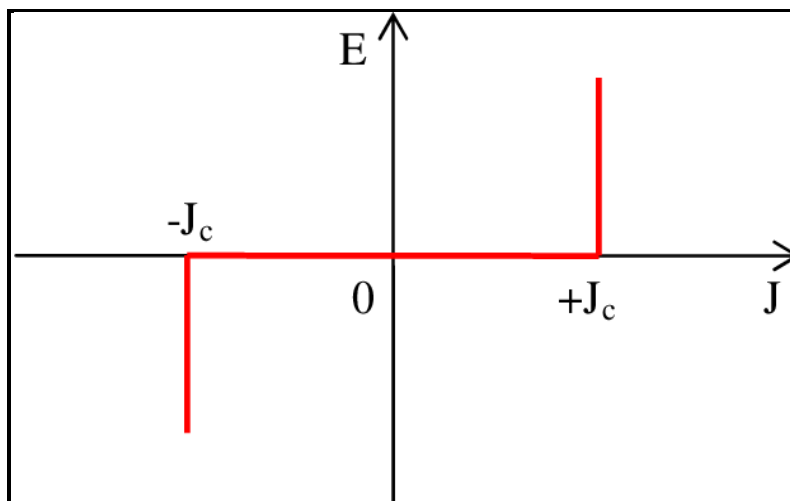


Figure I.13 Modèle de Bean [13]

### I.6.2 Modèle de la loi en puissance E – J

La relation qui lie la densité de courant et le champ électrique est souvent écrite sous la forme de la loi d'Ohm, c'est-à-dire  $\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$ , où  $\rho$  est la résistivité du matériau. Le principal problème dans la modélisation des SHT est la définition de la résistivité, qui n'est pas constante et engendre une loi d'Ohm non linéaire.

Le modèle de Bean et toutes ses variantes ne correspondent pas parfaitement aux caractéristiques expérimentales  $E(J)$  des matériaux SHT, qui sont mieux décrites par des relations du type loi en puissance.

Dans ce modèle de loi en puissance, le champ électrique  $E$  est proportionnel à la densité de courant  $J$  élevée à la puissance  $n$  de la façon suivante.

$$E = E_c \left( \frac{|J|}{J_c} \right)^n \frac{J}{|J|} \quad \text{I.4}$$

$n$ : Raideur de transition (varie entre  $n = 1$  et  $n \rightarrow \infty$ ).

Il faut rappeler que dans le cas des applications du génie électrique, les matériaux supraconducteurs utilisés sont caractérisés par des densités de courant critique  $J_c$  élevées, alors il s'agit du régime flux creep. Dans ce cas, on a tendance à utiliser ce modèle qui décrit bien ce régime, d'ailleurs c'est la confrontation de ce modèle avec des relevés expérimentaux de la caractéristique  $E$ - $J$  des SHTC qui a confirmé l'exactitude de ce modèle. De plus, ce modèle peut prendre en compte l'effet thermique sur le comportement magnétique des SHTC par la dépendance en température de diverses grandeurs caractéristiques du SHTC, tels que, la densité de courant critique  $J_c$  et l'exposant en puissance  $n$  [14].

### I.6.3 Le modèle de Kim [15]

Un des premiers modèles décrivant la densité de courant critique  $J_c$  dépend de Champ appliqué  $B$  a été introduit par Kim.

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

où  $B$  est la densité de flux magnétique,  $B_0$  est une constante (densité de flux magnétique à  $T=0$ ) et  $J_{c0}$  est la densité de courant critique à densité de flux magnétique nul.

Le modèle de Kim est le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique. Ce modèle a été basé sur les données expérimentale pour les supraconducteurs de basse température. Après le travail de Kim et al,

Anderson a donné une interprétation théorique du  $J_c(B)$  dépendance dans relation au flux creep de façon thermique activé. L'équation (I.5) peut généraliser de la forme.

$$J_c(B) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{|B|}{B_0}\right)^n} \quad \text{I.6}$$

Quand l'exposant  $n=0$  ou  $n=1$  l'équation (II.5) réduit à l'équation du modèle de Bean et du modèle de Kim respectivement.

#### I.6.4 Modèle de loi exponentiel

Le modèle exponentiel est utilisé pour la modélisation de la loi non linéaire E-J des supraconducteurs à basse température LTS; il permet de considérer les dépendances à la température  $T$ , à l'induction magnétique  $B$  ainsi qu'à la densité de courant critique  $J_c$  [16, 17]. Ce modèle a été utilisé dans les années quatre-vingt en Russie et en Europe de l'Est [18].

$$E(T, B, J) = J \rho_n \exp\left(\frac{T - T_C}{T_0} + \frac{B}{B_0} + \frac{J}{J_0}\right) \quad \text{I.7}$$

$T_C$  : Température critique (Kelvin)

$T_0$ : Constante caractérisant la dépendance à la température (Kelvin)

$B_0$ : Constante caractérisant la dépendance à l'induction magnétique (Telsa)

$J_0$ : Constante caractérisant la dépendance à la densité de courant ( $A/m^2$ )

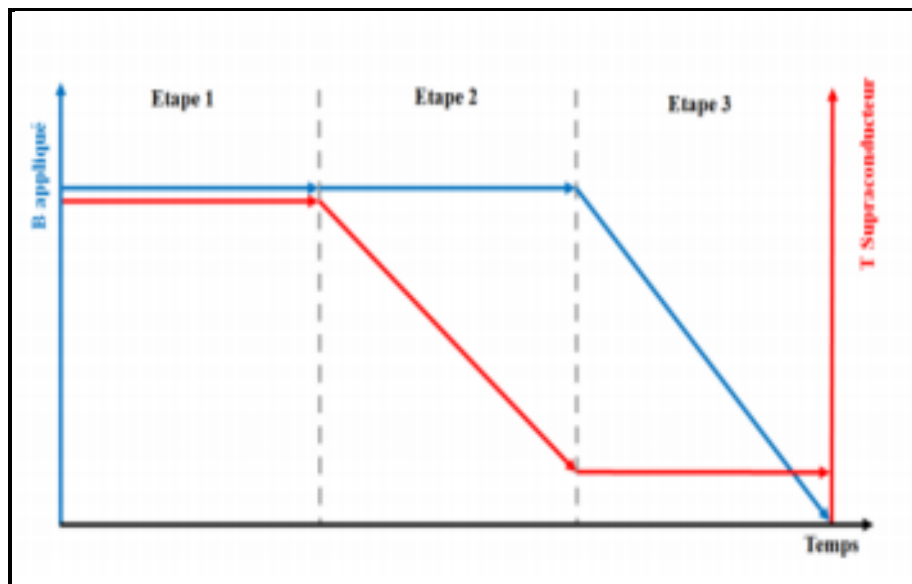
$\rho_n$ : La résistivité électrique normale du supraconducteur

#### I.7 Méthodes d'aimantation [19]

Les supraconducteurs, notamment sous forme massive, peuvent être aimantés et ainsi réaliser ce qu'on appelle des cryo-aimants qui permettent de générer des champs magnétiques de plusieurs teslas ; le record étant à de 17.6 T à 26°K. Par ailleurs, plusieurs axes de recherches ont été consacrés à étudier la possibilité de profiter de l'induction magnétique importante produite par des pastilles aimantées en vue d'applications en génie électrique. Il existe différentes méthodes d'aimantation des supraconducteurs massifs, ces méthodes sont basées sur la variation du champ magnétique appliqué afin de créer, selon la loi de Lenz, des courants induits à l'intérieur de ces supraconducteurs. Ces courants induits génèrent à leur tour un champ magnétique opposé au champ appliqué. Ce principe est utilisé pour réaliser des écrans magnétiques, ou pour piéger du champ magnétique avec des aimants supraconducteurs.

### I.7.1 Le refroidissement sous champ ou « Field Cooling » (FC)

En field cooling le supraconducteur est refroidi à une température inférieure à sa température critique en appliquant un champ magnétique. Des vortex dont la densité dépend de l'amplitude du champ magnétique appliquée apparaissent à la température critique et subsistent dans le supraconducteur pendant le refroidissement. Quand la température est stabilisée, le champ magnétique est lentement réduit ce qui provoque l'apparition de courants induits afin que le champ moyen dans le supraconducteur reste inchangé. La Figure I.14 illustre les différentes étapes de l'aimantation par Field Cooling.



**Figure I.14** : Etapes d'aimantation par Field Cooling d'un supraconducteur

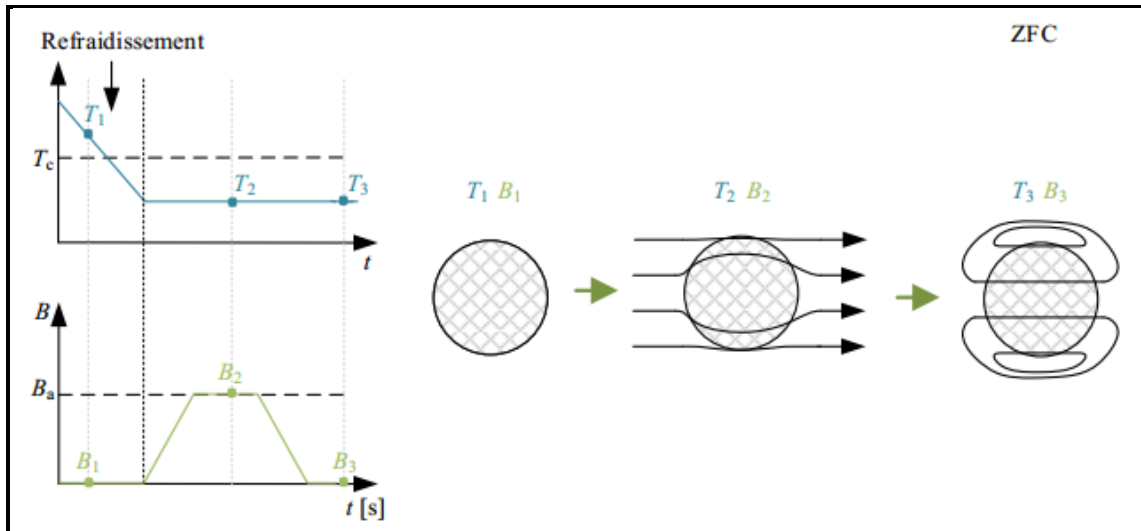
Cette méthode est celle qui permet d'obtenir les champs piégés les plus élevés. Il est néanmoins impossible de piéger un champ supérieur au champ appliqué et il est nécessaire d'utiliser une source de grandes dimensions pour appliquer un champ important. En 2003, M. Tomita et M. Murakami ont pu piéger 17 T à 29 K dans un supraconducteur de 26.5 mm de diamètre [20]

### I.7.2 Le refroidissement sous champ (ZFC) [21]

Le concept de cette aimantation est basé sur l'application du champ magnétique après le refroidissement du supraconducteur. Les étapes d'aimantation par ZFC sont présentes sur la Figure I.15. Cette technique n'est pas beaucoup utilisée pour l'aimantation de supraconducteurs car la méthode FC est plus efficace et le dispositif expérimental nécessaire pour ces deux techniques est approximativement le même. La technique ZFC a été proposée comme une alternative pour les systèmes de lévitation magnétique utilisant des



supraconducteurs à haute température critique ou dans le système avec des paliers magnétiques basée sur le NdFeB.



**Figure I.15** : Exemple d'aimantation par ZFC. Le champ magnétique est appliqué après avoir atteint la température du supraconducteur  $T_c$

### I.7.3 Aimantation par champ impulsionnel ou « Pulse Field Magnétisation » (PFM)

Les techniques d'aimantation présentées dans cette section sont basées sur l'impulsion d'un champ magnétique externe et sont plus pratiques que les méthodes FC et ZFC. Nous allons utiliser l'acronyme PFM lorsque nous ferons référence à l'aimantation par un champ impulsionnel dans cette thèse. Les bobines pour une impulsion de champ magnétique sont plus compactes qu'avec les méthodes FC ou ZFC. Principalement, nous devons avoir un système suffisamment puissant qui peut générer un champ magnétique de plusieurs teslas. Si l'on considère une application de type moteur électrique avec des aimants supraconducteurs, la bobine d'aimantation n'est nécessaire que pour magnétiser les supraconducteurs et ne doit pas faire obligatoirement partie de la machine. Une autre possibilité est que l'induit de la machine puisse aimanter les pastilles supraconductrices, ce qui est presque impossible avec les techniques FC et ZFC en raison de la taille des bobines nécessaires pour l'aimantation. Cependant, la variation rapide du champ magnétique lors d'une impulsion génère de la chaleur dans le supraconducteur, contrairement aux méthodes ZFC et FC. Cette énergie dissipée cause une augmentation de la température préjudiciable aux performances.

Tous les types de méthodes PFM se basent sur la décharge d'un condensateur, mais, chaque méthode utilise une approche différente, c'est-à-dire l'amplitude maximale du

champ magnétique, le nombre d'impulsions de champ externe, la durée des impulsions ou la température de refroidissement des supraconducteurs peuvent être différents [21].

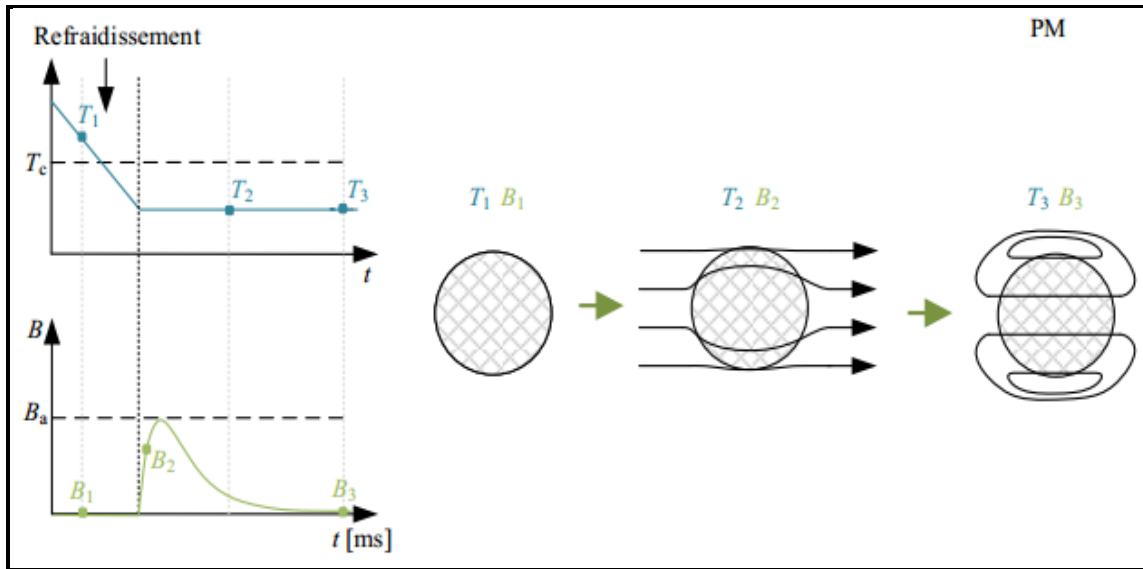


Figure I.16: Exemple d'aimantation par PFM. Le champ magnétique est appliqué après avoir atteint la température critique du supraconducteur  $T_c$ , avec une durée n'excédant pas plusieurs millisecondes.

### I.8 Mécanisme « d'écrantage »

Plusieurs dénominations peuvent être données au terme d'écrantage magnétique, un supraconducteur refroidi hors champ magnétique aura la capacité d'expulser un champ magnétique. Ce comportement peut être utilisé afin de guider le flux, de le blinder, ou encore de le concentrer .

