



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
ELECTROTECHNIQUE  
MACHINE ELECTRIQUE

Réf. : ....

---

Présenté et soutenu par :

**Bey billel**                      **Ben makhloufe Yassine**

Le : JUIN 2022

## Différentes Techniques d'utilisation des matériaux supraconducteurs dans la conception des machines électriques

---

### Jury :

Pr	Titaouine abdenacer	Pr	Université de Biskra	Président
Pr	Boumaraf Rabia	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Dr	Derradji belloum karima	MCB	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

ELECTROTECHNIQUE  
MACHINE ELECTRIQUE

Réf. : ...

---

## Différentes Techniques d'utilisation des matériaux supraconducteurs dans la conception des machines électriques

Le : JUIN 2022

**Présenté par :**

Bey Billel

Ben makhlouf Yassine

**Avis favorable de l'encadreur :**

Ms.Boumaraf Rabia

**Signature Avis favorable du Président du Jury**

Mr. Titaouine Abdenacer

**Cachet et signature**

## REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la santé et la force  
durant tous les années de mon étude.

Je tiens à remercier également tous ma famille surtout Ma Méré et  
Mon Père et chaque person pour son aide pratique et son soutien  
moral et ses encouragements.

Nous remercions Mme Boumaraf Rabia pour l'aide d'encadrement et tous nos  
professeurs pour leur généreuse patience et persévérance malgré leurs lourdeurs  
académiques et professionnelles

# DÉDICACES

Je dédie ce travail à :

Chers parents.

Chers frères.

La famille Bey et Ben Makhlouf,

tous les amis et tous ceux qui nous aiment

# Résumé

---

L'utilisation des matériaux supraconducteurs dans le domaine de l'électrotechnique, plus précisément dans la conception des machines tournantes, a fortement relancé l'intérêt des chercheurs ces dernières années. Les supraconducteurs sont les matériaux du futur pour l'électrotechnique. Des machines incorporant des éléments supraconducteurs offrent une voie futuriste originale innovant pour les moteurs performants en termes de masse et de rendement, Ce travail traite de ce qu'est la supraconductivité en général, de ses applications les plus importantes et de la conception de machines supraconductrices à topologie originale.

## الملخص

---

أدى استخدام المواد فائقة التوصيل في مجال الهندسة الكهربائية، وبشكل أكثر تحديداً في تصميم الآلات الدوارة، إلى إحياء اهتمام الباحثين إلى حد كبير في السنوات الأخيرة. الموصلات الفائقة هي مواد المستقبل للهندسة الكهربائية. تقدم الآلات التي تحتوي على عناصر فائقة التوصيل مساراً مستقبلياً أصلياً مبتكراً للمحركات الفعالة من حيث الكتلة والكفاءة، ويتعامل هذا العمل مع ماهية الموصلية الفائقة بشكل عام، وأهم تطبيقاتها وتصميم الآلات فائقة التوصيل

Table Du Matière

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table Du Matière	
Table Du Figure	
Table Du Tableaux	
Notations symbolique et abréviations	
Introduction Générale	13
Chapitre I les supraconducteurs et leurs applications	
I.1.Introduction :	5
I.2. Historique de la supraconductivité	6
I.3. Propriétés élémentaires des matériaux supraconducteurs	6
I.3.1. Résistivité électrique	6
I.3.2. Effet Meissner	7
I.3.3. Surface critique	8
I.4. Grandeurs Critiques	9
I.4.1. Température Critique	9
I.4.2. Champ Magnétique Critique	10
I.4.3. Densité de courant critique	12
I.4.4. Mobilité des vortex	13
I.5. Les types des supraconducteurs	14
I.5.1. Supraconducteurs de type I	14
I.5.2.1. Diagramme de phase	15
I.5.3. Matériaux supraconducteurs à haute température critique	16
I.6 Applications des supraconducteurs :	17
I.6.1. Stockage de l'électricité : Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) :	17
I.6.1.1 Avantages par rapport aux autres méthodes de stockage d'énergie :	18
I.6.1.2 Utilisation actuelle :	18
I.6.2. Limiteur de courant de défaut (Fault Current Limiter ou FCL) :	20
I.6.2.1 Contraintes de conception :	21
I.6.2.2 Limiteur de courant à supraconducteur :	21
I.6.2.3 Applications :	23
I.6.2.4 Aspects environnementaux :	24
I.6.2.5 Aspects économiques :	24
I.6.3. Moteurs et générateurs supraconducteurs :	24
I.6.3.1. Les moteurs	24
I.6.3.2. Les générateurs	25
I.6.4 La sustentation magnétique (MAGLEV magnetic levitation)	26
I.6.4.1 1TRAIN À LÉVITATION MAGNÉTIQUE :	26
I.6.4.2 Les technologies :	27

I.6.4.3 Avantages et inconvénients : -----	29
I.7.Conclusion : -----	29
<b>Chapitre II Conception des machines supraconductrices</b>	
II.1. Introduction-----	31
II.2. Différentes topologies et conceptions des machines à supraconducteurs : -----	31
II.2.1. Machine homopolaire supraconductrice : -----	31
II.2.2Machines synchrones supraconductrices -----	33
II.2.2.1 Rotor bobiné -----	34
II.2.2.2 Machines à aimants supraconducteurs : -----	35
II.2.2.3 Quelques machines synchrones : -----	35
II.2.3 Machine Asynchrone Supraconductrice : -----	37
II.2.4 Des machines à topologies a typiques-----	38
II.2.4.1 Machine à hystérésis-----	39
II.2.4.2 Machine à réluctance variable :-----	40
II.2.4.3 Machines à modulation de flux -----	40
II.3 Conclusion : -----	43
<b>Chapitre III Etude de conception de machine supraconductrice à concentration de flux</b>	
III.1-INTRODUCTION : -----	45
III.2 Etude préliminaire des composants de la structure de l'inducteur. -----	45
III.2.1 Les mécanismes du blindage magnétique -----	46
III.2.2 Le modèle des états critiques :-----	47
III.2.3 Modification de la répartition de l'induction magnétique : -----	52
III.2.4 Structure d'inducteur de la machine :-----	54
III.3 Etude de la conception de l'inductance : -----	58
III.3.1 Etude du format des écrans YBaCuO : -----	58
III.3.1.1 Choix des écrans supraconducteurs : -----	58
III.3.2 Etude des bobines de champ : -----	60
III.3.3 Choix du matériau pour le support : -----	61
III.3.4 Bobinage des solénoïdes : -----	61
III.3.5 Forme et position des écrans-----	62
III.4 Inducteur multi-empilement (Multistack) : -----	65
III.5 Conclusion : -----	66
Conclusion Générale -----	67
Reference Bibliographie -----	69

Table Du Figure

Figure I .1. Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température, [8].....	7
Figure I 2 Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur, [9].....	7
Figure I 3 Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur, [5].....	9
Figure I 4 Surfaces critiques des principaux supraconducteurs, [10].....	9
Figure I 5 Dépendance de la résistivité en fonction de la température, [8].....	10
Figure I 6 Représentation des types de la supraconductivité en fonction du champ, [4]. ....	11
Figure I 7 Dépendance du champ magnétique en fonction de la température, [10].....	12
Figure I 8 Caractéristique E(J) d'un supraconducteur avec activation thermique, [12]. ....	13
Figure I 9 Caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type I, [14].....	14
Figure I 10 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I, [16]. ....	15
Figure I 11 Caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type II, [14]. ....	15
Figure I 12 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II, [16].....	16
Figure I 13 Structure de supraconducteurs à haute température critique, [17].....	17
Figure I 14 Comment stocker une inductance supraconductrice - SMES (stockage d'énergie magnétique supraconducteur) .....	18
Figure I 15 FCL Vattenfall – Source : Nexans.fr .....	20
Figure I 16 Schéma de principe du Limiteur de courant de défaut à supraconducteur résistif .....	22
Figure I 17 Schéma de principe du Limiteur de courant de défaut à supraconducteur avec une inductance en parallèle .....	22
Figure I 18 Schéma de principe du Limiteur de courant pour un supraconducteur de ce qui a une résistance nulle .....	22
Figure I 19 Schéma de principe En cas de court-circuit, l'élément supraconducteur retourne à l'état normal et limite le courant .....	22
Figure I 20 Schéma de principe du Limiteur de courant à supraconducteur en court-circuit	23
Figure I 21 Schéma des limiteurs de courant de défaut (FCL).....	23
Figure I 22 Moteur supraconducteur .....	25
Figure I 23 Train maglev chinois .....	26
Figure I 24 JR-Maglev train japonais .....	27
Figure I 25 Modélisation de la lévitation du transrapld.....	27
Figure I 26 Effet Meissner.....	28
Figure II. 1 Principe de fonctionnement d'une machine homopolaire .....	32
Figure II. 2 Coupe d'une machine supraconductrice homopolaire réalisée par General Atomics .....	33
Figure II. 3 Moteur Homopolaire 3,7 MW, GENERAL ATOMICS et sa charge à gauche [27]. .....	33
Figure II. 4 Section d'une machine radiale à air : 1-Culasse ferromagnétique 2-Bobines en cuivre 3-Bobines supraconductrices 4-Bagues/balais 5-Sortie cryogène 6-Entrée cryogène 7-Arbre mécanique 8-Support non-magnétique 9-Cryostat/Blindage électromagnétique.....	34



Figure II. 5 Moteur HTC le plus puissant (36,5 MW) jamais construit [32].....	35
Figure II. 6 Machine SIEMENS de 4 MW [37] .....	36
Figure II. 7 Machine ULCOMAP de 250 kW [38] .....	37
Figure II. 8 Machine à aimant supraconducteur a) axiale de 10 kW [38] b) radiale de 7,8 kW [39] ..	37
Figure II. 9 Machine à induction supraconductrice de 20 kW [40] .....	38
Figure II. 10 a) Section d'une machine à hystérésis b) Courant induit dans l'anneau supraconducteur du rotor .....	39
Figure II. 11 Section d'une machine à réductance variable .....	40
Figure II. 12 Principe de l'inducteur à modulation de flux .....	41
Figure II. 13 Répartition du flux magnétique dans l'entrefer .....	42
Figure II. 14 Principe de l'inducteur à barrière de flux.....	42
Figure II. 15 a) Inducteur à modulation de flux [42] b) Machine à barrière de flux [43] .....	42
Figure III 1 illustration de la loi de Lenz [48].....	46
Figure III 2 Principe du blindage par supraconducteur massif [48].....	47
Figure III 3 Plaque supraconductrice infiniment longue [48] .....	48
Figure III 4 Modèle des états Critiques[48] .....	49
Figure III 5 Cycle de champ inférieur à $B_{sat}$ [48] .....	50
Figure III 6 Modèle d etas desable pour un supraconducteur non saturé. [48] .....	50
Figure III 7 Cycle de champ magnétique conduisant à la saturation du supraconducteur. [48] .....	51
Figure III 8 Modèle de stas desable pour un supraconducteur saturé en courant. [48].....	51
Figure III 9 Induction dans un système de deux bobines en série. [48] .....	52
Figure III 10 Lignes de champ dans un système de deux obines en série. [48].....	52
Figure III 11 Induction après concentration [48] .....	53
Figure III 12 Lignes de champ après concentration de l'induction [48].....	53
Figure III 13 Schéma expérimental pour la concentration de flux [48] .....	53
Figure III 14 Lignes de champ produites par deux solénoïdes en opposition [48] .....	54
Figure III 15 Vue de face des lignes de champ produites par deux solénoïdes en opposition [48] .....	55
Figure III 16 Répartition angulaire de $B_r$ pour deux solénoïdes en opposition [48] .....	55
Figure III 17 Lignes de champs produites par l'inducteur (schéma) [48] .....	56
Figure III 18 Répartition angulaire de l'induction produite par l'inducteur [48].....	57
Figure III 19 Structure de l'inducteur, vue en3D.....	58
Figure III 20 mono domaine d'YBaCuO [48] .....	59
Figure III 21 Définition des grandeurs pour le calcul du rayon extérieur. [48] .....	59
Figure III 22 Variables pour le dimensionnement. [48].....	60
Figure III 23 Forme retenue pour l'inducteur [48] .....	61
Figure III 24 Plan de support du prototype d'inducteur [48].....	61
Figure III 25 Inducteur avec différentes valeurs d'angle entre les plaques [51] .....	62
Figure III 26 Différentes formes d'écrans. (a) 1 bloc rectangulaire par poteau. (b) 1 vrac courbé par pôle. (c) Deux masses rectangulaires par poteau [51].....	63
Figure III 27 III.27 Dimensions en millimètres de (a) l'inducteur optimisé et (b) Plaques YBaCuO. [51] .....	63
Figure III 28 Inducteur assemblé[51].....	64
Figure III 29 Moteur supraconducteur à concentration de flux, 20kW-750tr/min [47] .....	65

Figure III 30 Principe de l'inductance multistack. [53]..... 65

Table Du Tableaux

Table I. 1 Quelques exemples de SMES .....	19
Table I. 2 Avantages et inconvénients du Stockage de l'électricité ( Superconducting Magnetic Energy Storage).....	20
Table I. 3 Avantages et inconvénients du train à lévitation magnétique.....	29
Table II. 1 Quelques réalisations de machines supraconductrices homopolaires.....	32
Table II. 2 Caractéristiques du générateur 250 KW-1500 tr/min, Converteam Nancy .....	36
Table II. 3 Quelques réalisations de machines asynchrones supraconductrices .....	38
Table III. 1 Les variables utilisées pour le dimensionnement [48] .....	60

## Notations symbolique et abréviations

T <sub>c</sub>	Température critique	[K]
H <sub>c</sub>	Champ magnétique critique	[A/m]
J <sub>c</sub>	Densité de courant critique	[A/m <sup>2</sup> ]
B	Induction magnétique	[T]
$\mu_0$	Perméabilité magnétique a vidé	[H/m]
H	Champ magnétique	[A/m]
E	Champ électrique	[V/m]
D	Induction électrique	[C/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Densité volumique des charges électriques	[C/m <sup>3</sup> ]
LTS	Low Temperature Superconductors	
BTC	base température critique	
HTC	haute température critique	
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	
FCL	Fault Current Limiter	
Nbti	Negative-bias temperature instability	

# Introduction Générale

## Introduction Générale

Depuis la découverte du phénomène de la supraconductivité, la recherche dans le domaine des supraconducteurs a été relancée surtout après l'apparition des supraconducteurs de type II, tandis que les applications industrielles, peuvent être réalisables. Leurs applications en électrotechnique peut être également envisageables, dans différents domaines tel que ; câbles de transport, Stockage d'énergie, machines électriques ce qui était le but de ce mémoire. Les supraconducteurs permettent de repousser toujours plus loin les performances des systèmes nécessitant un fort champ magnétique ou une forte puissance

Ces matériaux s'aperçoivent de plus en plus utilisés dans différentes applications, l'amélioration en continu des performances des supraconducteurs et des dispositifs cryogéniques a permis leurs développement à l'échelle industrielle dans le domaine de l'électrotechnique et de la conversion électromécanique de l'énergie (moteur et générateur).

Ce mémoire présente l'étude d'une structure novatrice d'inducteur supraconducteur utilisant des matériaux supraconducteurs OÙ l'on fait l'étude de P. Masson sur la structure qui Il utilise un matériau supraconducteur pour diriger et focaliser le champ magnétique

Ce mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique où on introduit les connaissances et les notions de base des matériaux supraconducteurs. Ce chapitre à pour but de définir brièvement la supraconductivité et de mettre en évidence les propriétés de ces matériaux, Nous parlerons des types de ces matériaux et nous détaillerons les applications les plus importantes des matériaux supraconducteurs et quels sont les avantages et les inconvénients de ces applications
- Dans le deuxième chapitre, nous parlons de la conception de machines supraconductrices où nous nous concentrons sur la conception et le développement de moteurs et de générateurs et nous détaillerons les différentes structures des machines qui sont produites et testées à travers différents travaux de recherche.
- Dans le troisième et dernier chapitre, nous étudierons la structure d'une inductance supraconductrice, où nous ferons une étude préliminaire des composants de l'inductance puis expliquerons le principe de l'crantrage magnétique par refroidissement hors du champ des supraconducteurs

## Introduction Générale

Enfin, nous clôturons notre étude par une conclusion générale résumant le contenu de cette approche à travers ce mémoire et on terminera enfin, par les perspectives de continuation de ce travail.

# Chapitre I

## Les Supraconducteurs et Leurs Applications



**I.1.Introduction :**

La supraconductivité (ou supraconduction) est un phénomène caractérisé par l'absence de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique — l'effet Meissner — à l'intérieur de certains matériaux dits supraconducteurs. La supraconductivité découverte historiquement en premier, et que l'on nomme communément supraconductivité conventionnelle, se manifeste à des températures très basses, proches du zéro absolu ( $-273,15$  °C). La supraconductivité permet notamment de transporter de l'électricité sans perte d'énergie. Ses applications potentielles sont stratégiques.

Dans les supraconducteurs conventionnels, des interactions complexes se produisent entre les atomes et les électrons libres et conduisent à l'apparition de paires liées d'électrons, appelées paires de Cooper. L'explication de la supraconductivité est intimement liée aux caractéristiques quantiques de la matière. Alors que les électrons sont des fermions, les paires d'électrons se comportent comme des bosons de spin égal à 0 nommé singulet, et sont « condensées » dans un seul état quantique, sous la forme d'un superfluide de paires de Cooper.

Un effet similaire de la supraconductivité est la superfluidité, caractérisant un écoulement sans aucune résistance, c'est-à-dire qu'une petite perturbation que l'on soumet à ce type de liquide ne s'arrête jamais, de la même façon que les paires de Cooper se déplacent sans aucune résistance dans un supraconducteur.