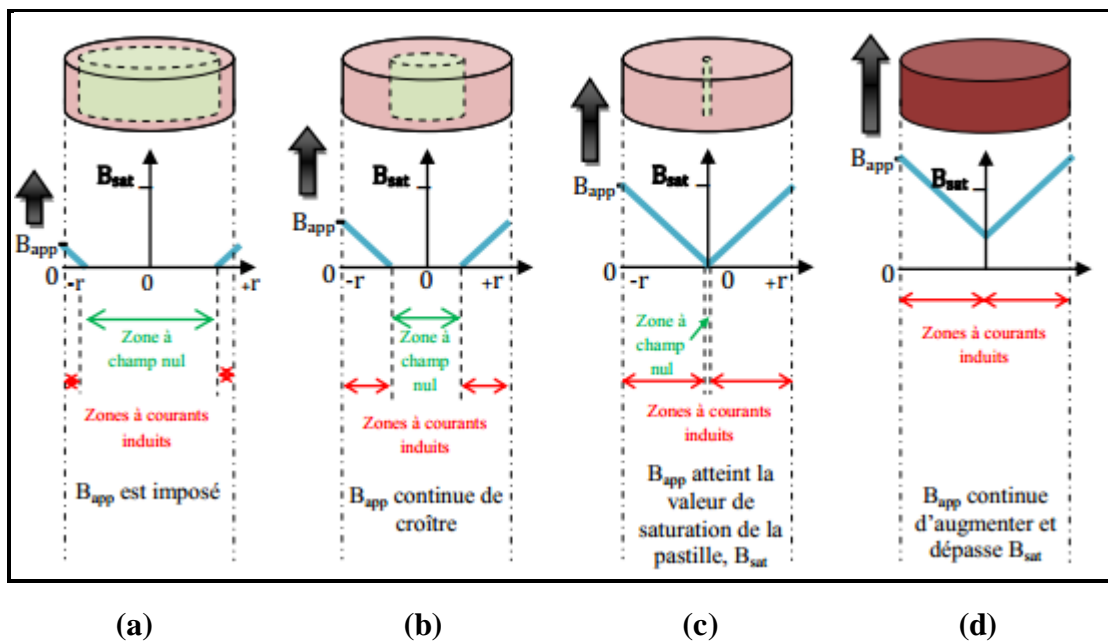


Figure I.17 : Expulsion du champ par une pastille

- **(a)** : Ecran magnétique : un champ magnétique est appliqué au niveau de la pastille, des courants induits se développent à la surface du matériau et s'opposent au flux extérieur.
- **(b)** : Pénétration partielle :  $B_{app}$  continue de croître, l'épaisseur des courants induits augmente, le champ est alors écranté qu'au niveau de la zone verte.
- **(c)** : Pénétration totale :  $B_{app}$  à atteint la valeur de saturation de la pastille. Celle-ci est traversée, mise à part le centre, par le champ externe et perd ses propriétés d'écran.
- **(d)** : Magnétisation :  $B_{app}$  continu d'augmenter et on arrive à un état de magnétisation forcé du massif.

Un champ magnétique est imposé au niveau du matériau supraconducteur après qu'il a été refroidi à sa température de fonctionnement. Des courants induits, illustrés sur la figure I.17, régis par la loi de Lenz, se développeront dans le matériau s'opposant ainsi au champ magnétique extérieur.

L'aptitude du matériau à écranté un champ magnétique plus au moins important dépendra de sa capacité à induire de forts courants sur une surface réduite. Selon les matériaux utilisés, nous remarquons une meilleure prédisposition des céramiques YBCO par rapport aux autres pour expulser des flux plus importants [22].

### I.9 Conclusion.

Dans son premier chapitre, nous avons révélé une introduction aux supraconducteurs et l'historique de leur développement avec une description du type et des formes de supraconducteurs (filaire, bulk, ruban). La forme massive de ces derniers à la capacité d'écranter (pastilles supraconductrices) ou de piéger (aimants supraconducteurs) des champs magnétiques. Cette propriété étonnante liée en principe par plusieurs facteurs tels que le champ magnétique critique  $H_c$ , la température critique  $T_c$  et la densité de courant critique  $J_c$  ainsi que le type de matériau supraconducteur à haute ou à basse température.

## *Chapitre II*

### *Domaines d'applications des matériaux supraconducteurs*

## II.1 Introduction

Dans la partie précédente, nous avons vu la révolution apportée par les porteurs supraconducteurs et le véritable boom des scientifiques dans le développement de cette technologie. Nous avons également abordé les caractéristiques, les modèles, les formes et les types de supraconducteurs ainsi que leur mécanisme d'écrantage et de piégeage du champ magnétique.

Dans cette partie, nous présenterons les domaines d'applications des matériaux supraconducteurs, notamment dans le domaine de génie électrique. Parmi ces applications, nous parlerons en particulier sur les nouvelles structures des machines électriques réalisées à base des pastilles (écrans) supraconductrices à haute température critique (SHTc).

## II.2 Application des supraconducteurs

### II.2.1 Les supraconducteurs en imagerie par résonance magnétique (IRM)

Les aimants supraconducteurs trouvent une application dans l'imagerie par résonance magnétique (*IRM*) du corps humain. En plus de nécessiter des champs magnétiques puissants de l'ordre d'un Tesla, l'imagerie par résonance magnétique nécessite des champs extrêmement uniformes sur le sujet et une stabilité extrême dans le temps [23].



**Figure II.1 :** supraconducteurs en imagerie par résonance magnétique

### II.2.2 Trains à lévitation magnétique

L'invention supraconductrice la plus célèbre et la plus fascinante est peut-être celle des trains à lévitation magnétique, ou trains "*Maglev*". Les trains *Maglev* n'ont pas de roues ni de

friction. Les trains flottent silencieusement sur un champ magnétique en raison de leur comportement diamagnétique [23].



**Figure II.2 :** Le train à sustentation magnétique japonais *JR-Maglev* en 2005

### **II.2.3 Stockage de l'électricité (SMES)[24]**

L'énergie peut être stockée par un courant électrique dans une bobine de fil supraconducteur. Une fois la bobine fermée sur elle-même le courant reste indéfiniment car il n'y a pas de perte. C'est, avec les condensateurs et les batteries, le seul moyen de stocker directement l'électricité. Les pertes sont très faibles par rapport aux autres formes de stockage de l'énergie. Malheureusement la densité massique ou volumique d'énergie stockée n'est pas très importante. Une bobine produisant **20 teslas** stocke une énergie de l'ordre de **45 kwh/m<sup>3</sup>**.

Les bobines *D-SMES (Distributed Superconducting Magnetic Storage)* sont particulièrement construites pour la stabilité des réseaux électriques. La bobine supraconductrice est connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-continu réversible pour transformer le courant alternatif du réseau en courant continu pour la bobine. En cas de chute de la tension d'un réseau, elle injecte immédiatement un supplément d'énergie pour stabiliser le réseau. Elle se recharge en quelques minutes et peut supporter de nombreuses séquences charge/décharge sans dégradation. Seule **2 à 3%** de l'énergie est perdue dans les transferts ce qui est très faible. Les premières bobines de **8,4 kwh** ont été installées sur le réseau de *Bonneville Power Administration* à *Tacoma (USA)* en **1980**. Ceci a été la première application supraconductrice à fonctionner sur un réseau. Le *Wisconsin Public Service (WPS)* les a rachetées pour 4 millions de dollars en **1999**. Installées en juillet **2000**, elles protègent la distribution dans le nord du *Wisconsin* qui était soumis à de nombreuses défaillances.





**Figure II.3 :** Bobine supraconductrice pour stockage d'énergie.

#### **II.2.4 Moteurs et Générateurs supraconducteurs [24].**

Une bobine supraconductrice fermée sur elle-même est l'équivalent d'un aimant. Elle peut donc remplacer les aimants ou les électroaimants. La supraconductivité peut alors augmenter l'efficacité de nombreux appareillages. Les systèmes électriques incorporant des fils faits de supraconducteurs à hautes températures critiques sont plus compacts, plus légers et plus économiques que les systèmes comparables en fils de cuivre. Ceux-ci permettent d'obtenir des puissances et des couples « massifs volumiques » très élevés.

##### **II.2.4.1 Les moteurs supraconducteurs**

La principale application des moteurs supraconducteurs se trouve dans la propulsion navale. Ces moteurs nécessitent un fort couple et des faibles vitesses de l'ordre de **120 tr/min**. En **2009** *AMSC* a livré un moteur de **36 MW** à la *Navy*. C'est le plus puissant moteur réalisé. Un des grands intérêts de ces moteurs pour la marine est leur compacité. Ils sont trois fois plus légers qu'un moteur traditionnel de **20 MW** et **2,5** fois plus petit. La diminution de poids et d'encombrement en font une technologie particulièrement adaptée aux systèmes embarqués. En *Allemagne*, *Siemens* en a fabriqué un de **4 MW**. En **2007**, *Sumitomo* a présenté un véhicule électrique de **365 kW** qui réalise 20 à 30% d'économie par rapport aux véhicules électriques classiques (Figure II.4).



Figure II.4 : Moteur supraconducteur fabriqué par *Sumitomo*

#### II.2.4.2 Les générateurs supraconducteurs

Concernant les générateurs à supraconducteurs, une des premières applications a concerné les éoliennes. Cette technologie permet des économies d'énergie et de poids. De plus, la taille des éoliennes peut être réduite. La diminution de poids qui peut être de plus de 50%, provient du remplacement des aimants permanents (qui sont gros et lourds) par des circuits supraconducteurs. Les aimants permanents sont aussi de gros consommateurs de terres rares alors que les éoliennes à base de supraconducteurs en utilisent 100 fois moins. Les terres rares sont chères et proviennent en majorité de Chine qui réduit ses exportations depuis 2009.

En France la commission «Investissements 2030» recommande de réduire la consommation de terres rares tout comme l'agence de l'énergie aux États-Unis.

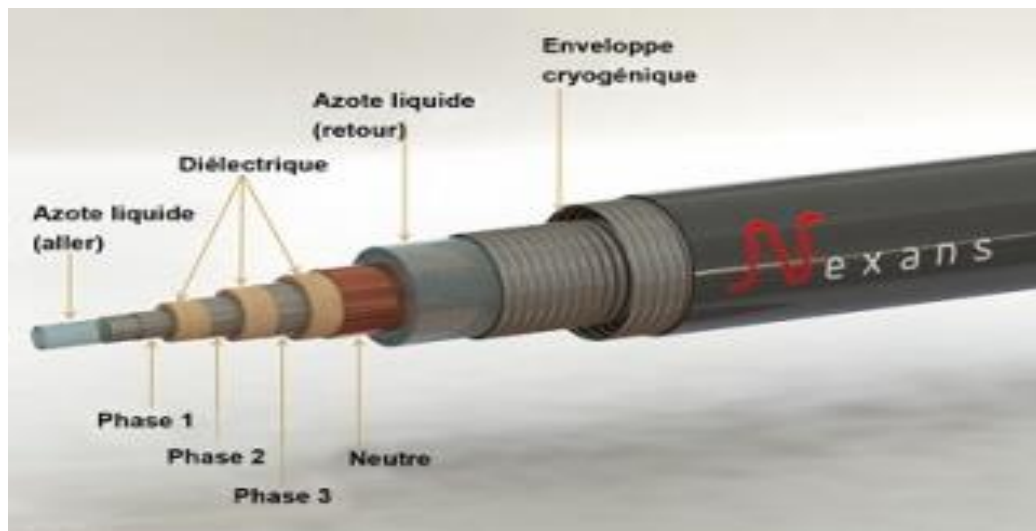
#### II.2.5 Limiteur de courant de défaut (FCL)

Un limiteur de courant de défaut est un appareil unique, sans équivalent classique, qui limite automatiquement le courant dès qu'il dépasse une valeur prédéterminée. Il peut être comparé à un fusible permanent puisqu'il se régénère automatiquement après un défaut d'alimentation (court-circuit par exemple). Le FCL est basé sur la transition pratiquement instantanée d'un état sans résistance à un état fortement résistif d'un élément supraconducteur lorsque le courant franchit la valeur du courant critique.





- En **2004** Sumitomo Electric Industries Ltd réalisa le premier câble supraconducteur capable de transporter 130 fois plus d'électricité qu'une ligne conventionnelle.
- En **2006**, une ligne de **34,5 kV** et **800 A** fut réalisée sur 350 m à *Albany, (USA)*. Les câbles étaient réalisés avec un *oxyde de cuivre* comportant du *bismuth* et baignait dans l'azote liquide. Une grande économie de poids était aussi obtenue puisque 8400 kg de fil de cuivre étaient remplacés par 110 kg de câbles supraconducteurs.
- En **2008** un câble supraconducteur fabriqué par *Nexans* (Figure II.6), a été installé pour le compte de *LIPA (Long Island Power Authority)*, l'un des principaux opérateurs de réseaux électriques aux *États-Unis*. Cette liaison de 600 mètres à **138 kV**, capable de transporter une puissance électrique de **574 MW** grâce à un courant de **2400 A**, constitue le premier câble supraconducteur au monde incorporé dans un réseau électrique à ce niveau de tension. Il alimente 30 000 foyers.



**Figure II.6 :** Câble supraconducteur

- Plusieurs entreprises sont en **2015** capables de réaliser des câbles pour le transport du courant avec le composé  $YBaCuO$  où le bismuth a été remplacé par de l'yttrium. Ces câbles de seconde génération remplacent à peu près 150 fils de cuivre. Ils supportent des courants élevés jusqu'à **5 kA** ce qui permet le transport d'une forte puissance électrique avec une forte intensité plutôt qu'une haute tension (la puissance électrique est le produit de la tension par l'intensité). Ils permettent ainsi la réduction du nombre de transformateurs. Ils présentent plusieurs autres avantages: en dépit de leur gaine cryogénique externe d'isolation thermique, ils occupent moins d'espace que des câbles similaires en cuivre, tout en offrant une grande capacité de transport d'énergie, sans émettre ni champs électromagnétiques ni dégagement de chaleur alors que les lignes

classiques à haute tension émettent des champs électromagnétiques qui peuvent être néfaste pour la santé. Cela permet de placer plusieurs câbles près les uns des autres, ce qui se traduit par un gain de place dans les conduites souterraines, une caractéristique particulièrement intéressante pour les centres villes.

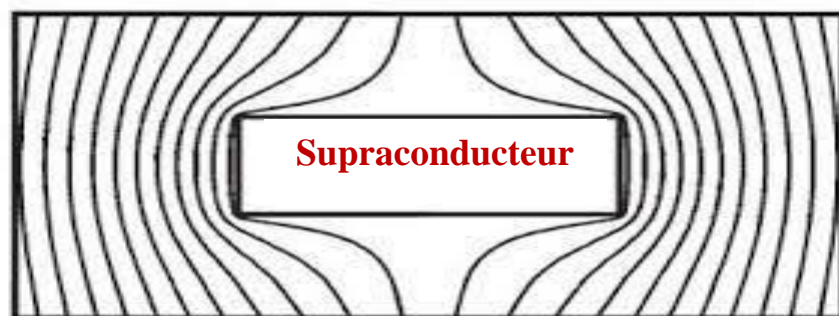
Les câbles de deuxième génération du fabricant français *Nexans* avec des fils produits par *Société Américaine de Supraconducteurs (AMSC)* sont faits de trente cinq fils de l'épaisseur d'un cheveu enrobés dans une couche ultramince de cuivre ou d'acier inoxydable. Ils permettent de transporter des puissances pouvant aller jusqu'à **5000 MW** avec des tensions inférieures à **200 kV**[24].

### **II.3 Les application des écrans SHTc dans les machines électriques**

Les principales applications envisagées pour les écrans supraconducteurs sont la protection de systèmes électroniques vis à vis des champs magnétiques externes [25], et leur utilisation comme barrières de flux magnétique dans un inducteur de machine électrique synchrone [26]. D'autres réalisations de moteurs, notamment pour l'aéronautique, sont également en cours d'étude au sein du GREEN, à écrans supraconducteurs[27].

#### **II.3.1 Machines à barrières de flux**

Nous avons mis à profit les propriétés d'écrantage des pastilles supraconductrices pour étudier de nouvelles topologies de machines électriques. Lorsqu'une pastille est refroidie hors champ, elle se comporte comme un écran magnétique quasi parfait. La figure II.7 représente le cas idéalisé d'une pastille parfaite où toutes les lignes de champ sont expulsées. Dans la réalité, les lignes de champ pénètrent dans la pastille sur une très faible épaisseur où les courants induits existent. L'épaisseur de pénétration du champ dépend de la qualité de la pastille (courant critique), de la température de refroidissement, et de la valeur du champ magnétique appliqué[28].



**Figure II.7 :** Effet d'écran obtenu avec une pastille supraconductrice refroidie hors champ

### II.3.2 Machine à modulation de flux

Cette structure atypique (Figure II.8) est composée de deux solénoïdes supraconducteurs alimentés par des courants opposés, les champs résultants seront donc en oppositions. Entre ces deux enroulements, on insère des pastilles supraconductrices en YBaCuO, qui par leurs propriétés à écran de champ magnétique, moduleront l'induction obtenue dans l'espace de l'entrefer. Cette variation de champ magnétique évoluera entre une valeur minimale proche de zéro derrière les plaques supraconductrices et une valeur maximale  $B_{max}$  entre les écrans. L'induction créée est alors directement proportionnelle aux courants dans les solénoïdes.

Les deux thèses successives de Philippe Masson et d'El Hadj Ailam, dirigées par le Professeur Abderrezak Rezzoug et co-encadrées par les Professeurs Jean Lévêque et Denis Netter, ont permis la conception d'un moteur supraconducteur synchrone. Un premier prototype, réalisé par le laboratoire GREEN a permis de vérifier expérimentalement le principe de la structure. Le dimensionnement et les tests d'un banc machine reposant sur la modulation de flux a permis de valider son fonctionnement.

L'objectif de ces travaux était de se démarquer des machines supraconductrices présentées dans le point précédent comme des cryo-copies, avec la possibilité d'envisager des inductions magnétiques d'entrefer plus importantes pour obtenir de fort couple massique. Sur ce principe, des topologies à flux axial pourraient être envisagées [29].

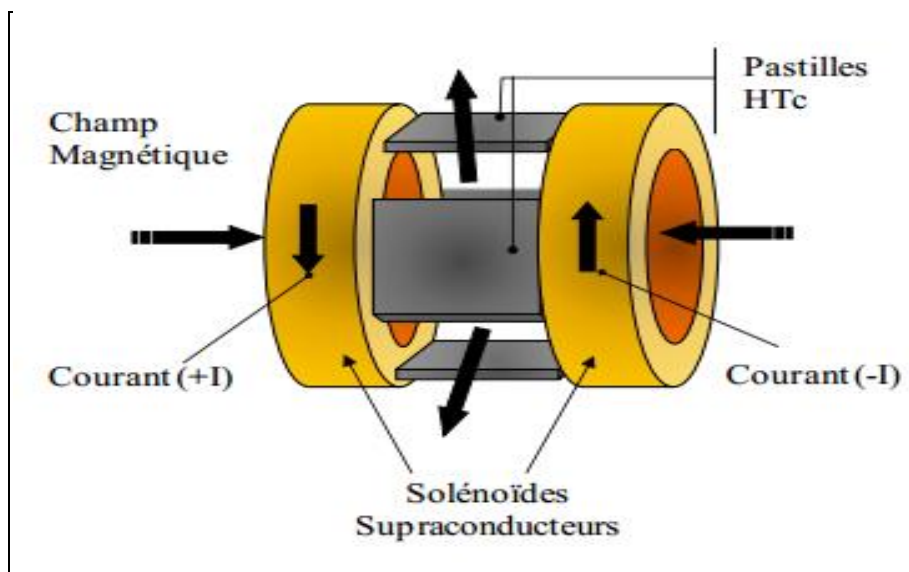
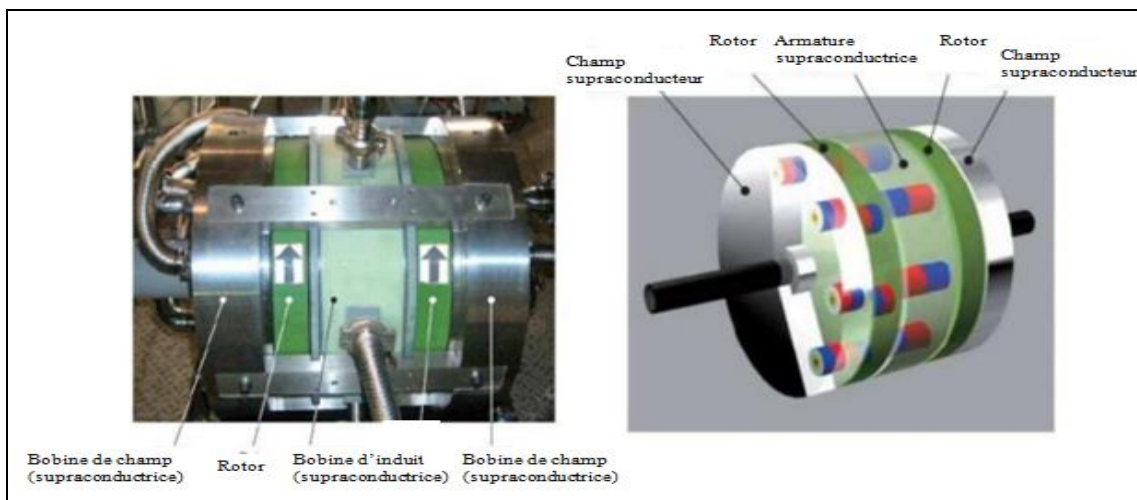


Figure II.8 : Illustration d'une machine à modulation de flux

### II.3.3 Machine synchrone à flux axial

La machine synchrone à flux axial est composée de disques fixes maintenant des bobinages et de disques mobiles maintenant des aimants permanents. Ces disques sont en vis-à-vis, le flux provenant des aimants axial. Plusieurs configurations de machines à flux axial sont présentées : simple face, double rotors, double stators et multi stators. Les bobinages statoriques peuvent être bobinés en tores ou en pétales. La principale difficulté de ces structures est la contrainte mécanique liée aux fortes forces axiales, d'origine magnétique, exercées entre les rotors et les stators.

Plusieurs structures supraconductrices ont été proposées en utilisant soit des supraconducteurs sous forme de ruban, soit des pastilles supraconductrices. De nombreuses machines de faible puissance ont été construites au Japon notamment une machine refroidie à l'azote liquide entièrement supraconductrice de 12.5 KW Figure(II.9) avec des pastilles YBaCuO au niveau de l'inducteur et du fil BSCCO au niveau de l'induit[30].



**Figure II.9 :** Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5 kW par IHI

### II.3.4 Moteur synchrone à réluctance [31]

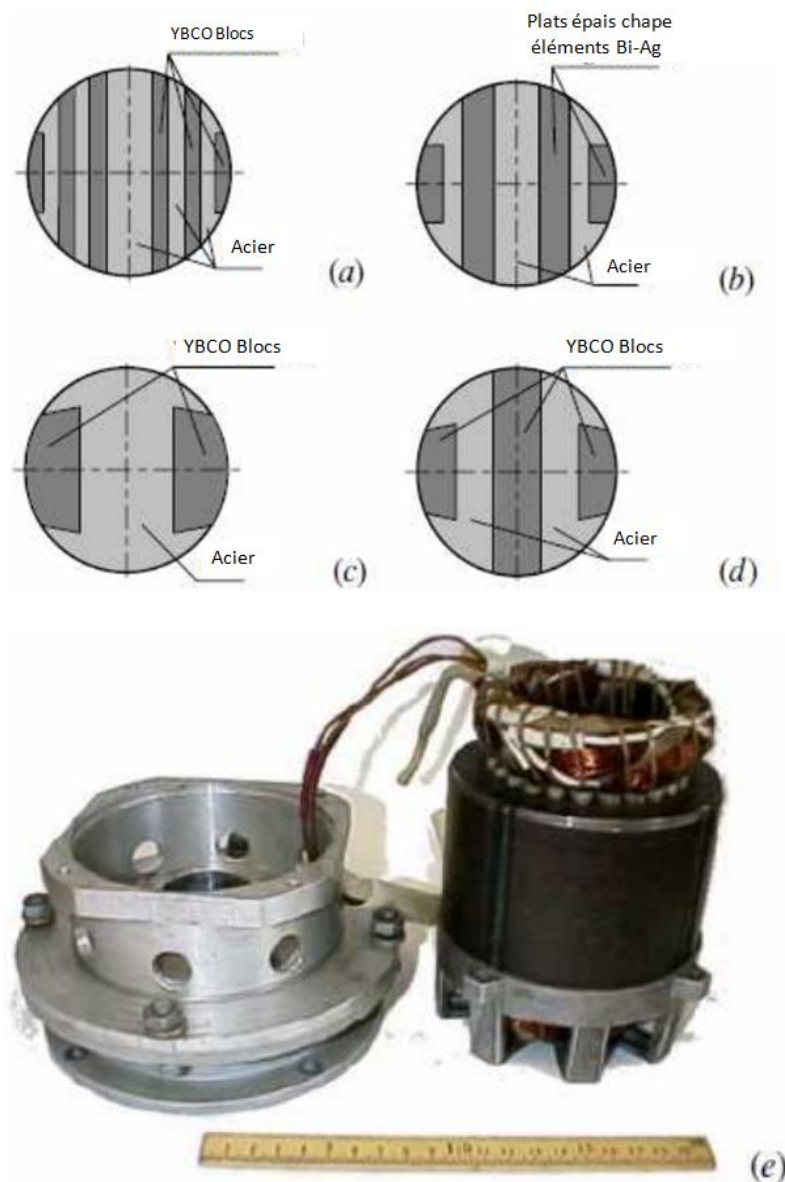
Au début des années 2000, et en parallèle des recherches sur les moteurs synchrones à hystérésis, des laboratoires russes ont débuté leur recherche sur les moteurs synchrones supraconducteurs à réluctance. Plusieurs proto types de différentes conceptions de rotor à « bulks » en YBCO (fig. II.10) ont permis de réaliser des machines fournissant jusqu'à une dizaine de kilowatts et les perspectives sont vers des puissances de plusieurs centaines de kilowatts.

Suivant le principe des moteurs à réluctance synchrone, proposant des rotors massifs à dents, le rotor d'une machine synchrone supraconductrice à réluctance présente des couches



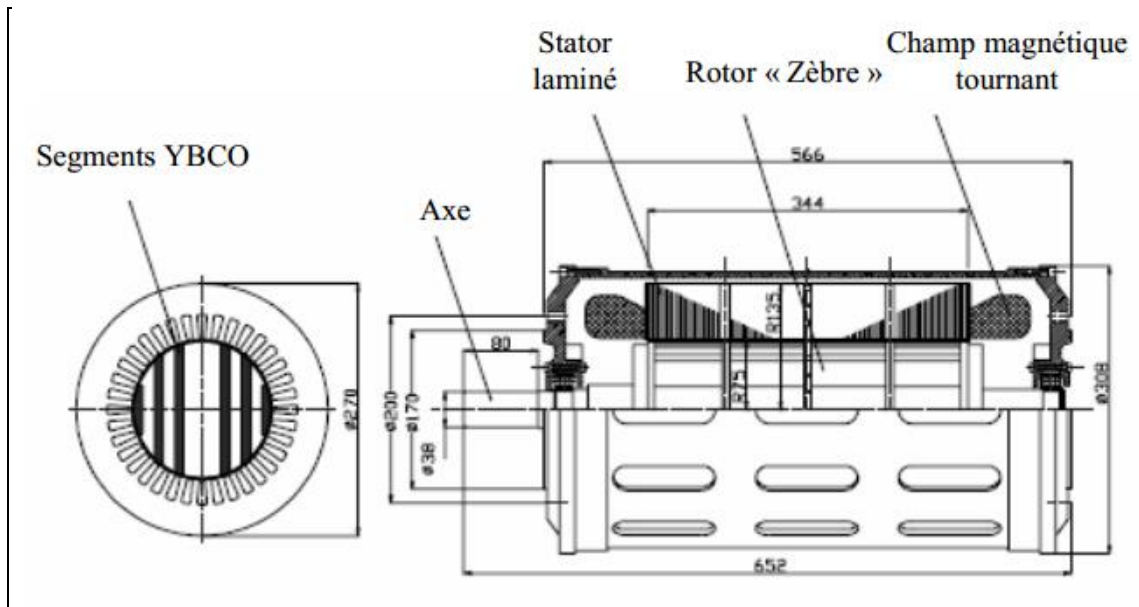
alternées de fer et de supraconducteur massif « bulk » YBCO suivant la largeur de l'arbre (fig. II.10). On remplace donc les matériaux amagnétiques usuels utilisés par des parties massives supraconductrices. Ce qui permet d'augmenter les ratios entre la perméabilité magnétique suivant les axes longitudinaux et transverses de l'axe moteur et ainsi augmenter la puissance de la machine tournante. Ce qui se traduit par un découplage et une augmentation de la différence entre l'inductance directe et l'inductance transverse.

Les premières conceptions proposent des machines fonctionnant à l'azote liquide et offrent un gain en volume de 3 à 5, pour des machines de 5 à 10kW. Ces prototypes utilisent le même stator classique cuivre et permettent la comparaison de différentes topologies de rotor. Ce fort gain s'explique par un refroidissement complet de la machine à l'azote liquide.



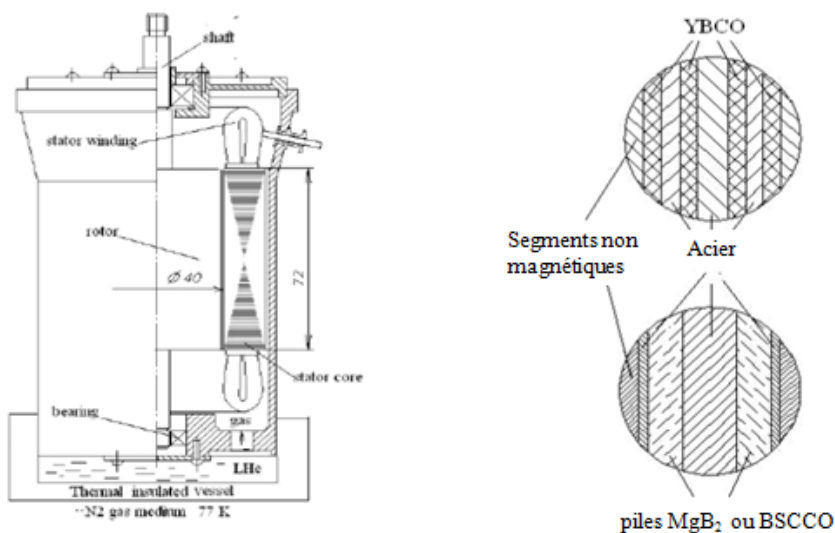
**Figure II.10 :** Rotors supraconducteurs « Zèbre » (a) et (b), « Pilz » (c) et « Zelz » (d), moteur à réluctance .

Une conception de 150kW à 3000tr/min à l'azote liquide a été réalisée en 2002 dans les laboratoires d'Oswald, dans une collaboration Germanico-Russe, adoptant la topologie de rotor « Zèbre » présentée précédemment (Fig. II.11).



**Figure II.11 : Moteur à réluctance 150kW 3000tr/min**

Comme pour les moteurs présentés dans les paragraphes ci-dessus, la découverte du  $MgB_2$  implique de nouvelle idée de conception pour des applications particulières. Ici encore l'application de pompe immergée dans le transport d'hydrogène liquide à 20K constitue un challenge intéressant. Les structures « Zèbres » sont encore adoptées, le passage de 77K à 20K permet de doubler la puissance de la machine.



**Figure II.12 : Pompe immergée pour le transport d'hydrogène liquide**

D'autres machines synchrones SHTc sont réalisées par plusieurs équipes de recherche. Nous présentons sur le tableau ci-dessous, les autres topologies de machines synchrones supraconductrices à réluctance réalisées et testées. La majorité de ces réalisations concernent des prototypes et démonstrateurs de petites puissances.

<b>Description</b>	<b>Exemple de réalisations</b>
La réluctance est créée en empilant des «bulk» HTc et des feuilles ferromagnétiques, la saillance est due au rapport de la perméabilité magnétique très faible du matériau HTc par rapport à celle du fer. Plusieurs combinaisons de rotor ont été étudiées. Exemple d'une structure étudiée par Moscow State Aviation Institut (MAI) en Russie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Russie: 100 kW-3000 tr/min 200 kW-3000tr/min</li><li>• Japan: 38 kW-750tr/min</li></ul>

**Tableau II.1** : Autres topologies de moteur synchrone [32]

### **II.4 Machines développées au laboratoire GREEN**

Afin d'explorer les différentes possibilités d'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les machines électriques. Le laboratoire de recherche en électronique et électrotechnique à Nancy (GREEN) consacre un effort conséquent à la recherche de nouvelles structures de machines électriques. En 1984, le GREEN a réalisé la première machine supraconductrice universitaire en France.

Dénommée SUPERSAT, c'est une machine à basse température critique en NbTi à plots ferromagnétiques saturés. Ci-dessous, nous présentons deux topologies originales étudiées au GREEN. Ces machines utilisent les supraconducteurs à haute température critique YBCO sous forme de « bulk » afin de moduler le champ (ces structures ne sont possibles qu'avec l'utilisation des matériaux supraconducteurs)[32].