Il existe également d'autres classes de matériaux, collectivement appelés « supraconducteurs non conventionnels » (par opposition à la dénomination de supraconductivité conventionnelle), dont les propriétés ne sont pas expliquées par la théorie BCS. En particulier, la classe des cuprates (ou « supraconducteurs à haute température critique »), découverte en 1986, présente des propriétés supraconductrices à des températures bien plus élevées que les supraconducteurs conventionnels. Toutefois, ce que les physiciens nomment « haute température » reste extrêmement bas comparativement aux températures à la surface de la Terre (le maximum est 133 K, soit  $-140$  °C)[1], mais sont parfois au-dessus de la température de liquéfaction de l'azote en azote liquide à 77 K. Le premier matériau supraconducteur à température ambiante, un hydrure de carbone et de soufre, est découvert en 2020 :  $T_c = 287,7 \pm 1,2$  K (environ 15 °C), mais sous une pression de  $267 \pm 10$  GPa (proche de la pression au centre de la Terre) [2] [3]

Bien que ce sujet soit, depuis le début des années 1990, un des sujets les plus étudiés de la physique du solide, en 2010 aucune théorie unique ne décrit de façon satisfaisante le phénomène de la supraconductivité non conventionnelle. La théorie des fluctuations de spin est une des plus prometteuses et permet de reproduire beaucoup des propriétés de l'hélium

3, des fermions lourds ainsi que des cuprates. Dans cette théorie, l'appariement se fait par échange de fluctuations de spin, toutefois aucun consensus n'est à ce jour établi. Cette théorie pourrait également permettre d'expliquer la supraconductivité des supraconducteurs à base de fer

## **I.2. Historique de la supraconductivité**

La supraconductivité a été découverte en 1911 par le néerlandais Kammerlingh Onnes trois ans après avoir réussi la liquéfaction de l'hélium. En mesurant la résistance électrique d'un barreau de mercure, il a observé une chute brutale de cette résistance pour des températures en dessous de 4 K, ce qui n'était pas le cas pour les autres métaux étudiés, dont la résistance paraissait décroître progressivement. Une année après cette découverte Onnes a observé le même phénomène pour l'étain et le plomb ; ce dernier qui est un très mauvais conducteur à température ambiante perd sa résistance en dessous d'une température de 6 K. L'étain quant à lui devient supraconducteur à 3.7 K. Ce seuil de température, au-dessus duquel le matériau perd sa supraconductivité, est appelé température critique. Pour voir si cette propriété est dépendante du champ magnétique ou non, Onnes a observé le comportement du mercure refroidi en dessous de sa température mais en appliquant un champ extérieur ; il a remarqué que ce champ provoquait la disparition de la supraconductivité de l'échantillon de mercure. La valeur du champ à partir de laquelle la supraconductivité disparaît est appelée champ critique. La même démarche a été faite mais en tentant de faire passer un courant électrique dans un échantillon, il a remarqué que le matériau redevient normal si on essaye de faire passer un courant supérieur à une certaine valeur. Cette dernière est appelée courant critique. Ainsi apparaissent déjà les trois paramètres fondamentaux de la supraconductivité : la température  $T$ , le champ magnétique  $H$  et la densité de courant  $J$ , [5] [6] [7]

## **I.3. Propriétés élémentaires des matériaux supraconducteurs**

### **I.3.1. Résistivité électrique**

La supraconductivité est un état de la matière dans lequel celle-ci présente une remarquable combinaison de propriétés électriques et magnétiques. La disparition totale de la résistivité en dessous d'une certaine température appelée température critique ( $T_c$ ) est la caractéristique la plus connue de ces matériaux (**Figure I.1**). Une autre propriété est le diamagnétisme parfait sous certaines conditions de champ magnétique.

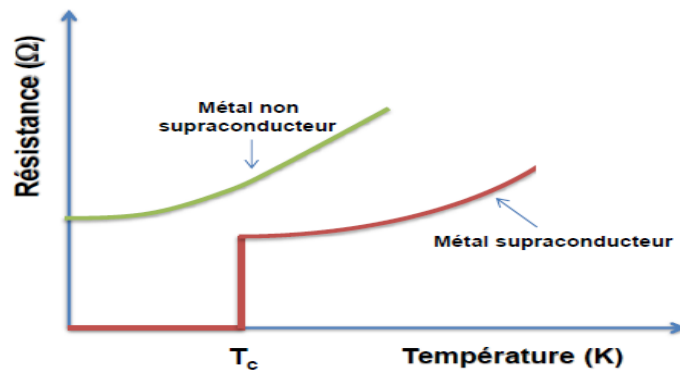


Figure I . 1. Résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température, [8].

**I.3.2. Effet Meissner**

Le conducteur parfait  $R=0$  implique qu'un changement de l'induction magnétique dans le matériau n'est pas possible  $dB/dt=0$ . Aussi, lorsqu'un conducteur parfait, sous champs nul à température ambiante, est refroidi en dessous de  $T_c$  puis soumis à un champ magnétique, alors des courants d'écrantage vont être induits pour conserver  $B = 0$ , à l'intérieur du matériau, (**Figure. I.2(a)**).

Si au contraire, le conducteur parfait est soumis à un champ magnétique extérieur est ramené à zéro.  $dB/dt$  doit être conservé et des courants de piégeage seront induits pour piéger l'induction magnétique à l'intérieur, (**Figure. I.2. (b)**).

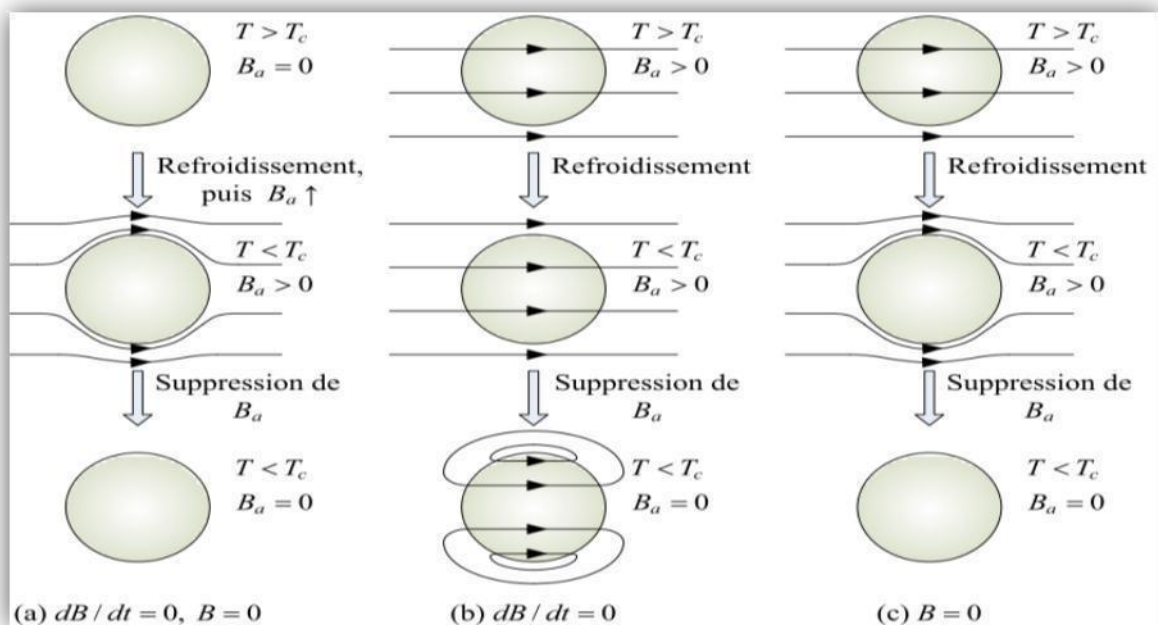


Figure I 2 Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur, [9].

1. S'il n'existe aucun champ magnétique extérieur  $B_a = 0$  avant que le matériau soit refroidi chaque matériau possède un flux magnétique interne nul en dessous de  $T_c$ .

2. Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliqué avant refroidissement

$$\dot{B} = \frac{dB}{dt} = 0.$$

3. Le flux magnétique est toujours exclu par un supraconducteur en dessous de  $T_c$ , qu'un champ magnétique soit appliqué avant refroidissement ou non  $B = 0$ . Différemment dans le cas d'un supraconducteur :

- Dans le premier cas, quand le champ magnétique est appliqué après refroidissement le conducteur parfait et le supraconducteur se comportent de manière identique car l'induction magnétique est toujours nulle dans le matériau, (**Figure I.2(a)**).
- Dans le second cas, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du supraconducteur  $B = 0$  dès qu'il est refroidit en dessous de sa température critique, voir (**Figure I.2(c)**).

Ce comportement est connu sous le nom d'effet Meissner : il s'agit de l'expulsion de toute induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur. Le diamagnétisme parfait est une propriété intrinsèque d'un supraconducteur, qui n'est cependant valable que si la température et le champ magnétique sont en tout point inférieur à leur valeur critique  $T < T_c$ ,  $H < H_c$ , [9].

### I.3.3. Surface critique

Le supraconducteur peut perdre l'effet Meissner dans son état supraconducteur dans l'une des conditions suivantes:

- La température du matériau dépasse la température critique  $T_c$ .
- Le champ magnétique extérieur appliqué dépasse une valeur critique appelée champ critique  $H_c$ .
- La densité de courant dans le matériau devient supérieure à la densité de courant critique  $J_c$ .

Ces trois paramètres  $T_c$ ,  $H_c$  et  $J_c$  permettent de définir le domaine supraconducteur. (**Figure I.3**), [14].

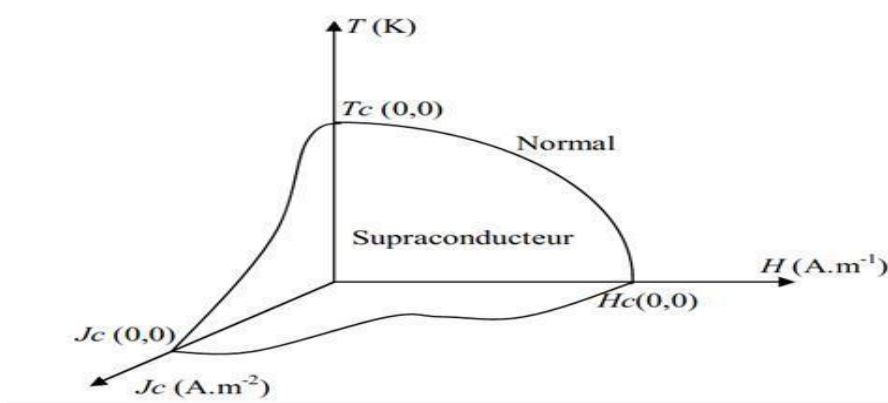


Figure I 3 Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur, [5].