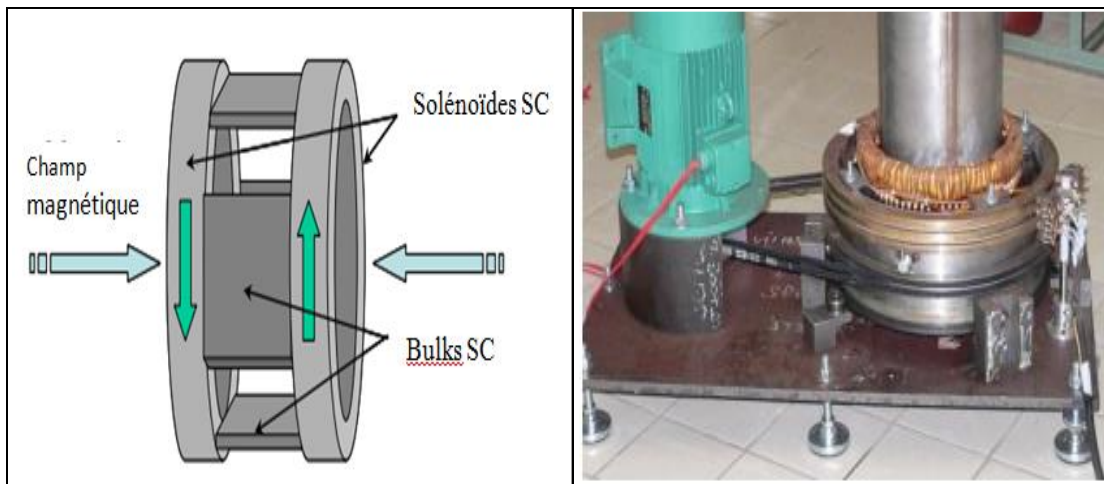
#### **II.4.1 Moteur synchrone à concentration du flux [32]**

Un inducteur original basé sur un principe de concentration de flux a été étudié. Ensuite un moteur synchrone a été réalisé avec succès à Nancy. Figure II.13. Deux solénoïdes supraconducteurs à basse température (NbTi) alimentés par des courants en opposition créent un champ magnétique élevé. Ce champ est ensuite modulé par des pastilles supraconductrices YBCO « Bulk », ce qui permet d'obtenir une répartition alternative de l'induction d'entrefer. Bien que le moteur n'ait pas été testé à pleine charge, il a été conçu pour respecter les spécifications suivantes :

- Puissance : 25 kW
- Tension nominale : 380 V



- Courant nominal : 40 A rms
- Vitesse : 750 tr/min
- Courant inducteur : 70 A



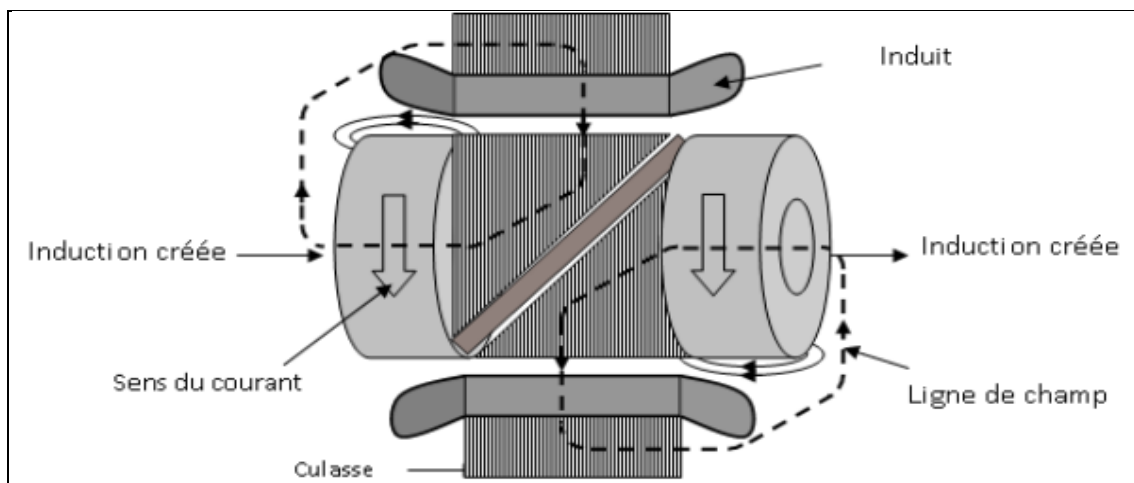
**Figure II.13** : Moteur synchrone à concentration du flux, gauche : principe de l'inducteur, droite : le moteur sur le banc de test

La longueur utile de cette machine est limitée par la taille des pastilles. En multipliant la même structure suivant l'axe z, on obtient un inducteur « multistack ». Cela permet d'augmenter le couple de cette structure.

#### **II.4.2 Moteur synchrone à pan coupé**

Une autre structure originale est étudiée au GREEN basée sur le même principe que l'inducteur précédent. Deux solénoïdes supraconducteurs à basse température (NbTi) créent un champ magnétique élevé. Ce champ est ensuite dévié par un écran de pastilles supraconductrices YBCO « Bulk », et orienté dans la direction radiale.

La Figure II.14 illustre le principe de fonctionnement.



**Figure II.14** Principe de moteur à pan coupé [32]

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons cité les applications des matériaux supraconducteurs dans divers domaines industriels, notamment électriques. Ces matériaux ont des diverses applications dans le domaine de l'électrotechnique. En particulier, les supraconducteurs à haute température critique SHTC sont des candidats sérieux pour des applications liées à l'électromagnétisme en génie électrique et à l'électronique. Parmi ces applications nous avons présentés les plus utilisées et les plus prometteuses. Nous avons présenté également les différentes topologies des machines électriques à base des écrans SHTC afin de donner une idée sur l'utilisation de ce type de matériau et d'envisager de nouvelles structures.

## *Chapitre III*

*Etude du champ magnétique  
à la présence des écrans*

*SHTc*

## Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTC

### III.1 Introduction

Lors d'un blindage ou d'un piégeage de flux avec un matériau supraconducteur, ce dernier crée naturellement des courants induits en inverse dans le matériau afin de s'opposer à la variation du champ magnétique externe. Cette réaction est remarquable en particulier dans les pastilles supraconductrices à haute température critique (SHTC) fonctionnent comme des écrans magnétiques.

Les écrans supraconducteurs sont utilisés dernièrement pour la réalisation des différents dispositifs en électrotechnique de hautes puissances [22], comme dans les systèmes de la lévitation magnétique et les machines électriques. En effet, lors du fonctionnement de ces derniers, les pastilles peuvent soumises à des champs magnétiques externes élevés créant des courants induits dans le matériau. Un écran supraconducteur empêche le passage des lignes de champ et de les dévier ou moduler en d'hors de son volume, ce qui provoque un système de concentration de ces lignes de flux. L'étude de ce phénomène est notre objectif du travail.

Dans ce chapitre nous allons effectuer une modélisation numérique d'une pastille SHTC fonctionne sous forme d'un écran magnétique afin de déterminer le comportement de ce dernier vis-à-vis un champ magnétique externe appliqué, et en particulier de calculer la distribution du champ magnétique autour du matériau pour concevoir des nouvelles applications en électrotechnique.

### III.2 Objectif du travail

Dans ce travail on va étudier la distribution de champs magnétique dans un milieu comporte des matériaux supraconducteurs sous la forme de pastilles ou bulks. Ces derniers présentent, d'après la loi de Lenz, le phénomène très impressionnant d'écrantage des lignes de flux magnétiques. Ce phénomène a été exploité récemment pour la réalisation de plusieurs dispositifs électromagnétiques en particulier, les machines électriques [33]. Notre but de travail est d'étudier le phénomène d'écrantage des pastilles supraconductrices d'une part, et de concevoir l'emplacement et le positionnement efficace de ces matériaux dans les différents dispositifs électromagnétiques lors de leur utilisation, d'une autre part.

Sachant que le matériau supraconducteur possède un comportement non linéaire à la présence d'un champ magnétique externe, cela ce traduit par la création des courants induits dans le matériau afin d'exposé à la variation de champ externe appliqué. L'augmentation de la variation de ce dernier à un niveau supérieur au champ magnétique critique  $H_c$  provoque la

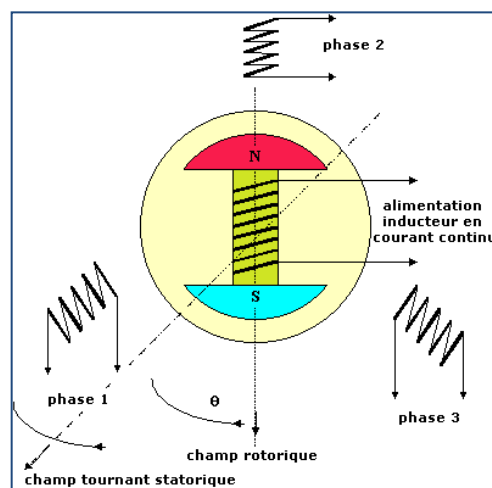
## Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

transition du matériau. Donc, la connaissance de ce champ créé dans la pastille est primordiale pour une meilleure prédiction d'utilisation de ces matériaux.

L'utilisation des pastilles supraconductrices à haute température critique (*SHTc*) dans les machines électriques présente une amélioration importante au niveau des grandeurs des sorties comparé avec les machines conventionnelles. Cette faveur est liée aussi à l'emplacement et à la disposition de ces matériaux dans la structure des machines. Ces critères sont aussi importants pour la conception des nouvelles topologies des machines supraconductrices.

Dans le cas des moteurs électriques, un des principaux challenges à relever pour les années qui viennent est l'augmentation de la puissance et de couple massique, avec notamment la propulsion marine et la production d'électricité.

Le fonctionnement du moteur synchrone est basé sur le principe de l'interaction de deux champs magnétiques ; Un champ magnétique variable dans l'espace créé par l'inducteur, et un autre tournant créé par l'intermédiaire d'un bobinage triphasé de l'induit, comme l'indique sur la figure III.1. On a alors la possibilité d'augmenter le couple électromagnétique du moteur ( $H_t * H_r$ ), soit en agissant sur le champ tangentiel  $H_t$  produit par l'induit ou sur le champ radial  $H_r$  produit par l'inducteur.

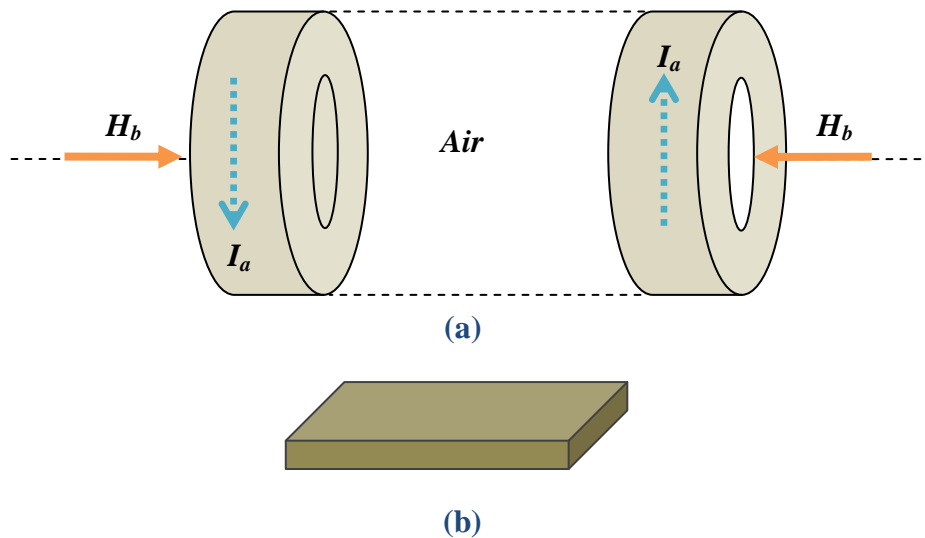


**Figure III.1** : Schéma de principe de fonctionnement de moteur synchrone

Ce travail est consacré à l'étude d'un dispositif qui ressemble au principe de fonctionnement d'un inducteur à base des éléments *SHTc*. On s'intéresse en particulier au champ magnétique dans l'espace environnemental des matériaux supraconducteurs.

### III.3 Présentation du modèle d'étude

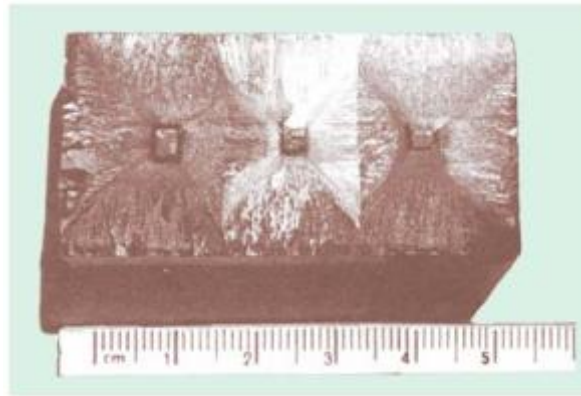
La structure du modèle étudié est constituée par deux solénoïdes en cuivre alimentant par un courant électrique, schématisés sur la figure III.2, pour créer des champs magnétiques axiaux ( $H_b$ ). Des plaques supraconductrices (écrans) sont placées entre ces deux solénoïdes (zone d'air) afin d'exposer à la variation de ces champs magnétiques.



**Figure III.2** : Schéma de Principe de modèle étudié : (a) Schéma de deux solénoïdes alimentés en opposition ;  $H_b$  : *champ magnétique axial créée par chaque bobine*,  $I_a$  : *courant appliqué dans les solénoïdes*, *Air* : *la zone d'emplacement des écrans SHTc*. (b) Forme de la pastille supraconductrice utilisée (écran magnétique).

#### III.3.1 Choix de type de la pastille SHTc

Comme on a vu dans les chapitres précédents, il existe différents types de matériaux supraconducteurs à haute température critique qui ont des propriétés physiques intéressantes. Ces matériaux se trouvent sous plusieurs formes dans l'industrie, dont les plus connus sont de la forme filaires, les tubes, les rubans, et les pastilles ou bulks. Ces derniers peuvent être trouvés dans l'industrie sous plusieurs structures, forme cubique, cylindrique et hexagonale. On s'intéresse dans notre étude au bulk supraconducteur en YBCO. Ce dernier peut être utilisé avec une densité de courant et un champ magnétique plus élevés, il offre aussi la possibilité de le refroidir et de fonctionner à la température de l'azote liquide **77K**. La figure III.3 montre une photo d'une pastille **SHTc** en YBCO de forme cubique.

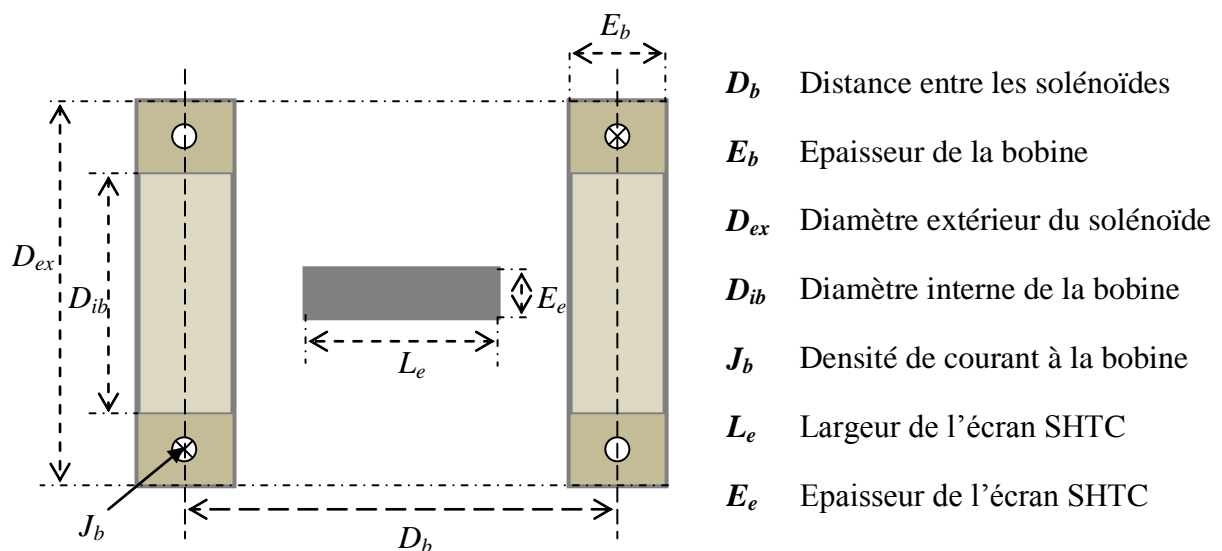


**Figure III.3 :** Forme réelle d'une pastille supraconductrice en YBCO (50mmx30mm).

Au dessous de ces valeurs critiques ( $T_c$ ,  $H_c$  et  $J_c$ ) du matériau, l'YBCO peut expulser tous les lignes de champ externes de sa surface (effet Meisner). Ce phénomène est observé suite à la création d'un champ magnétique dans le matériau qui oppose à la variation de champ externe appliqué. A la base de cette caractéristique ce matériau est utilisé dans plusieurs domaines, en particulier la lévitation magnétique et les moteurs électriques.