#### I.4. Grandeurs Critiques

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 ( $H$ ) sont des grandeurs intrinsèques au matériau, tandis que la densité de courant critique ( $J_c$ ) dépend du procédé de fabrication (Figure I.4) au-delà de  $T_c$  le supraconducteur se trouve dans un état normal caractérisé par une résistivité  $\rho_n$ .

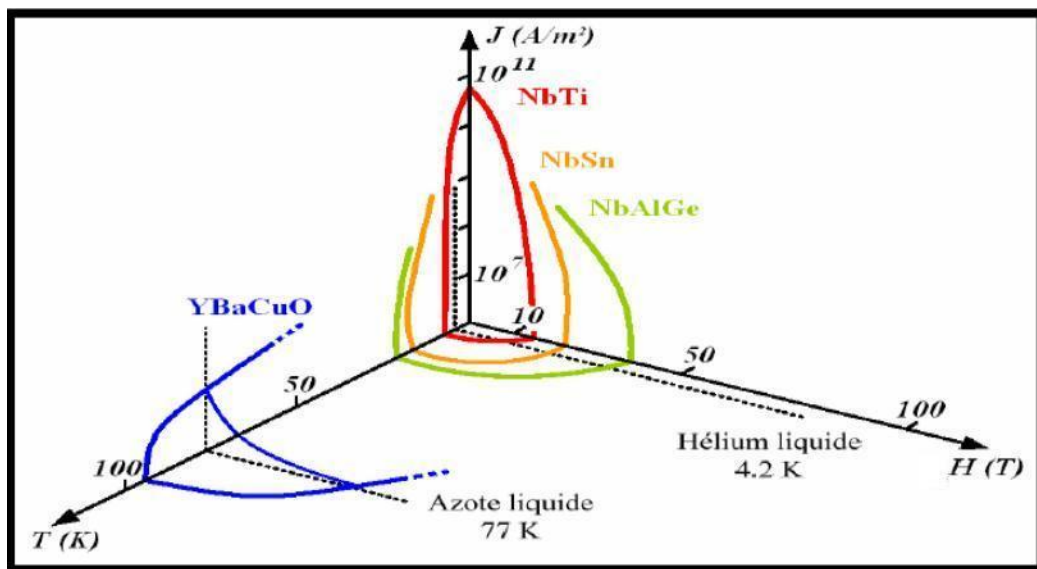


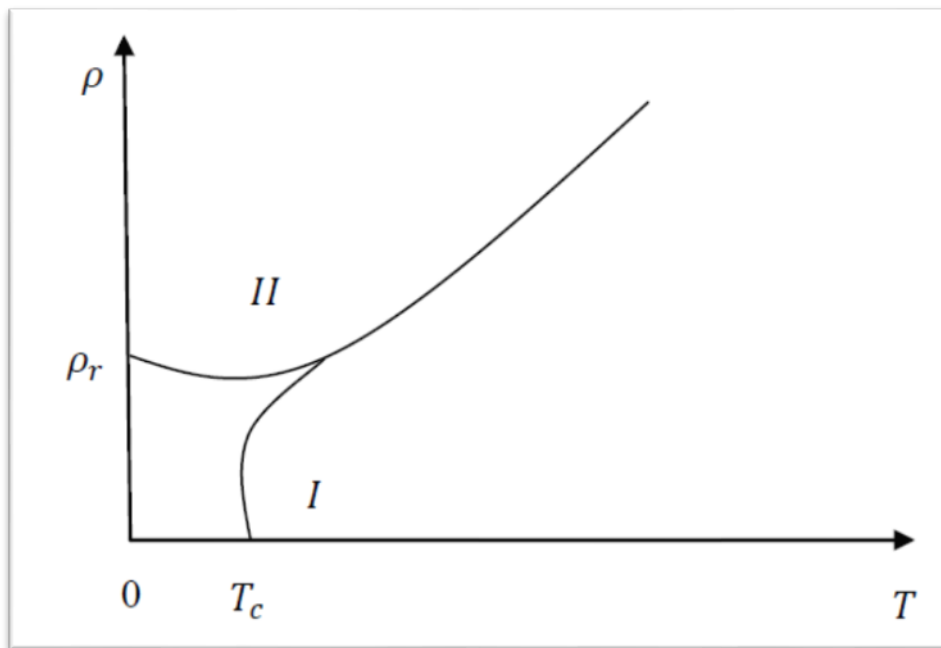
Figure I 4 Surfaces critiques des principaux supraconducteurs, [10].

- L'application des supraconducteurs à la limitation de courant fait essentiellement intervenir deux grandeurs critiques : la température  $T_c$  et la densité de courant  $j_c$ , [9].

#### I.4.1. Température Critique

L'état de supraconductivité caractérise la plupart des métaux à condition que la température soit très proche de 0 K. La température en dessous de laquelle un matériau devient supraconducteur est nommée température critique  $T_c$  est également la température

de transition qui délimite l'état supraconducteur de l'état normal. La supraconductivité est obtenue aux températures  $T_c$  plus élevées pour les métaux mauvais conducteurs dans l'état normal, comme le mercure et le plomb. Proche de  $T_c$  la variation de la résistivité en fonction de la température est très rapide (**Figure I.5**). La partie II représente la variation de la résistivité,  $\rho(T)$  pour l'état normal, correspondante à la relation  $\rho(T) = CT^5 + \rho_r$  ou  $\rho_r$  est déterminé par les impuretés et les défauts du réseau cristallin. La partie I de la courbe (**Figure I.5**) présente une chute très raide sur un intervalle de température de 0,01.. 0,001 K et caractérise l'état supraconducteur.



**Figure I 5** Dépendance de la résistivité en fonction de la température, [8].

La température a une influence importante sur les autres caractéristiques d'un matériau Supraconducteur comme le magnétique, la résistivité ou la profondeur de pénétration, [8].

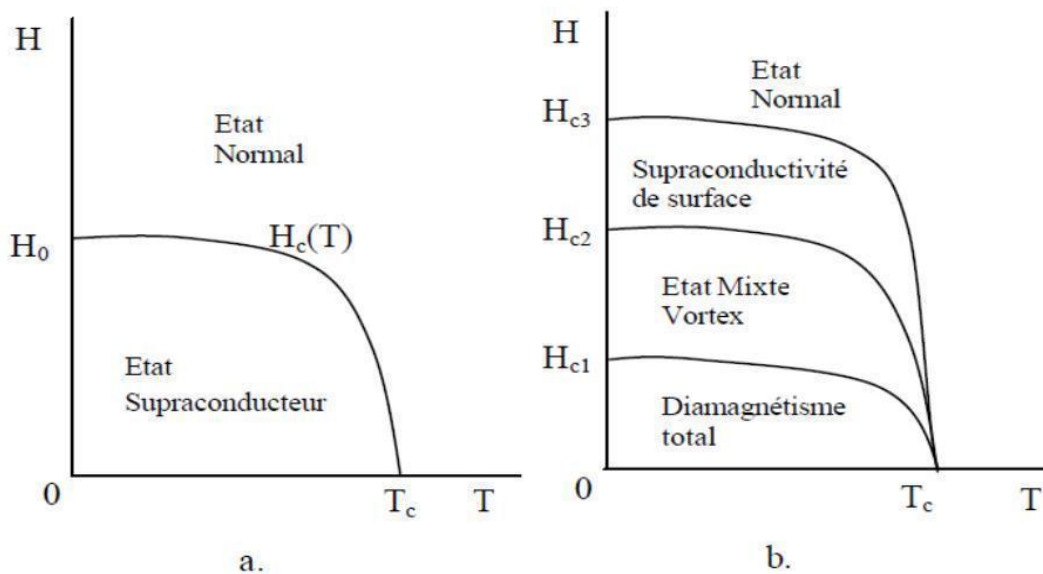
#### I.4.2. Champ Magnétique Critique

L'état supraconducteur peut disparaître pour un champ magnétique extérieur d'une certaine intensité  $H_c$  dépendant de la température. Dans la (**Figure I.6 (a)**). La courbe  $H_c(T)$  divise le Quadrant  $H_c > 0, T_c > 0$  en deux régions : supraconducteur et normale. La température Maximale à laquelle un matériau est supraconducteur est obtenue pour un champ extérieur nul. Les supraconducteurs se divisent en deux catégories : type I et type II. Ceux de type I sont caractérisés par le fait que si le champ magnétique extérieur atteint La valeur critique l'effet Meissner s'arrête brusquement.

Le diamagnétisme est parfait pour  $H$  inférieurs à  $H_c$  et la dépendance avec la température est parabolique (**Figure. I.6 (a)**):

$$H_c(T) = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Où  $H_0$  est la valeur du champ critique extrapolé à  $T = 0$  K. La résistivité augmente brusquement à la valeur correspondante à l'état normal quand le champ magnétique dépasse la valeur de  $H_c$ . Aux supraconducteurs de type II, le diamagnétisme parfait disparaît progressivement à partir d'une valeur de champ magnétique  $H_{c1}$  et la disparition totale du diamagnétisme est



**Figure I 6 Représentation des types de la supraconductivité en fonction du champ, [4].**

La caractéristique  $H(T)$  des supraconducteurs de type II comporte plusieurs zones, une première dans laquelle la résistivité électrique est nulle ; une deuxième zone, où  $\rho$  peut prendre la valeur nulle ou correspondante à l'état normal  $\rho_n$  ou encore une valeur intermédiaire dépendante de facteurs comme la concentration des impuretés, la densité de courant, la direction du champ magnétique, etc; La troisième zone correspond à la supraconductivité de surface, dans laquelle seulement une fine partie en surface du matériau est supraconductrice (et cela seulement si le champ magnétique a une composante parallèle à la surface du matériau) ; la quatrième zone correspond à l'état normal ( $\rho = \rho_n$ ). On peut considérer comme ordre de grandeurs les champs magnétiques  $H_{c1} = 10$  kA/m,  $H_{c2} = 10$  MA/m. Les supraconducteurs de type (II) sont constitués généralement des alliages (Nb-Zr, Nb-Ti), des composants supraconducteurs (Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Ga) et de métaux de transition avec une résistivité grande à l'état normal. Pour des valeurs de champ comprises entre  $H_{c1}$  et

$H_{c2}$  ces matériaux présentent des zones à l'état normal, dans lesquelles l'induction magnétique est non nulle, Pour des valeurs de champ comprises entre  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$  ces matériaux présentent des zones à l'état normal, dans lesquelles l'induction magnétique est non nulle, [4] [11].

### I.4.3. Densité de courant critique

La densité de courant critique correspond à la valeur maximale au-delà de laquelle un champ électrique apparaît. Pour les supraconducteurs de type I, la répartition du courant n'est pas homogène.

Le courant de transport circulaire uniquement à la surface, dans l'épaisseur de pénétration de London. Pour les supraconducteurs de type (II) la densité de courant critique est fortement dépendante de l'induction  $B$  donc de la présence de vortex dans la structure du matériau. Pour une induction transverse, dans l'état mixte, un supraconducteur idéal présente une densité de courant nulle. Le courant de transport réagit avec les vortex et ceux-ci se déplacent lorsque la force créée de Lorentz  $Jc(B)$  est supérieure aux forces d'ancrage (ou de pinning), entraînant une dissipation dans le matériau.

Lorsque la densité de courant dépasse une valeur critique  $J_c$  les vortex sont arrachés. C'est le régime de flux-flow. Libérés, les vortex se déplacent. Un champ électrique est créé, proportionnel à  $J - J_c$ .

Dans le régime de flux flow une résistivité dépendante de l'induction magnétique apparaît et elle est noté  $\rho_f$ .

Pour obtenir des grandes densités de courant critique les vortex doivent être solidement ancrés dans le matériau ou au moins quelques-uns d'entre eux.

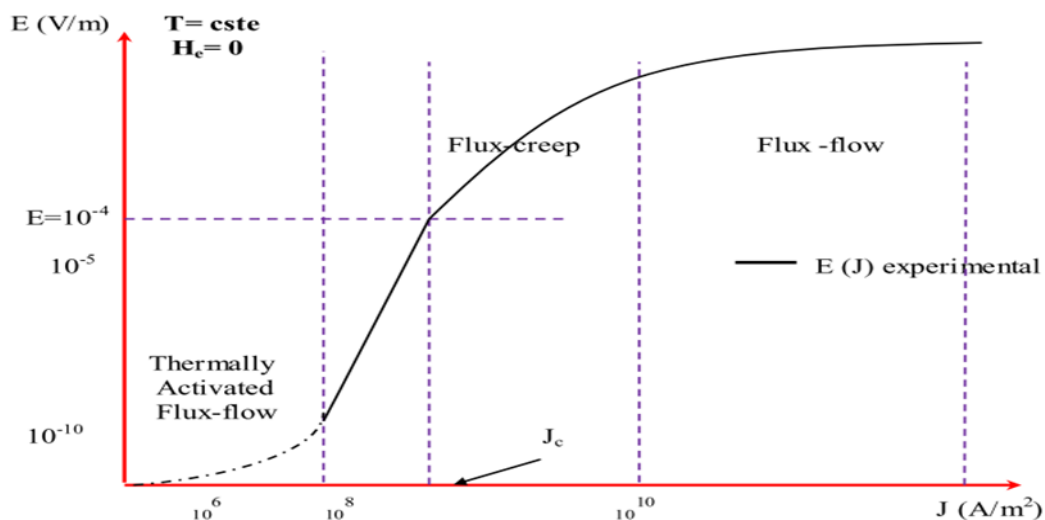


Figure I 7 Dépendance du champ magnétique en fonction de la température, [10].



La courbe expérimentale  $E(J)$  représentée (**Figure.I.7**) donne une image classique d'un comportement de supraconducteur HTC. Sur cette courbe, on peut distinguer trois régimes de dépendance de la valeur de  $J$  : le thermally activated flux-flow (TAFF), le flux-creep et le flux flow. Ces régimes se différencient par un comportement magnétique du supraconducteur différent qui est fonction de la force de Lorentz et donc du courant appliqué, [10].

Un premier régime appelé flux-flow pour des courants supérieurs au courant critique où la force de Lorentz est très supérieure aux forces d'ancrages des vortex, laissant ainsi les vortex se déplacer librement dans la même direction dans un mouvement collectif.

Un second régime situé autour du courant critique, appelé flux-creep. La densité de vortex est assez forte. Des vortex interagissent entre eux. Si l'un d'eux se décroche (Force de Lorentz plus la probabilité de saut), par interaction d'autres vortex vont se déplacer. Un dernier régime, très controversé (en pointillé sur la (**Figure.I.7**)), pour de faibles courants appelés TAFF où les vortex sauteraient en moyenne tous dans la même direction d'un point d'ancrage à un autre de manière désordonnée. Ce régime n'est pas encore bien défini et dépend de la température (à basse température, le réseau de vortex serait "gelé" et il n'y aurait donc plus aucune dissipation. On passe donc directement en régime de flux-creep). Les pertes en régime TAFF sont totalement négligeables devant les pertes en régime de flux creep. Le régime de flux-flow est le plus dissipatif, [4].

#### I.4.4. Mobilité des vortex

Il est important de bien comprendre les lois qui régissent la mobilité des vortex, celle-ci étant à l'origine de la transition des supraconducteurs de type II. Cette mobilité fait appel à deux types de mouvements appelés : flux flow et flux-creep (**Figure I.8**), [12].

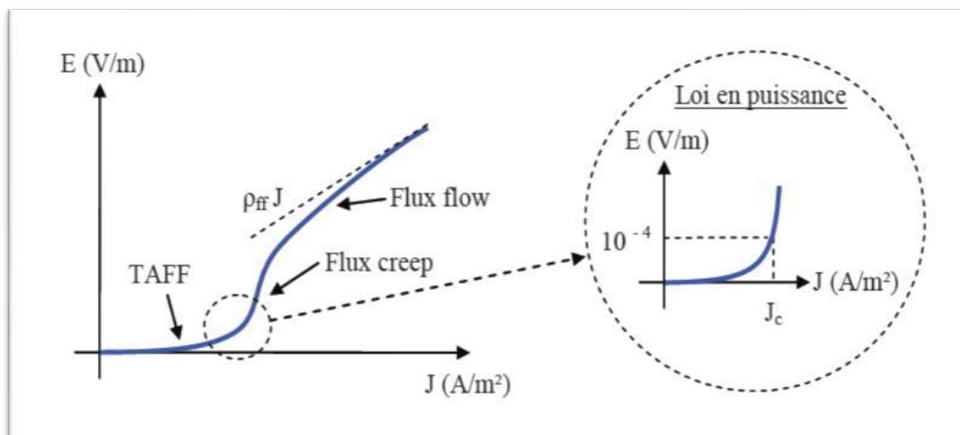


Figure I 8 Caractéristique  $E(J)$  d'un supraconducteur avec activation thermique, [12].

## I.5. Les types des supraconducteurs

### I.5.1. Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I ne possèdent qu'un seul champ critique  $H_c$ . Le champ magnétique pénètre sur une épaisseur appelée Longueur de pénétration de London dans laquelle se développent des super courants. Le comportement de ce type de supraconducteurs est simple car il n'existe que deux états. L'état normal correspond à une valeur élevée de la résistance du matériau et l'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme presque parfait. Les supraconducteurs de type I sont essentiellement des corps purs, comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'indium (In) et l'étain (Sn). Les champs magnétiques critiques des corps purs, supraconducteurs de type I, sont relativement faibles puisqu'ils ne dépassent pas 0.2 Tesla, [13] [15].

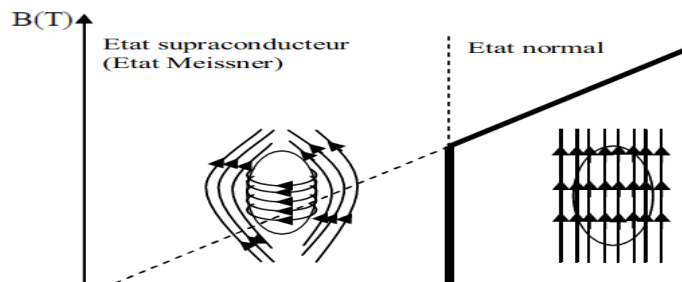


Figure I 9 Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type I, [14].

#### I.5.1.1. Diagramme de phase

Jusqu'à dans les années soixante, les scientifiques étaient persuadés que tous les supraconducteurs agissaient de la même façon en présence d'un champ magnétique. Ils savaient que la supraconductivité allait disparaître si le matériau est soumis à un champ magnétique plus intense qu'un champ critique  $H_c$ , et que la valeur de ce champ critique dépend de la température. Ainsi, le matériau pouvait se trouver soit dans l'état normal, soit dans l'état supraconducteur, selon la valeur de la température et du champ magnétique appliqué. Aujourd'hui, on qualifie les matériaux se comportant de cette façon de supraconducteur de première espèce ou de type I (Figure I.10), [10].