### III.3.2 Paramètres de la structure étudiée

Les paramètres du dispositif utilisés sont rappelés sur la figure III.4 suivante. Le domaine comporte deux bobines (solénoïdes) afin de créer un champ magnétique axial dans l'espace contient d'écran supraconducteur. Ce dernier, joue le rôle d'une barrière à la ligne de flux.



**Figure III.4 :** Paramètres de dispositif étudié.

## Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

### III.3.3 Choix du modèle de la pastille SHTc

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).

$\mu$ : Perméabilité magnétique du milieu (H/m).

$\rho$  : 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 1).

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



## Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTC

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 suivante :

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

L'équation (III.7) est la relation utilisée pour les supraconducteurs dans la modélisation des problèmes de pénétrations de champ magnétique. Avec  $\mu_0$  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.3.4 Méthode de calcul adoptée

La topologie de la structure de domaine d'étude (bobine avec pastille) exige un modèle de calcul tridimensionnel. On va étudier les performances d'écrantage de champs magnétiques par les matériaux supraconducteurs considérés sous forme des écrans SHTC. Cela dépend directement de la capacité de ces bulks, dans les conditions favorables, à induire des courants ou bien à engendrer des champs magnétiques qui s'opposent à la variation des champs externes appliqués à ces matériaux. Pour traiter ce problème fortement non linéaire nous allons faire une étude numérique tridimensionnelle basée sur le logiciel *FLUX 3D*. Ce logiciel possède une bibliothèque très riche de solveurs directs et itératifs et offre aussi la possibilité de pris en compte du modèle non linéaire qui caractérise les matériaux supraconducteurs. Lors de cette étude nous allons traiter :

- Le champ magnétique engendré dans le matériau supraconducteur: due par l'application d'un champ magnétique externe, crée par la circulation d'un courant électrique dans les deux solénoïdes qui sont placées en opposition.
- La concentration du champ magnétique dans l'entourage du matériau *SHTC* : due à l'emplacement et à la position des pastilles entre les bobines (la zone d'air).

### III.4 Etapes de simulation

L'étude de la structure du dispositif est basée sur la méthode des éléments finis à l'aide de logiciel FLUX 3D. On s'intéresse dans notre étude à l'influence mutuelle entre le champ magnétique de la source et les écrans supraconducteurs afin d'envisager des applications réelles similaire à notre dispositif ciblé.

## **Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTC**

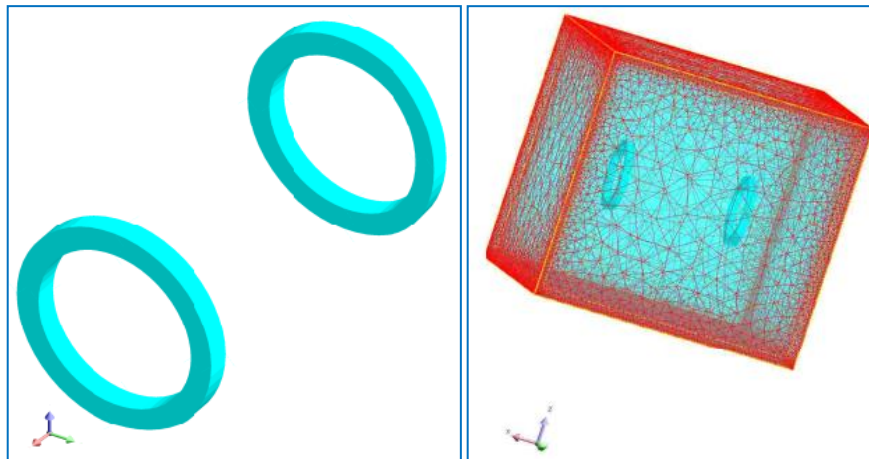
Le calcul de la distribution de champ magnétique dans le dispositif est accompli en trois étapes. Une première étape permet de déterminer le champ magnétique produit par les deux solénoïdes seuls. Une pastille *SHTC* est introduite dans l'espace situé entre ces deux sources de champ, cela admet de définir, d'une part, l'influence de la présence des écrans supraconducteurs sur la distribution de champ magnétique sur la longueur axiale du dispositif ainsi que de déterminer le champ magnétique engendré dans l'écran supraconducteur d'une autre part. Une autre étape similaire avec cette dernière, mais cette fois-ci l'écran magnétique présente des dispositions particulières entre l'espace des deux solénoïdes afin de déterminer les zones de concentration des lignes de flux. Enfin, la distribution de l'induction magnétique est envisagée en tenant compte de la présence d'un nombre élevé des écrans.

La simulation est faite pour une source de champ magnétique fixe, deux solénoïdes en opposition mais de même dimensions alimentées par un courant identique, et des écrans magnétiques de paramètres physiques constants mais des paramètres géométriques variant selon l'objectif à envisager.

### **III.5 Résultats de simulation**

#### **III.5.1 Simulation avec des bobines seules**

Dans un premier temps, en l'absence de pastille supraconductrice, le dispositif (bobines seules) est modélisé pour but d'avoir la répartition du champ magnétique (source) créée par la circulation d'un courant électrique dans les deux solénoïdes. La représentation en 3D des bobines ainsi que le maillage du domaine d'étude (bobines avec boîte d'air) sont montrés sur la figure III.5.



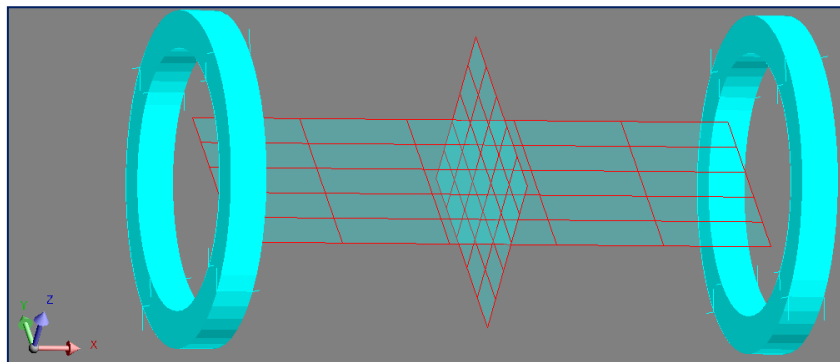
**Figure III.5 :** Schéma des bobines et maillage du domaine d'étude en 3D.

### Chapitre III Etude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

La figure suivante (III.6) montre les chemins de calcul du module de l'induction magnétique dont la grille 1 ((150x50) mm<sup>2</sup>) est située dans le plan XY et elle est subdivisée en cinq tronçons selon les deux axes X et Y, tandis que la grille 2 ((50x50) mm<sup>2</sup>) est placée dans le plan YZ mais elle est concernée par le même nombre de subdivisions (cinq tronçons) sur les axes Y et Z. Les dimensions géométriques des bobines sont aussi montrées au tableau III.1. Ces paramètres sont constants pour toute la suite de notre travail.

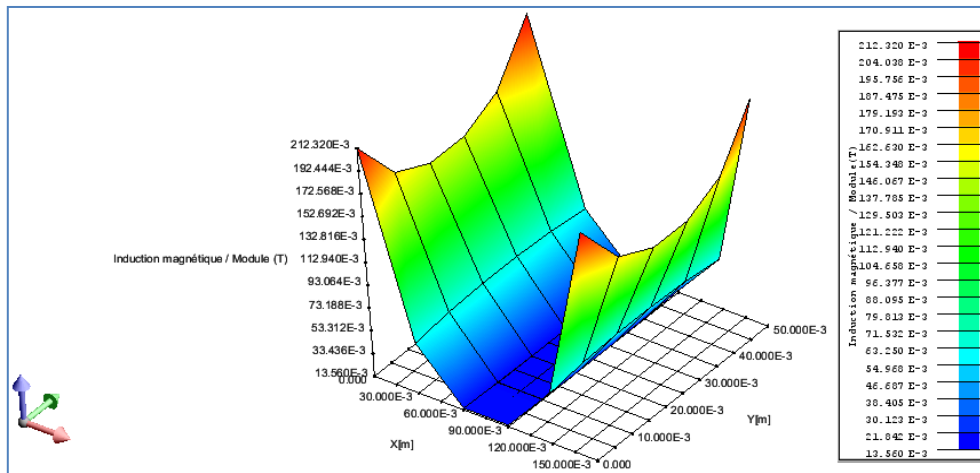
Indice	Valeur	Description du solénoïde
$D_{ex}$	100 mm	Diamètre extérieur
$D_{ib}$	80 mm	Diamètre intérieur
$E_b$	10 mm	Epaisseur
$D_b$	160 mm	Distance entre les deux bobines

**Tableau III.1** : Paramètres géométriques des deux solénoïdes.

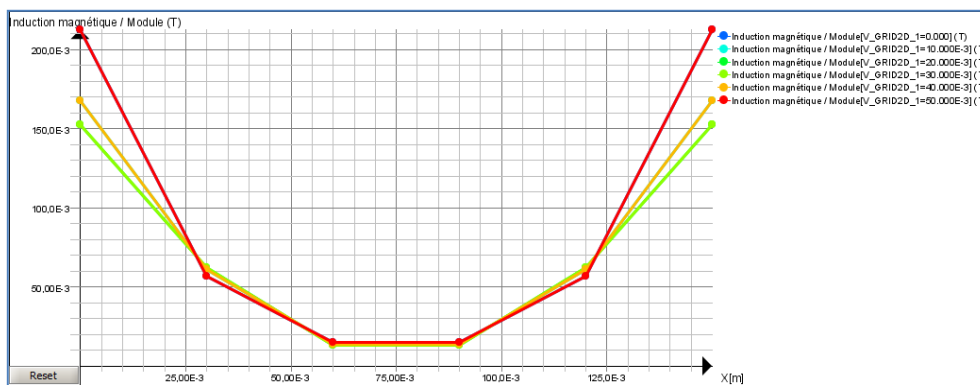


**Figure III.6** : Chemin pour la représentation de l'induction magnétique entre les deux solénoïdes ; grille 1 : dans le plan XY, grille 2 : dans le plan YZ.

La figure suivante (III.7) montre la distribution du module de l'induction magnétique (B) créée par la circulation d'un courant de 25 A dans les deux solénoïdes. La représentation tridimensionnelle (3D) et bidimensionnelle (2D) du module de B sur la grille 1 est donné par la figure (III.7a), (III.7b) respectivement. On remarque que l'induction magnétique sur la grille 1 présente une valeur minimale environ 0,013 T au milieu et une valeur maximale de 0,212 T sur les quatre coins extérieurs. Une symétrie dans la distribution de module de B sur la grille est remarquée pour les paires (y=0mm, y=50mm), (y=10mm, y=40mm), (y=20mm, y=30mm), figure (III.7a). Les valeurs maximales de B sont rencontrées dans les bornes externes de la grille car ils sont les plus proches aux bobines de champ (les deux solénoïdes).



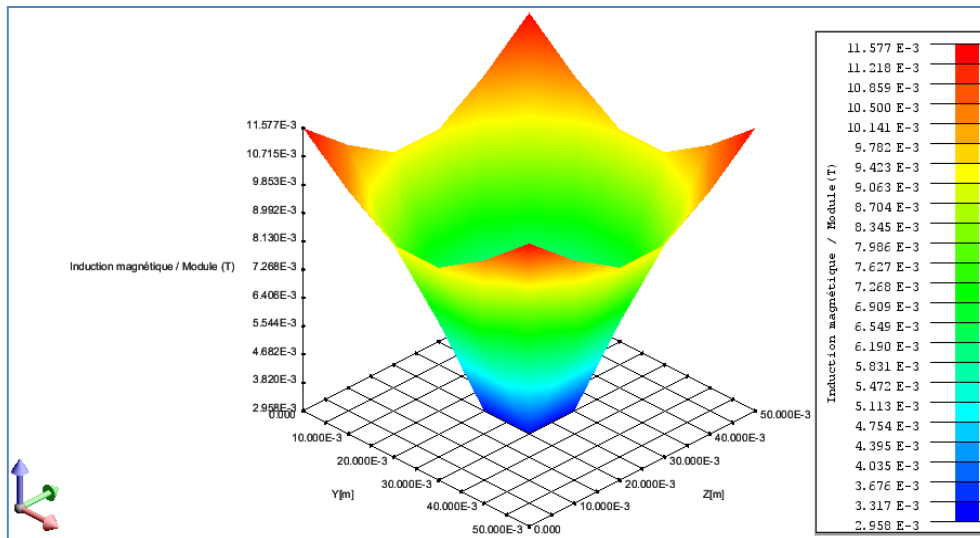
« a »



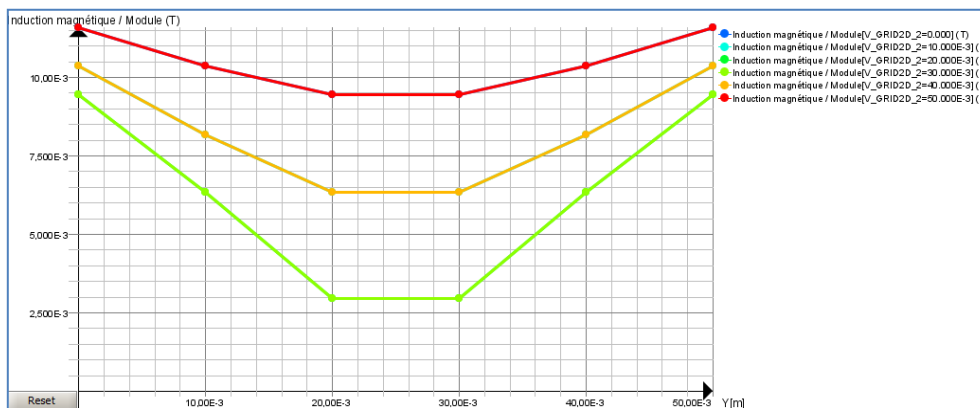
« b »

**Figure III.7 :** Représentation de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes, sur la grille 1 ; « a » : en 3D et « b » : en 2D dont V\_GRID\_2D\_1 représente l'axe Y.

La distribution de l'induction B sur la grille 2 est illustrée sur la figure (III.8) suivante. Le champ dans ce cas est varié entre environs 0,003 T et 0,012 T dont les faibles valeurs sont situées au milieu de la grille et les valeurs maximales sur les bornes. On remarque aussi une symétrie dans la distribution de B sur la grille selon les paires (Z=0mm, Z=50mm), (Z=10mm, Z=40mm), (Z=20mm, Z=30mm), figure (3.8b).



« a »



« b »

**Figure III.8 :** Représentation de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes, sur la grille 2 ; « a » : en 3D et « b » : en 2D dont V\_GRID\_2D\_2 représente l'axe Z.

### III.5.2 Simulation avec pastille entre les bobines

Dans ce cas de simulation en place une pastille supraconductrices entre les deux solénoïdes comme le montre sur la figure (III.9). Sur le tableau III.2 on trouve les paramètres géométriques et physiques de la pastille supraconductrice utilisée. La largeur de l'écran supraconducteur à haute température critique (SHTC) est de 20 mm.

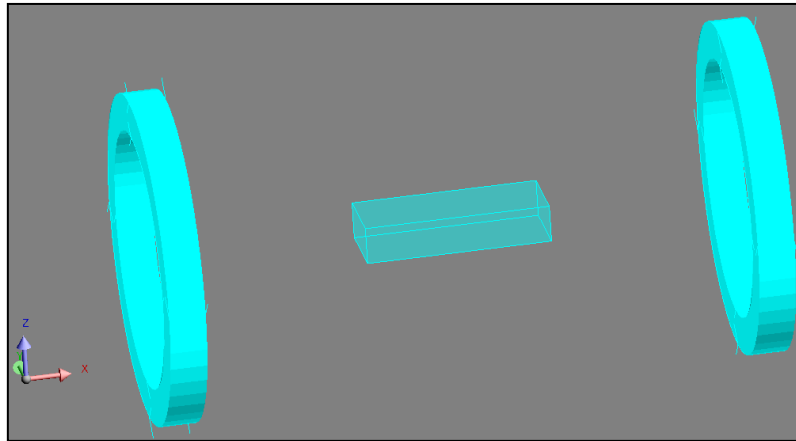


Figure III.9 : Représentation 3D du domaine d'étude (solénoïdes & pastille SHTc).