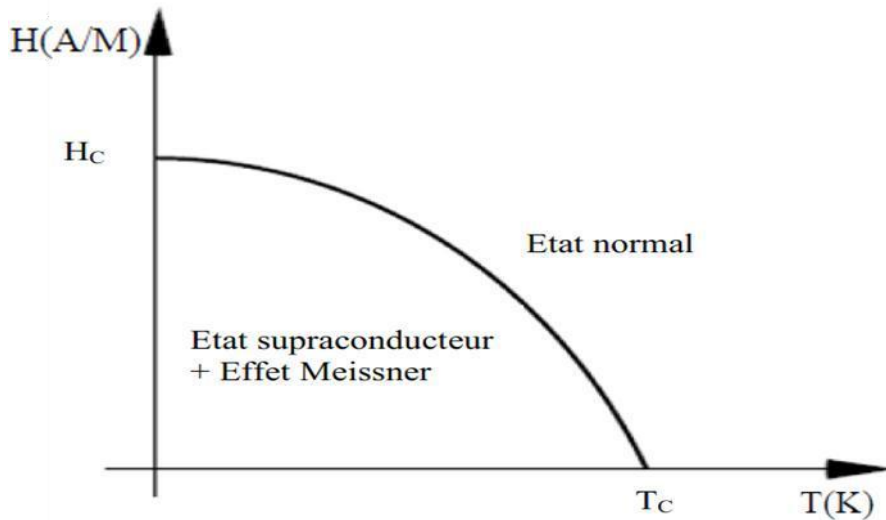


Figure I 10 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type I, [16].

### I.5.2. Supraconducteurs de type II

En présence d'un champ magnétique, les supraconducteurs de type II offrent un diamagnétisme parfait jusqu'au champ  $H_{c1}$  de manière comparable aux supraconducteurs de type I. À partir de  $H_{c1}$ , le supraconducteur de type II est dans l'état mixte qui autorise une pénétration partielle du champ jusqu'au champ  $H_{c2}$  ( $H_{c2}$  peut atteindre des dizaines de Teslas), [14].

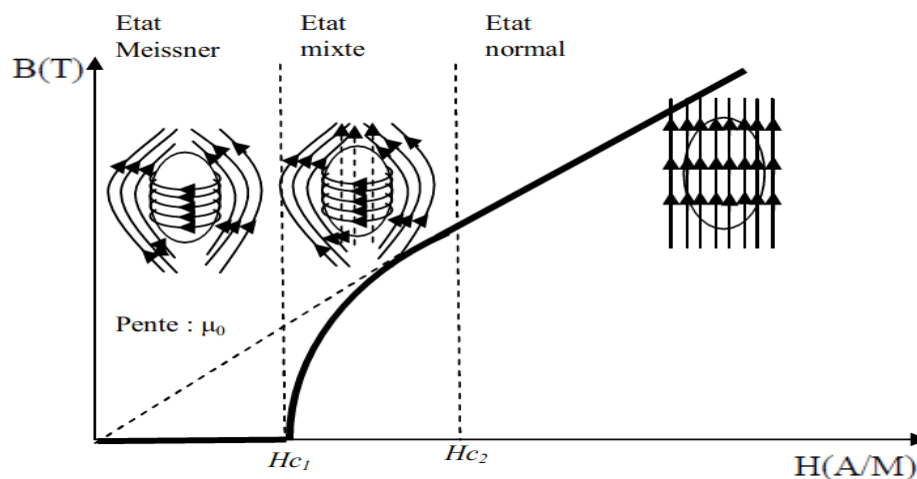


Figure I 11 Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type II, [14].

#### I.5.2.1. Diagramme de phase

Cependant, tel n'est pas le cas pour tous les supraconducteurs. En 1962 un deuxième type de supraconducteurs a été découvert. Ces matériaux de deuxième espèce possèdent deux champs magnétiques critiques ( $H_{c1}=B_{c1}$ ) et ( $H_{c2}=B_{c2}$ ) dépendant de la température. Ainsi, ils peuvent se trouver dans trois états: l'état normal, l'état

supraconducteur et l'état mixte. Sous  $H_{C1}$ , le matériau est complètement à l'état supraconducteur. Lorsqu'il franchit ce champ magnétique critique, il se trouve à l'état mixte, c'est-à-dire que le flux magnétique commence à pénétrer dans le matériau à travers de minces faisceaux appelés vortex. Le centre de chacun des vortex est caractérisé par une conductivité normale, et le flux les traversant est gardé constant par des boucles de courant persistant se formant sur leur circonférence. La densité des vortex augmente en proportion du champ appliqué. Si ce champ dépasse  $H_{C2}$ , le matériau atteint l'état normal, de la même façon que s'il avait outrepassé la température critique sans être soumis à un quelconque champ magnétique extérieur. (Figure I.12), [10].

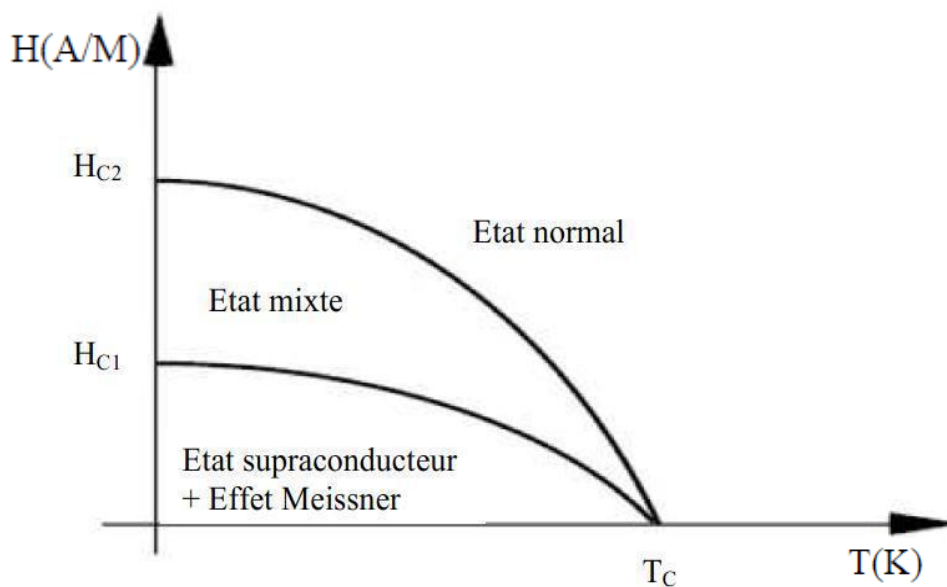


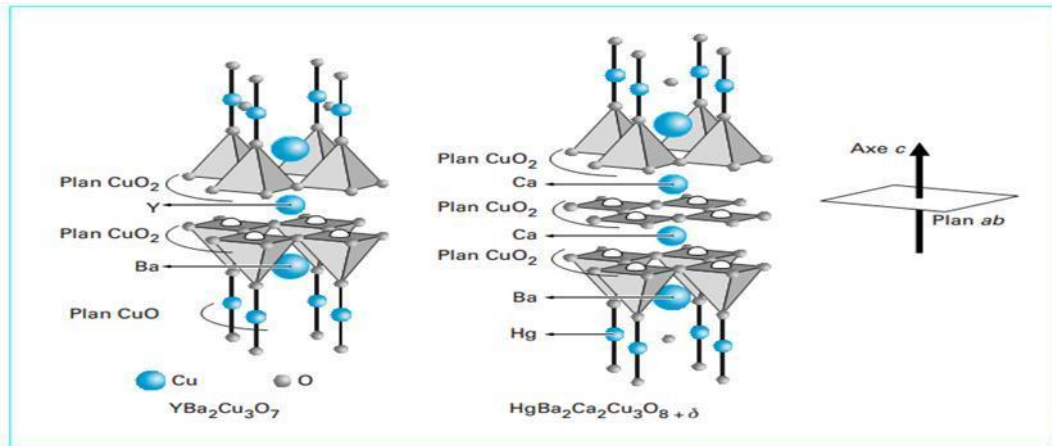
Figure I 12 Diagramme de phase d'un supraconducteur de type II, [16].

### I.5.3. Matériaux supraconducteurs à haute température critique

Les supraconducteurs se distinguent également par leurs  $T_c$ . En dessous de 30 K ce sont les basses températures critiques (LTS pour Low Temperature Superconductors) alors qu'au-delà ce sont les hautes températures critiques (HTS pour High Temperature Superconductors). Les HTS sont de type II. Les développements de conducteurs à haute  $T_c$  se concentrent autour des matériaux sans éléments toxiques, à savoir les composés au bismuth Bi (**BiSrCaCuO**) et de type **ReBaCuO**, où **Re** est une terre rare, très souvent l'yttrium (**Y**), mais d'autres éléments sont aussi utilisés (**Nd, Gd, Sm, ...**).

Les supraconducteurs à haute température critique sont des composés intermétalliques, donc très fragiles mécaniquement, comme le  $Nb_3Sn$ . Leur structure est de type pérovskite. Ce sont des oxydes de cuivre ou **cuprates** formés de  $n$  plans **CuO<sub>2</sub>** (les

plans ab), séparés par des atomes d'yttrium (ou une autre terre rare) ou de calcium (**Figure I.13**) et intercalés entre deux blocs identiques d'extrémité qui contiennent des métaux ou des terres rares et de l'oxygène, [17].



**Figure I 13 Structure de supraconducteurs à haute température critique, [17].**

## I.6 Applications des supraconducteurs :

Les applications des supraconducteurs dans le domaine de l'électrotechnique s'expliquent par les forts champs électromagnétiques, ainsi que par les densités de courant élevées qu'ils peuvent transporter, permettant une grande puissance massique. On retrouve des supraconducteurs dans les systèmes suivants :

### I.6.1. Stockage de l'électricité : Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) :

Ce système permet de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu dans un anneau supraconducteur refroidi sous sa « température critique ». Le SMES est dit « quantique » si et seulement si il se forme une onde quantique dans laquelle tous les électrons sont corrélés et descendent à l'état fondamental sur la couche  $N=1$

Un système SMES typique comprend trois parties:

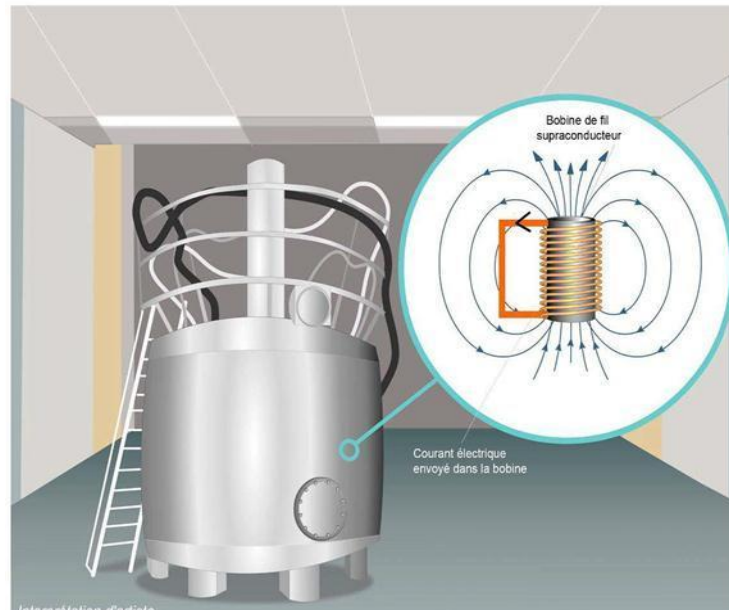
Une bobine supraconductrice ;

Un système de conversion de l'énergie ;

Une réfrigération cryogénique.

Une fois la bobine supraconductrice chargée, le courant ne va pas diminuer et l'énergie magnétique peut être stockée indéfiniment. L'énergie stockée peut être délivrée au réseau en déchargeant l'anneau construit dans un alliage supraconducteur. Le système de conversion de l'énergie utilise un onduleur/redresseur pour transformer le courant alternatif en courant continu ou convertir le continu en alternatif. L'onduleur/redresseur génère 2 à 3 % des pertes d'énergie.

Les pertes des SMES sont le plus faibles comparées à d'autres techniques de stockage. Avec un rendement excédant 95 %, les systèmes SMES sont très efficaces, mais encore très coûteux.[18]



**Figure I 14 Comment stocker une inductance supraconductrice - SMES (stockage d'énergie magnétique supraconducteur)**

#### **I.6.1.1 Avantages par rapport aux autres méthodes de stockage d'énergie :**

Il existe plusieurs raisons d'utiliser l'énergie magnétique supraconductrice, le stockage au lieu d'autres méthodes de stockage d'énergie. L'avantage le plus important du SMES est que le délai pendant la charge et la décharge est assez court. L'alimentation est disponible presque instantanément et une puissance de sortie très élevée peut être fournie pendant une courte période de temps. D'autres méthodes de stockage d'énergie, telles que l'hydroélectricité pompée ou l'air comprimé, ont un délai substantiel associé à la conversion d'énergie de l'énergie mécanique stockée en électricité. Ainsi, si la demande est immédiate, la PME est une option viable. Un autre avantage est que la perte de puissance est moindre que les autres méthodes de stockage car les courants électriques ne rencontrent presque aucune résistance. De plus, les pièces principales d'un SMES sont immobiles, ce qui se traduit par une grande fiabilité.

#### **I.6.1.2 Utilisation actuelle :**

Il existe plusieurs petites unités SMES disponibles pour un usage commercial et plusieurs projets de banc d'essai plus importants. Plusieurs unités MW.h sont utilisées pour le contrôle de la qualité de l'énergie dans les installations du monde entier, en particulier pour fournir une qualité d'énergie dans les usines de fabrication nécessitant une énergie ultra-propre, telles que les installations de fabrication de microprocesseurs] Ces installations ont également été utilisées pour

assurer la stabilité du réseau dans les systèmes de distribution. SMES est également utilisé dans les applications utilitaires. Dans le nord du Wisconsin, une chaîne d'unités SMES distribuées a été déployée pour améliorer la stabilité d'une boucle de transmission. La ligne de transmission est soumise à des changements de charge importants et soudains en raison de l'exploitation d'une papeterie, avec un potentiel de fluctuations incontrôlées et d'effondrement de la tension. Le modèle de test d'ingénierie est une grande PME d'une capacité d'environ 20 MWh, capable de fournir 40 MW de puissance pendant 30 minutes ou 10 MW de puissance pendant 2 heures. [19] [20].

<b>Origine</b>	<b>Année</b>	<b>Conducteur</b>	<b>Energie / Puissance</b>	<b>Application</b>
<b>Japon</b>	<b>2003</b>	SLTc (NbTi)	7,3 MJ/5MW	<b>Correction des instabilités</b>
<b>Finland</b>	<b>2003</b>	SLTc (Nb3Sn)	0,2 MJ	
<b>Allemagne</b>	<b>2003</b>	SHTc (Bi-2212)	150 KJ /20KW	
<b>e Japon</b>	<b>2004</b>	SHTc (Bi-2212)	1 MJ /1 MW	<b>Stabilité de la tension</b>
<b>Corée</b>	<b>2005</b>	SLTc (NbTi)	3 MJ/0.75MW	
<b>Chine</b>	<b>2007</b>		1 MJ/ 0.5MW	
<b>France</b>	<b>2007</b>	SHSH(Bi2(Bi-2212))	800KJ /175KW	<b>Application pulsée, canon électrique</b>
<b>Japon</b>	<b>2008</b>	SLTc (NbTi)	1 MJ /1 MW	
<b>Japon</b>	<b>2008</b>	SHTc (YBCO)	2 GJ / 100 MW	
<b>Corée</b>	<b>2011</b>	SHTc (YBCO)	2 MJ	<b>Qualité de la tension</b>
<b>Japon</b>	<b>2012</b>	SHTc (YBCO)	Classe MJ	<b>Stabilisation du réseau</b>

**Table I. 1 Quelques exemples de SMES**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellent temps de réponse</li> <li>• Haut rendement</li> <li>• Adapté pour fournir de l'énergie rapidement</li> <li>• Durée de vie</li> <li>• Charge et décharge rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible densité énergétique</li> <li>• Processus cryogénique nécessaire (pénalise par conséquent le bilan énergétique)</li> <li>• Ondes électromagnétiques</li> <li>• Autodécharge</li> </ul>

**Table I. 2 Avantages et inconvénients du Stockage de l'électricité ( Superconducting Magnetic Energy Storage)**

**I.6.2. Limiteur de courant de défaut (Fault Current Limiter ou 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.



**Figure I 15 FCL Vattenfall – Source : Nexans.fr**

Il suffit donc d'insérer dans la ligne électrique à protéger un élément supraconducteur avec un courant Critique correctement choisi par rapport au courant assigné (normal) de la ligne. Le disjoncteur est associé à l'élément supra-con-ducteur pour l'isolation indispensable du défaut. Une fois le défaut isolé, le supraconducteur récupère son état non dissipatif et peut être remis en service sur la ligne.



La transition supraconducteur/dissipatif est extrêmement rapide (des millièmes de secondes), la récupération est un peu plus longue (remise en état supraconducteur de l'ordre de la centaine de millisecondes, après un état dissipatif). La continuité de service est ainsi assurée. Celui-ci remplace les disjoncteurs classiques installés actuellement.

Deux limiteurs de courant de défaut supraconducteur (SFCL) construits par Nexans fonctionnent de manière très satisfaisante sur le réseau Européen. En Allemagne, celui fabriqué pour la centrale de Vattenfall (Figure 4), installé en 2009, a constitué une première mondiale. Nexans s'est allié avec AMSC pour se lancer sur le marché nord américain. [21]

Afin d'éviter le surdimensionnement impliqué par les courts-circuits, ou d'éviter le remplacement d'un équipement, il semble intéressant de trouver un moyen afin de limiter le pic de courant qu'ils produisent. Pour limiter le courant de défaut, il existe plusieurs méthodes. Celles dites passives sont permanentes : elles sont présentes même en absence de défaut. Toutefois, elles sont soit chères, soit présentent des défauts importants en temps normal : chute de tension, consommation de puissance réactive. Un limiteur de courant de défaut idéal a une inductance nulle en temps normal et infinie en cas de défaut. On parle de méthode active.