Caractéristique	Valeur	Description
$E_c$	$10^{-4}V$	Champ électrique critique
$J_c$	$5.10^8 A /m^2$	Densité de courant critique
$n$	30	Exposant de la loi en puissance
$Le$	50 mm	Longueur de l'écran
$Ee$	10 mm	Epaisseur de l'écran

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques et physiques de la pastille supraconductrice.

Nous considérons aussi le modèle de la loi en puissance, présenté dans le chapitre 2, comme loi de comportement du matériau supraconducteur. La pastille supraconductrice est conservée à une température inférieure à sa température critique  $T_c$ . Pour notre application, la pastille SHTC fonctionne autour de 77 Kelvin.

La figure III.10 illustre le maillage, avec des éléments triangulaires, effectué au volume de la pastille supraconductrice.

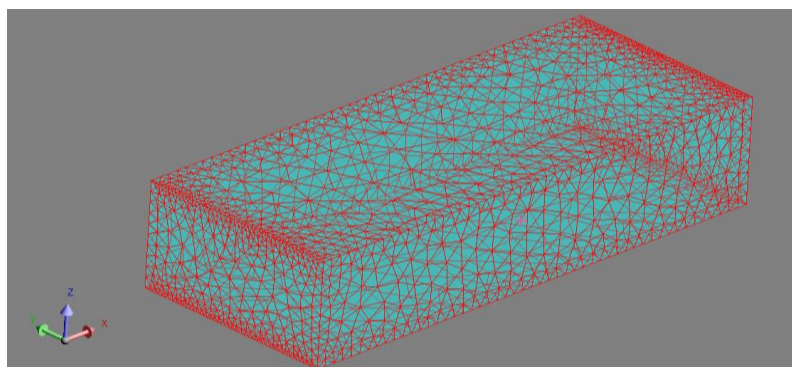
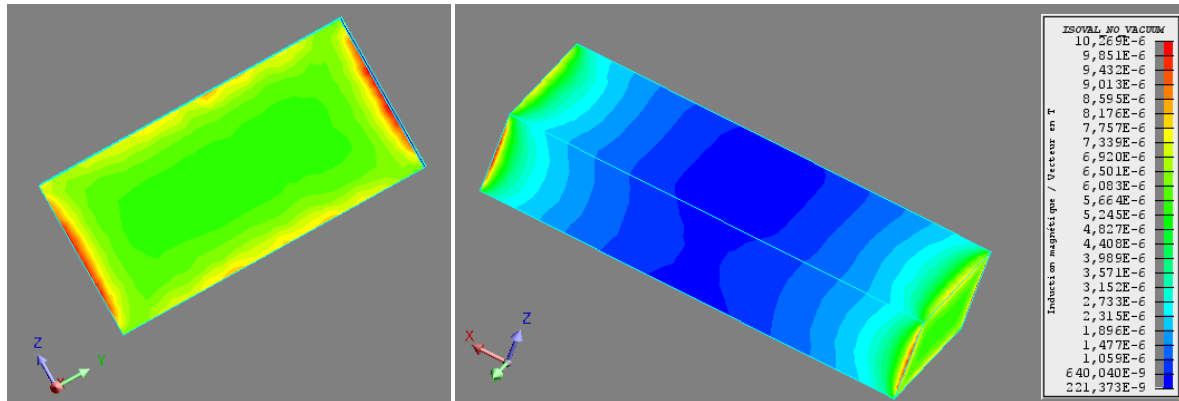


Figure III.10 : Représentation 3D du maillage au niveau de la pastille SHTc.

## Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

La distribution de l'induction magnétique sur le volume de la pastille est obtenue à l'aide d'une simulation numérique sous FLUX3D, figure III.11.



**Figure III.11** : Représentation 3D des valeurs de l'induction magnétique dans la pastille SHTc.

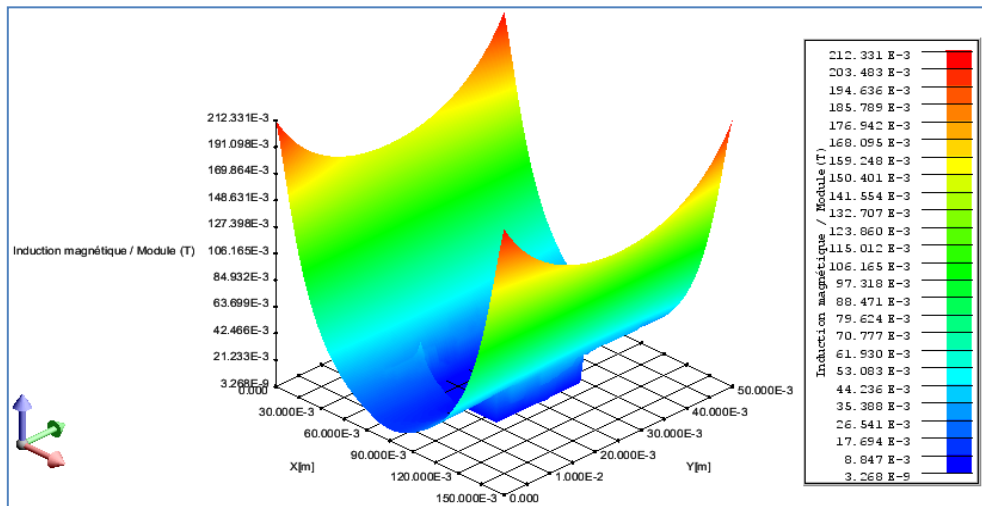
D'après la figure (III.11), on remarque que la distribution du champ magnétique est uniforme sur la structure de la pastille. Une petite densité de champ est observée sur la surface des deux côtés de l'écran, parties proches des solénoïdes, cela se traduit par la création des courants induits sur ses surface afin de supposée à la variation du champ magnétique crée par les bobines. La valeur de cette densité du champ, dans la pastille, est diminuée progressivement vers le centre du volume. Donc on observe des valeurs maximales de l'ordre  $10^{-5}$  T sur les cotés avec des valeurs très faible au centre de bulk (de l'ordre de  $10^{-7}$  T), on note également que la pénétration de champ sur les cotés de chaque surface est identique puisque ces bords de la surface de la pastille sont exposés à la même densité de champ de source.

Dans l'entourage de la pastille maintenant, les valeurs de champ magnétique maximales observés (0,212 T) sont identiques aux celles rencontré lors de la simulation sans pastille, figure III.12a. Par contre, on observe des valeurs pratiquement nulles sur l'endroit de la pastille (0,05m - 0,1m) seulement on remarque des très faible valeurs du champ aux distances (0,05m - 0,06m) et (0,09m - 0,1m) dues aux petite pénétrations de champ sur les deux cotés de l'écran, figure III.11 et III.12b.

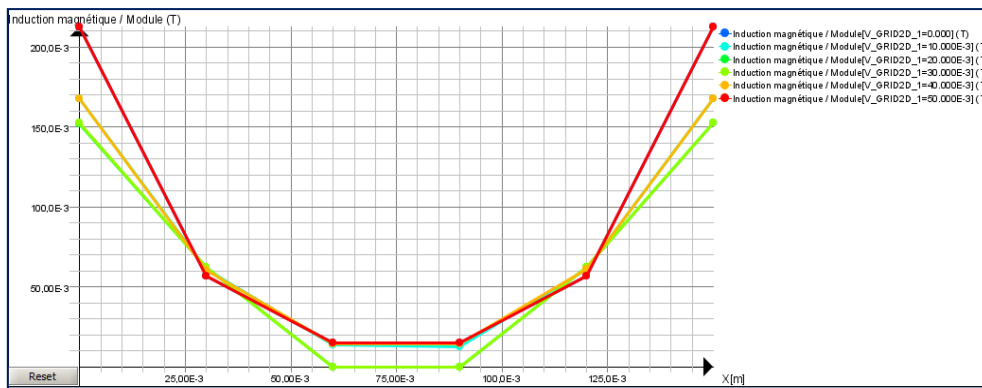
On conclue donc que la présence de l'écran provoque un changement dans la distribution totale de champ magnétique (qui varié entre  $3 \cdot 10^{-9}$  T et 0,212 T), car la pastille empêche la pénétration des lignes de champ externe à ses surfaces plan (XY). Selon le plan YZ, la pastille présente aussi le même comportement vis à vis le champ externe, on observe

# Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

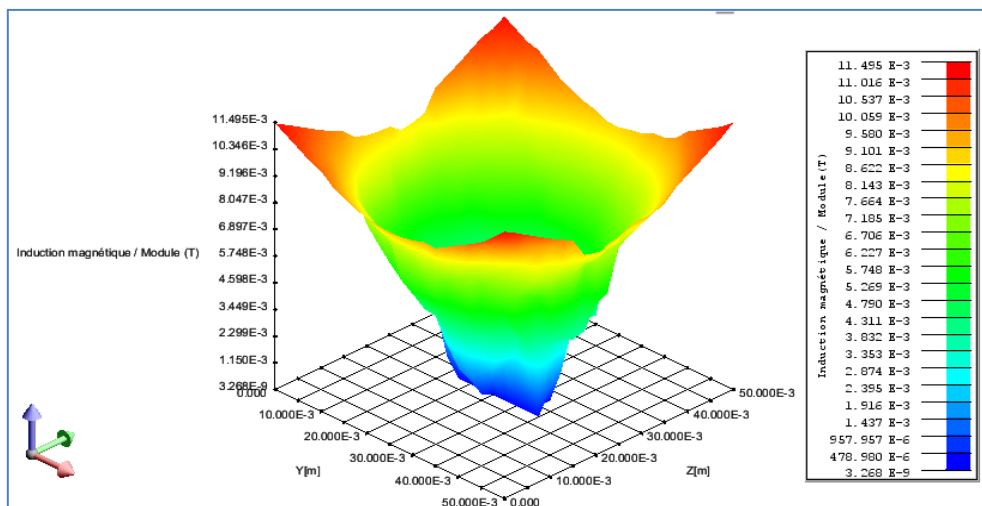
des valeurs pratiquement nulles (de l'ordre de  $10^{-9}$  T) au niveau du matériau supraconducteur, figure III.12c.



« a »



« b »



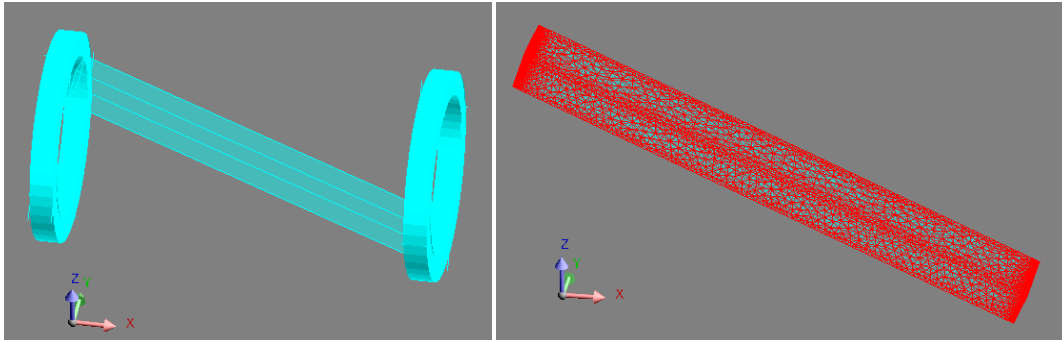
« c »

**Figure III.12 :** Représentation de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de la pastille SHTC. Sur la grille 1 ; « a » : en 3D et « b » : en 2D dont  $V\_GRID\_2D\_1$  représente l'axe Y. Sur la grille 2 ; « c » : en 3D



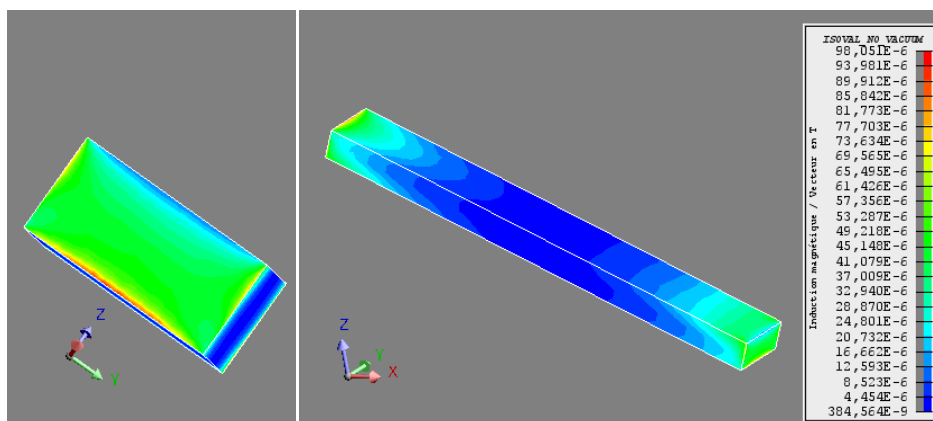
### III.5.3 Simulation avec pastille inclinée

Dans cette partie, la pastille SHTC, de dimension  $(160 \times 20 \times 10) \text{ mm}^3$ , est placée entre les solénoïdes selon la position (inclinée) représentée sur la figure III.13.



**Figure III.13 :** Schéma 3D du domaine d'étude (à gauche) et maillage de la pastille inclinée (à droite).

D'après la figure (III.14), on remarque que la distribution du champ magnétique n'est pas uniforme sur la structure de la même surface de la pastille, par contre elle est identique sur les surfaces en opposition (haut et bas), (droite et gauche), (latérale droite et gauche). Une petite densité de champ est aussi observée sur la surface des deux coins (proches de chaque solénoïde) de l'écran puisqu'ils sont les plus exposés aux champs de la source. Cependant, le champ magnétique au centre de volume de la pastille est pratiquement nul.

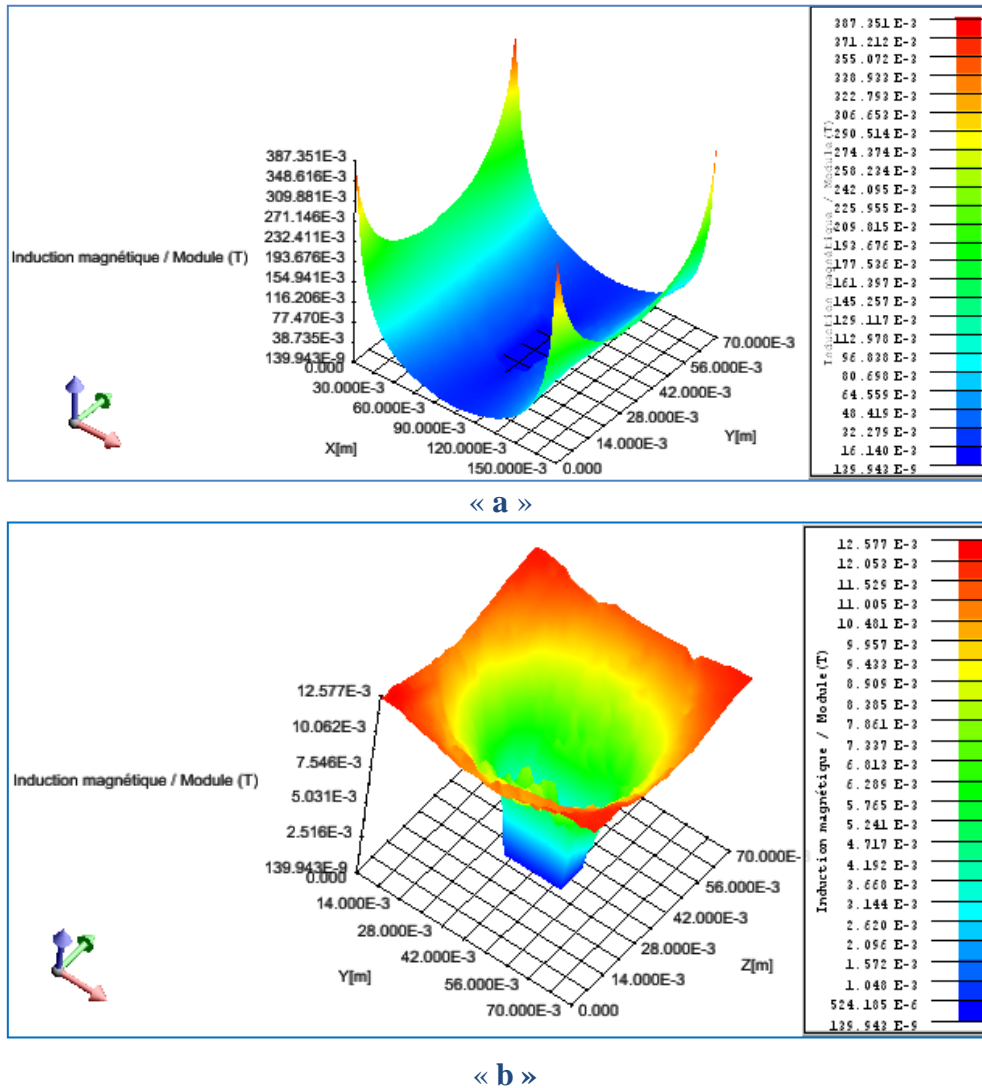


**Figure III.14 :** représentation de la distribution de champ dans la pastille inclinée.

La pastille supraconductrice utilisée dans cette simulation fonctionne comme une barrière de flux donc elle empêche le passage du champ magnétique de la partie supérieur vers la partie inférieur et vis versa. Les lignes de champ dans ce cas sont orientées vers le haut

### Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

et le bas de la pastille. La figure III.15 représente la distribution du champ magnétique sur la grille 1(150x70) mm<sup>2</sup>, et sur la grille 2 (70x70) mm<sup>2</sup>. On observe une symétrie dans la répartition des valeurs de l'induction magnétique en haut et en bas de l'écran supraconducteur.

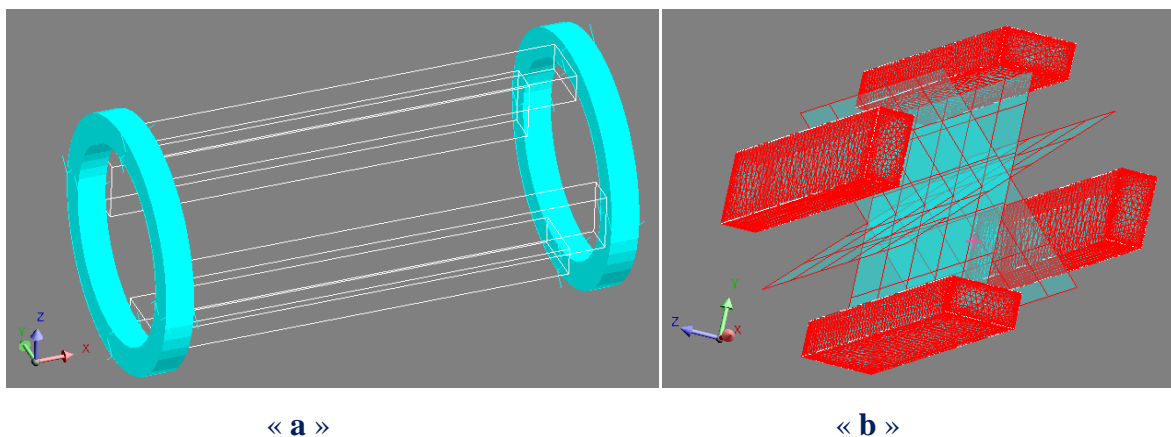


**Figure III.15 :** Représentation tridimensionnelle de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de la pastille SHTC sous forme inclinée ; « a » : Sur la grille 1 et « b » : Sur la grille 2.

Dans cette partie, nous avons étudié le principe d'écrantage de la pastille supraconductrice insérée avec une position inclinée entre les deux solénoïdes. Sur la base de ce principe (déviations de flux) une topologie d'une machine avec une paire de pôles a été conçue, mais cette fois-ci les solénoïdes sont alimentés par des courants de même sens afin d'avoir les deux pôles nécessaires pour un fonctionnement assimilé à celui des machines synchrones à griffe avec un guidage de flux [31], voir chapitre 2.

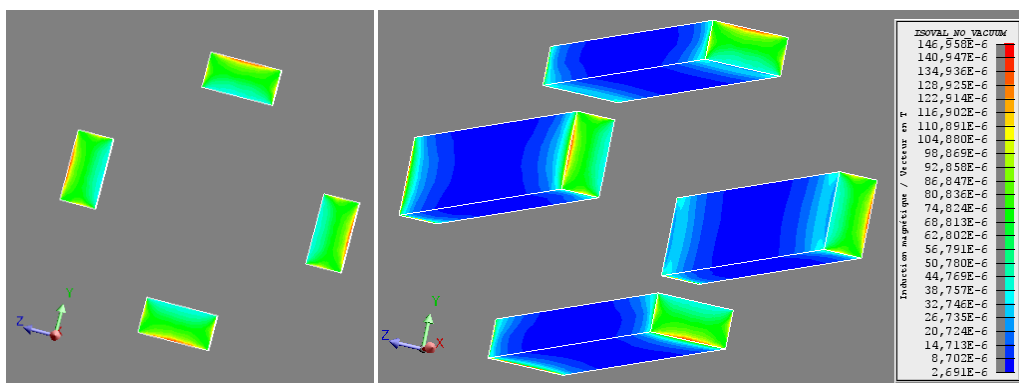
### III.5.4 Simulation avec quatre pastilles inclinées

Le domaine d'étude dans cette partie est constitué de quatre pastilles supraconductrices identiques ( $150 \times 20 \times 10$ ) mm<sup>3</sup> placées entre les deux solénoïdes précédents comme le montre sur la figure III.16. Les solénoïdes sont alimentés par des courants inversés de 25A afin de créer le champ de source autour des quatre écrans qui sont considérés comme barrière de flux dans les quatre positions. Trois grilles sont envisagées pour présenter la distribution de champ magnétique, la première grille est placée dans le plan XY avec une dimension de ( $150 \times 70$ ) mm<sup>2</sup>, la deuxième et la troisième grilles sont inclinées par rapport à la première de ( $45^\circ$ ) et ( $-45^\circ$ ) respectivement, figure III.16.



**Figure III.16 :** Schéma 3D du domaine d'étude ; « a » : 4 pastilles entre les solénoïdes, « b » : maillage des pastilles et représentation des grilles.

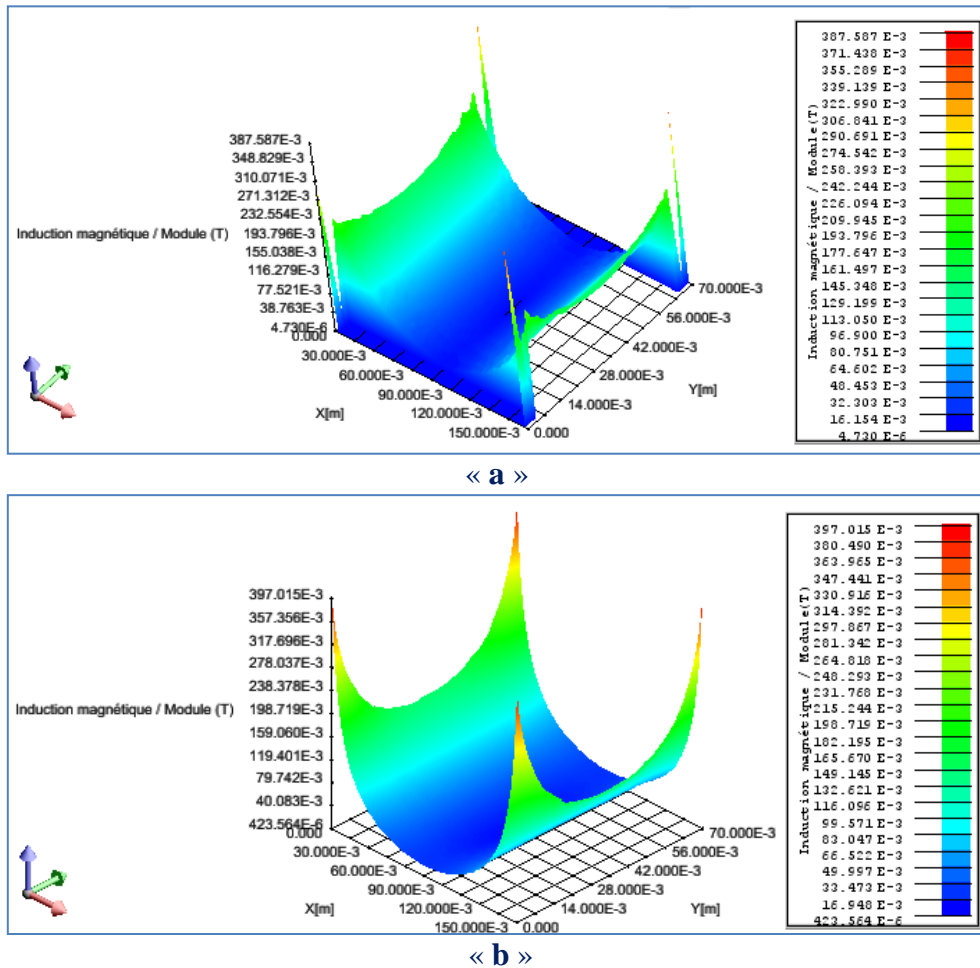
La figure III.17 représente la distribution de champ magnétique sur les surfaces des quatre écrans, on observe une parfaite symétrie de la pénétration des lignes de flux entre les surfaces des quatre écrans. Les surfaces externes des pastilles sont les plus influencées par les champs de la source, pour cela on note des valeurs de champ de l'ordre de  $10^{-5}$  T sur les coins des surfaces externes.



**Figure III.17 :** Représentation de la distribution de champ dans les quatre pastilles SHTc.

### Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

Les écrans supraconducteurs ne laissent pas les lignes de flux externes de passer par leurs surfaces, donc ces lignes de champ vont passés par les quatre espaces (vides) entre les pastilles. Leurs propriétés à expulser le champ magnétiques modulent l'induction obtenue en une induction variable sur le contour de la structure du domaine. Une valeur minimale proche de zéro est observé derrière les pastilles supraconductrices (figure III.18a) et une valeur maximale est notée entre les écrans (figure III.18b). On note que la représentation de B sur la grille 3 est identique à celle de la grille 2.



**Figure III.18 :** Représentation 3D de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de quatre pastilles SHTC; « a » : Sur la grille 1, « b » : Sur la grille 2.

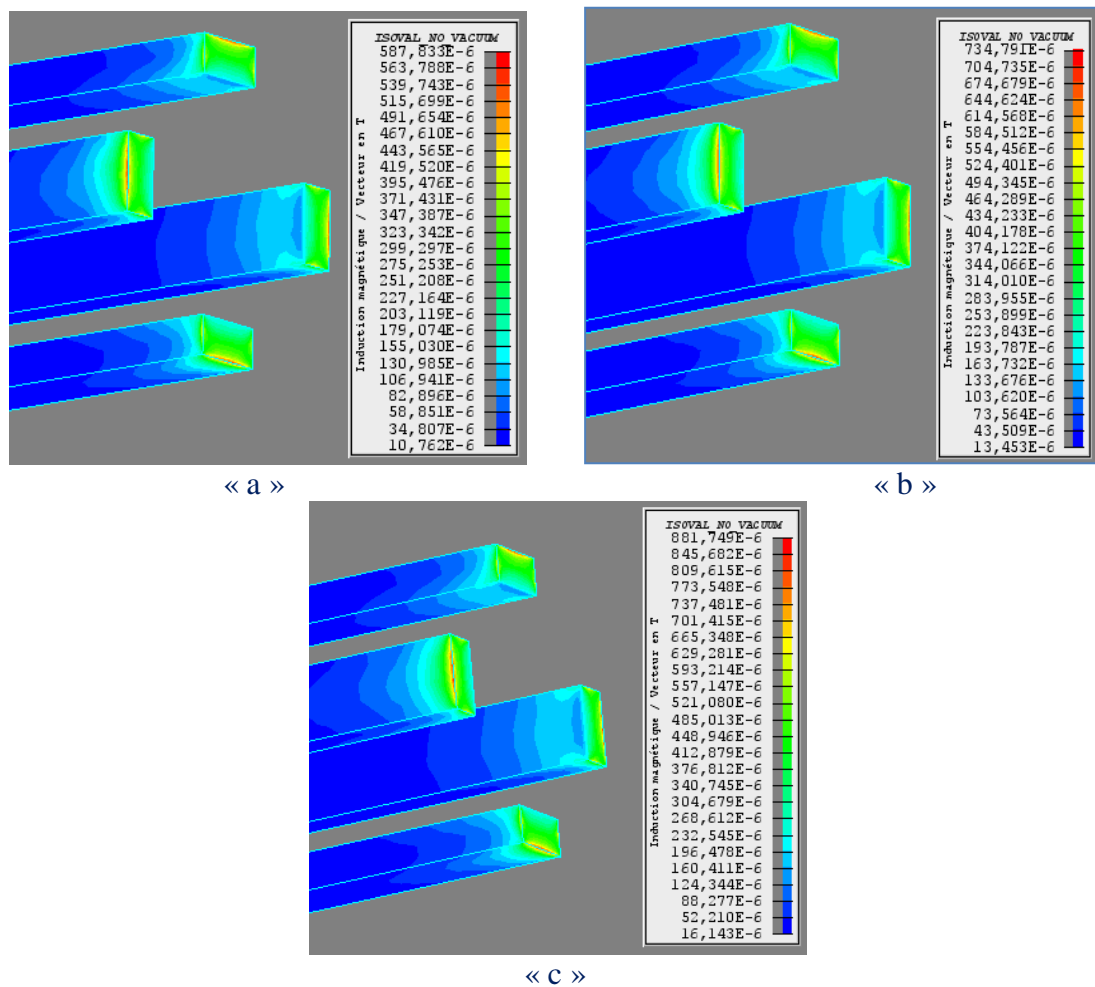
D'après les résultats de simulation au-dessus on remarque que l'induction magnétique créée est relativement faible (0,2 à 0,4 T), cette dernière qui est engendrée est alors directement proportionnelle aux courants dans les solénoïdes [33], [34]. Alors pour avoir des valeurs importantes de B il faut imposer des valeurs plus élevés des courants dans les solénoïdes. Néanmoins, le courant dans un bobinage en cuivre possède une limitation dans la valeur de courant appliqué à cause des pertes enregistrées. Nous proposons donc un bobinage

## Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc

supraconducteur à la place des solénoïdes en cuivre. Les fils supraconducteurs peuvent supporter des valeurs de courants importantes avec des pertes négligeables.

Dans ce cas de simulation on applique des valeurs de courant électrique élevés (**100A**, **125A** et **150A**) en sens inverse dans les deux solénoïdes supraconducteurs.

On remarque sur la figure III.19 que le champ de pénétration dans les pastilles est en proportion direct avec le courant appliqué dans les solénoïdes. Pour le courant de **100A**, une induction de l'ordre de  $5,8 \cdot 10^{-4} T$  est enregistrée et environ  $9 \cdot 10^{-4} T$  avec **150 A**. Ces valeurs de **B** n'influent pas beaucoup sur l'état des pastilles supraconductrices et on peut aller encore vers des valeurs de courants élevés.

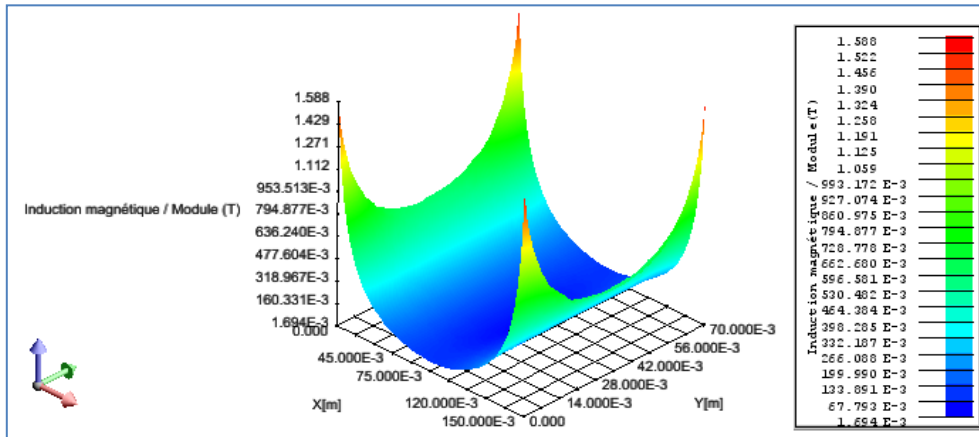


**Figure III.19** : Représentation de la distribution de B dans les quatre pastilles SHTC avec un courant de ; « a » : 100 A, « b » : 125 A et « c » : 150 A.

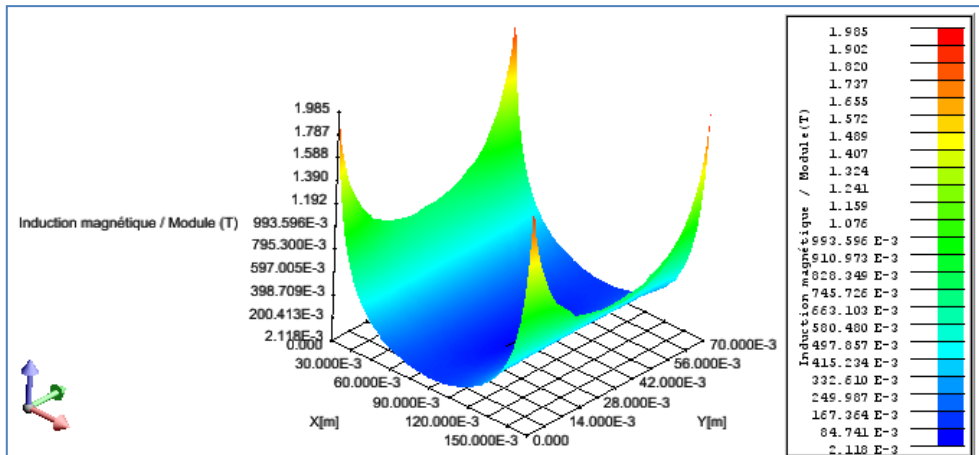
La figure III.20, montre la distribution des nouvelles valeurs de l'induction magnétique dans le dispositif étudié. On observe des valeurs maximales importantes de **B** de **1,5 T**, **1,9 T** et **2,3 T** respectivement avec les valeurs des courants appliqués cités précédemment. On

### Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTC

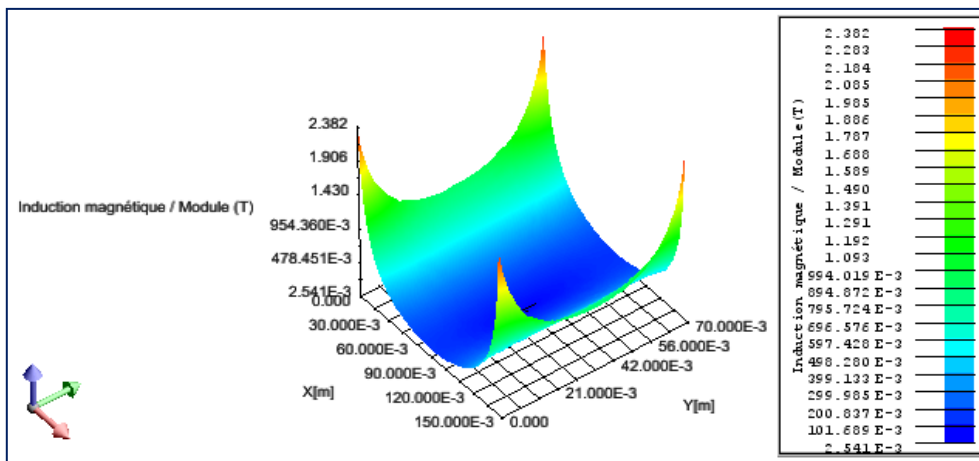
conclue donc que l'utilisation d'un bobinage supraconducteur est indispensable, autrement dit très avantageux pour la création des valeurs de l'induction souhaités.



« a »



« b »



« c »

**Figure III.20 :** Représentation 3D de l'induction magnétique créée par les deux solénoïdes à la présence de quatre pastilles SHTC sur la grille 2 pour un courant de ; « a » : 100 A, « b » : 125 A « c » : 150 A.

## **Chapitre III Étude du champ magnétique à la présence des écrans SHTc**

Dans cette partie, les propriétés d'écrantage des pastilles SHTC pour moduler et concentrer le champ produit par les deux solénoïdes supraconducteurs sont étudiées. Cette structure de base a été aussi utilisée pour la conception d'une nouvelle topologie d'un rotor d'une machine supraconductrice [33], [34] dans le but d'envisager des inductions magnétiques d'entrefer plus importantes afin d'obtenir de fort couple massique.

### **III.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié le principe d'écrantage de champ magnétique d'un matériau supraconducteur massif. Ce dernier a été exposé à un champ magnétique externe engendré par des solénoïdes. Une étude numérique éléments finis avec le logiciel FLUX 3D a été réalisée.

Notre étude a permis de déterminer l'effet du champ magnétique sur les matériaux supraconducteurs massifs ; le mécanisme de pénétration de champs dans le volume de la pastille d'un côté, et l'effet de la présence de supraconducteur sur la distribution ou l'orientation du champ magnétique d'un autre côté. Nous avons constaté que les matériaux supraconducteurs à haute température critique sous forme des écrans magnétiques sont très intéressants dans le domaine de l'électrotechnique, en particulier pour la conception des nouvelles topologies des machines électriques supraconductrices de fort couple massique.

*Conclusion générale*



### Conclusion Générale

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire, concerne l'étude de comportement des matériaux supraconducteurs à haute température critique (SHTC) lors de son fonctionnement dans les dispositifs électromagnétiques. Un supraconducteur massif peut expulser ou dévier les lignes de champ externes de son volume lorsqu'il est utilisé comme un écran magnétique, ce phénomène a pris largement de place surtout en électrotechnique, en particulier pour la conception de nouvelles topologies des machines électriques. De ce fait, on a décidé d'analyser ce comportement d'écrantage des pastilles supraconductrices lorsqu'elles soumises à des champs magnétiques externes.

Nous avons débuté notre travail par une recherche bibliographique approfondie. Cette première étape a été bien établie au premier et au deuxième chapitre sous forme d'un guide technologique sur les supraconducteurs à basse et à haute températures critiques et leurs applications en particulier dans le domaine de l'électrotechnique, dont le but est d'enrichir notre connaissance sur les matériaux SHTC massifs comme les pastilles supraconductrices, d'une part, et d'observer les évolutions rapides de ces matériaux ainsi de connaître les modèles les plus adaptés au comportement des supraconducteurs d'une autre part.

Dans la deuxième étape, une étude numérique tridimensionnelle avec le logiciel FLUX 3D a été faite. On a étudié la distribution du champ magnétique dans le volume et autour d'une pastille supraconductrice placée entre deux solénoïdes identiques. Notre simulation est basée sur le modèle de loi en puissance comme loi de comportement du matériau supraconducteur. Des résultats très intéressants ont été obtenus lors de la simulation du dispositif, notamment ce qui concerne la distribution de champ magnétique de pénétration dans l'écran selon la position de ce dernier vis-à-vis le champ de source. De plus, on a présenté la distribution de l'induction magnétique autour du matériau. Pour cela on a rencontré deux modes de l'utilisation des écrans supraconducteurs tels que, à déviation de flux (cas d'une pastille inclinée) et à modulation de flux (cas de quatre pastilles sur le contour du dispositif).

La valeur de l'induction magnétique obtenue n'est pas suffisante car la valeur de courant appliqué au niveau des solénoïdes en cuivre est limitée. On a affranchi cette limitation par la considération d'un bobinage supraconducteur, donc des courants importants peuvent être considéré dans les solénoïdes et par conséquent des inductions magnétiques intéressantes de 2 T et plus sont présentées. Ces derniers sont à la base de création des pôles pour la conception des inducteurs de nouvelles topologies dans les machines synchrones.

## **Conclusion Générale**

---

En termes de perspectives, il reste à développer notre étude pour le calcul :

- Du champ magnétique dans la pastille en présence du matériau ferromagnétique.
- De l'induction magnétique pour la conception des nouvelles topologies des dispositifs électromagnétiques.



*Référence Bibliographiques*

## Références Bibliographiques

- [1] Bouchekhou Hocine." Etude d'un machine synchrone à base d'élément supraconducteur "Thèse de Doctorat de l'Université de Jijel, 2019.
- [2] Ouari Ahmed «réalisation et caractérisation de jonction Josephson YBaCuO/PrBaCuO. Applications à la commande électrique» thèse de doctorat, université de Badji Mokhtar – Annaba, 2007.
- [3] A. Belayachi «matériaux supraconducteurs» chapitre 10 module physique des matériaux I, Université Mohammed 5 rebat, 2015.
- [4] Bendaoud Mohamed Abed Elhalim , Hafiane Mohamed Tarek «Modélisation des Phénomènes magnéto-thermique dans les dispositifs de limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique» Mémoire Master Académique, Université kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [5] Abdellah Tnourji «les caractéristiques des matériaux supraconducteurs» publications, Université Clermont Auvergne, <https://www.researchgate.net/publication/33138123>, février 2019.
- [6] Sam chouaib «élaboration et caractérisations d'échantillons supraconducteurs de laphase Bi2212» thèse de doctorat, Université de frères Mentouri Constantine 1, 13/06/2019.
- [7] Nemdili saad «Modélisation et simulation du limiteur de courant supraconducteur», Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif-1, Electrotechnique, 2013
- [8] Yassine Slimani, essia hannachi «superconducting materials.fundamentals synthesis and application» livre, Université Imam Abdulrahman Bin Faisal, 2022 .
- [9] Yannick Cointe «limiteur supraconducteur de courant continu», Thèse de doctorat, Génie Electrique, Grenoble et à l'Institut Néel, 2007.
- [10] Maraf Halla, Necib Zaineb «Analyse de L'énergie Dissipative Dans Les Limiteurs de Courant Inductif Pour Les Systèmes D'énergie», Thème de mémoire, Université Kasdi Merbah Ouragla en génie électrique, 2018.
- [11] Bastien Dolisy «Etude d'un moteur supraconducteur à flux axial avec une transmission magnétique supraconductrice intégrée» thèse de doctorat, Université de Lorraine en génie électrique, 2015.
- [12] Ben Alia Khaled «Etude de la Lévitacion Magnétique entre les Aimants Permanents etles Supraconducteurs» Thème de mémoire, Université Mohamed Khider de Biskra, 2009.
- [13] Iszabela Klutsch «modélisation des supraconducteurs et mesures» Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble france, le 26 Septembre 2003.
- [14] Khaled ben allia «étude des systèmes de guidage magnétique à base de supraconducteur HTC» Thèse de Doctorat, Université Mohamed khider de Biskra, 2013.
- [15] Ouldbih Talha «Méthode simplifiée pour l'étude des systèmes de lévitation à base de supraconducteur HTc» Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed Khider de Biskra, 2012.
- [16] G. Dorofejev, A. Imenitov, et E. Klimenko «Voltage current characteristics of type III superconductors» Cryogenics, vol. 20, no. 6, p. 307-312, 1980.
- [17] K. Higashikawa, T. Nakamura et T. Hoshino «Anisotropic distributions of CurrentDensity and electric field in Bi-2223/Ag coil with consideration of multifilamentary structure» Physica C: Superconductivity, vol. 419, no. 3-4, p. 129-140, 2005.
- [18] P. Bruzzone «The index n of the voltage–current curve, in the characterization and specification of technical superconductors» Physica C: Superconductivity, vol. 401, no. 1-4, p. 7-14, 2004.

- [19] Mohamed Albaa «Caractérisation et modélisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique» Thèse de doctorat, Ecole Doctorale IAEM- Lorraine, 2020.
- [20] Louis Dupont «Développement d'un dispositif de champ magnétique réversible à base des cryo-aimants supraconducteurs» Thèse de doctorat, Université Normandie, 2018.
- [21] Jakub kapek «Modélisations 2D et 3D, conception et réalisation d'un inducteur pour aimanter un ensemble de pastilles supraconductrices» thèse de doctorat, Université de lorraine en génie électrique, 2021.
- [22] Gaël. Malé, « Etude d'une structure d'inducteur supraconducteur à modulation de champ magnétique », Thèse de doctorat, Université de lorraine Nancy, France ,2013.
- [23] C. Tristan «Développement de conducteurs à base d'YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> sur des substrats flexibles par MOCVD» Thèse Doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2008.
- [24] Cyrot Michel «La supraconductivité et ses applications» Article:008, nouvelle recherche, Mots clés : Électricité Stockage de l'énergie Supraconductivité, Avril 2014.
- [25] S. Denis, L. Dusoulier, M. Dirickx, Ph.Vanderbemden, R. Cloots, M. Ausloos, B. Vanderheyden «Magnetic shielding properties of hightemperature superconducting tubes subjected to axial fields» Supercond. Sci. Technol.,20, pp. 192–201, 2007.
- [26] R. Alhasan, T. Lubin, B. Douine, Z. M.Adilov, J. Lévêque «Test of an Original Superconducting Synchronous Machine Based on Magnetic Shielding» IEEE Trans. Applied Superconductivity, 26 (4), 5204005, june 2016.
- [27] A. Colle, T. Lubin, O. Gosselin, J. Lévêque «Superconducting machine for Aircraft application» EUCAS 2017 - 13th European Conference on Applied Superconductivity, 2017.
- [28] Thierry Lubin «Contribution a la modélisation analytique des actionneurs électromécanique» Thèse de doctorat, Université de Lorraine , 2016.
- [29] Rada ALHASAN « Etude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur Synchrone Supraconducteur» Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 24 Février 2015.
- [30] Slitane Ahmed «Modélisation d'une Turbine Eolienne Reliée à une Génératrice Supraconductrice» Thème de mémoire, Université Saad Dahlab, 2018.
- [31] Renaud Moulin « Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs» Thèse de doctorat, Université de lorraine Nancy, france ,2010.
- [32] Sofiane Bendali «Dimensionnement d'un moteur supraconducteur HTc» Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [33] P. Masson, « Etude d'écran supraconducteur à haute température critique massif, Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale », Thèse de doctorat, Université de lorraine Nancy, France ,2002.
- [34] E.H. Ailam, « Machine synchrone à plots supraconducteurs, Etude et réalisation», Thèse de doctorat, Université de lorraine Nancy, France ,2006.

***Résumé-Abstract-ملخص***

## Résumé

Dans ce travail nous avons étudié le comportement d'un matériau supraconducteur à haute température critique (SHTC) soumis à un champ magnétique externe (créé par deux solénoïdes alimentant avec un courant électrique). On a effectué une simulation numérique tridimensionnelle avec le logiciel Flux 3D pour le calcul de champ magnétique de pénétration (dans l'écran supraconducteur), basant sur le modèle de la loi en puissance comme loi de comportement du matériau. L'induction magnétique dans l'entourage de la pastille supraconductrice est aussi calculé afin d'étudier le mécanisme d'écrantage du supraconducteur et de concevoir de nouvelles topologies des dispositifs électromagnétiques notamment dans les machines électriques.

**Mots clés :** Pastille SHTC, Induction magnétique, Loi en puissance, Flux3D

---

---

## Abstract

In this work we study the behaviour of a height temperature superconducting materiel (HTS) presented with an external magnetic field (created by electrical current in two coils). Our simulation is effected with Flux 3D software for the calculation of the penetration magnetic field in the superconducting bulk. The power low model is considered us the behaviour model of the HTS bulk. The magnetic induction is also calculated in the total structure for study the expelled field system of the superconductor and development of new topologies of electromagnetic devises especially in electrical machines.

**Keywords :** Bulk SHTC, Magnetic induction, Power low model, Flux3D

---

---

## ملخص

في هذه المذكرة قمنا بدراسة سلوك مادة فائقة التوصيل تمتاز بالعمل في درجة حرارة عالية عند تعرضها لحقل مغناطيسي خارجي ناتج عن لفتين مولدتين بتيار كهربائي. تحليلاتنا المنجزة قمنا بها باستعمال برنامج الحساب FLUX3D لقياس الحقل المغناطيسي داخل وخارج الكتلة فائقة التوصيل. اعتمدنا في تحليلنا على علاقة قانون الاستطاعة لتحديد سلوك المادة. قمنا أيضا بدراسة خاصية طرد الكتلة لخطوط الحقل خارج حجمها وإمكانية استعمال هذه الميزة في اكتشاف نماذج جديدة من الوسائل الكهرومغناطيسية خاصة الآلات الكهربائية.

**كلمات مفتاحية:** الكتلة فائقة التوصيل، الحقل المغناطيسي، قانون الاستطاعة