Les limiteurs de courant peuvent, sous certaines conditions, améliorer la stabilité dynamique des réseaux

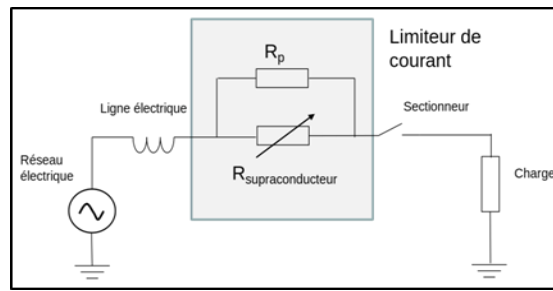
#### **I.6.2.1 Contraintes de conception :**

Il faut éviter qu'un limiteur de courant ne vienne augmenter dans de trop fortes proportions la tension transitoire de rétablissement. Par ailleurs, il ne doit causer en régime permanent ni chute de tension, ni harmoniques, ni ferrorésonance. [22]

Il doit limiter le courant très rapidement : au bout de 1 à 2 ms. Sa consommation de puissance active et réactive doit être aussi faible que possible en régime permanent. Par ailleurs, il faut éviter qu'il n'ait besoin de temps pour retrouver ses capacités. Cela veut dire également que les pièces à remplacer après déclenchements sont à éviter. Des successions de courts-circuits ne sont pas rares. Enfin il doit être aussi fiable que possible. [23]

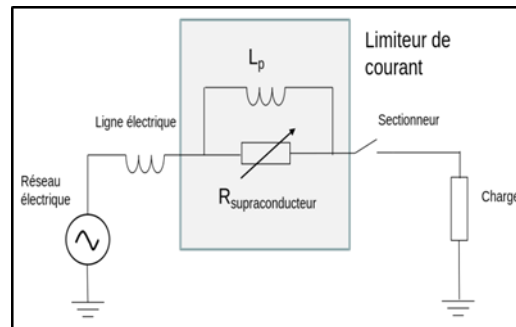
#### **I.6.2.2 Limiteur de courant à supraconducteur :**

Limiteur de courant de défaut à supraconducteur résistif



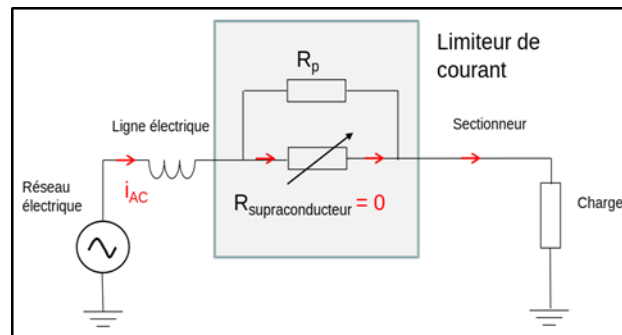
**Figure I 16 Schéma de principe du Limiteur de courant de défaut à supraconducteur résistif**

Limiteur de courant de défaut à supraconducteur avec une inductance en parallèle



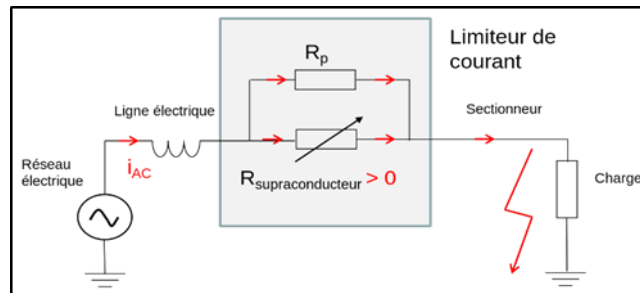
**Figure I 17 Schéma de principe du Limiteur de courant de défaut à supraconducteur avec une inductance en parallèle**

En temps normal, l'élément supraconducteur a une résistance nulle.



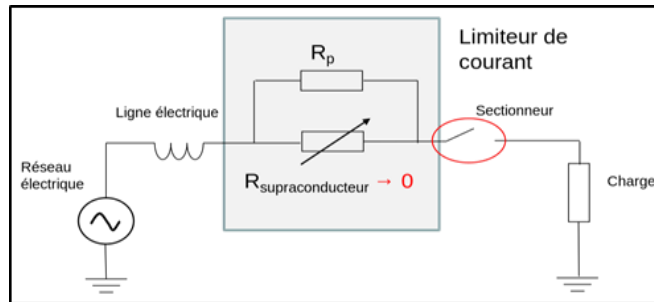
**Figure I 18 Schéma de principe du Limiteur de courant pour un supraconducteur de ce qui a une résistance nulle**

En cas de court-circuit, l'élément supraconducteur retourne à l'état normal et limite le courant



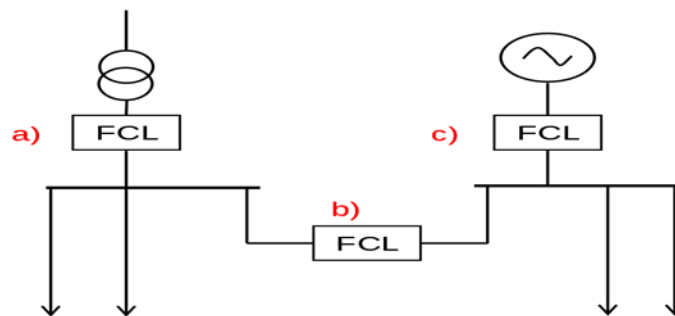
**Figure I 19 Schéma de principe En cas de court-circuit, l'élément supraconducteur retourne à l'état normal et limite le courant**

Après un court-circuit, l'élément supraconducteur a besoin de temps pour revenir à l'état supraconducteur



**Figure I 20 Schéma de principe du Limiteur de courant à supraconducteur en court-circuit**

### I.6.2.3 Applications :



**Figure I 21 Schéma des limiteurs de courant de défaut (FCL)**

Les limiteurs de courant de défaut (FCL) peuvent être employés :

- a) Après un transformateur,
- b) Entre deux sous-réseaux,
- c) Après un générateur

Lorsque deux parties du réseau sont connectées imaginer connecter ensemble un réseau « fort », ensemble, un limiteur de courant évite que le défaut ne se propage de l'une vers l'autre. On peut ainsi avec une grande puissance de court-circuit, avec un réseau faible sans que les équipements de ce dernier ne doivent être adaptés

Les bénéfices d'un tel couplage sont ceux qu'on associe au maillage des réseaux: plus grande redondance, meilleure stabilité, meilleure fiabilité.[22]

Lorsqu'un limiteur de courant est placé entre un générateur ou un transformateur et le reste du réseau, il évite que les équipements du réseau soit dimensionnés pour un fort courant de court-circuit. On peut donc limiter l'impédance de court-circuit des transformateurs, ce qui limite leur consommation en puissance réactive et donc les pertes sur le réseau. On peut aussi

économiser sur les disjoncteurs qui n'ont pas besoin d'être capables d'interrompre un courant si élevé [22]

#### **I.6.2.4 Aspects environnementaux :**

Les limiteurs de courant doivent avoir une influence sur l'environnement limitée. Le principal est qu'ils limitent les pertes électriques. Leur empreinte au sol est faible, ils tiennent pour la plupart dans un container. L'usage d'azote liquide dans le cas des limiteurs de courant à supraconducteur n'a pas d'influence négative sur l'environnement. Il peut par contre présenter un risque au niveau de la sécurité: brûlure par le froid, asphyxie si l'oxygène devient trop rare dans une pièce close, explosion si le gaz s'étend dans un volume fermé.[22]

#### **I.6.2.5 Aspects économiques :**

La plupart des modèles sont encore au stade de prototype, il est encore difficile de connaître leur coût de production à grande échelle.

### **I.6.3. Moteurs et générateurs supraconducteurs :**

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.[21]

#### **I.6.3.1. Les moteurs**

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 009, 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. I.22).[21]



**Figure I 22 Moteur supraconducteur**

### **I.6.3.2. Les générateurs**

Concernant les générateurs à supraconducteurs, une des premières applications a concerné les éoliennes (Lire : Énergie éolienne, de son gisement à ses aérogénérateurs). 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. Une turbine de 10 MW permet de générer assez d'électricité pour 5 000 à 10 000 maisons. AMSC a réalisé et commercialise des éoliennes de 10 MW appelées SeaTitan et elle prévoit de concevoir, comme General Electric, des éoliennes de 15 et de 20 MW.

On estime qu'au dessus d'une puissance de 6 MW, la solution supraconductrice devrait s'imposer. La taille énorme et le poids des éoliennes classiques augmentent sérieusement le coût des fondations quelles soient terrestres ou flottantes et celui de l'installation. L'Europe a lancé un projet Super power [8] pour développer ce type d'éoliennes et l'agence de l'énergie aux États-Unis finance aussi ce type de recherches.

Advanced Magnetic Laboratory AML en Floride s'est lancé dans une nouvelle voie où le matériau supraconducteur choisi est MgB<sub>2</sub>. Celui-ci a une température critique de 39 K mais le prix du fil supraconducteur pourrait être divisé par dix par rapport à celui de l'YBCO. Il prône un générateur tout supraconducteur, c'est-à-dire que non seulement le rotor serait supraconducteur mais aussi l'induit. Le diamètre de la nacelle pour 10 MW est équivalent à

celui d'une nacelle non supraconductrice de 2 MW. Le poids du générateur pour une éolienne de 10 MW, de 320 tonnes est réduit à 70 tonnes.[21]

#### **I.6.4 La sustentation magnétique (MAGLEV magnetic levitation)**

##### **I.6.4.1 TRAIN À LÉVITATION MAGNÉTIQUE :**

Un train à lévitation magnétique est un train qui avance en utilisant la sustentation magnétique (lévitation). La sustentation magnétique est « l'état d'un corps maintenu à faible distance au-dessus d'une surface, sans contact avec elle, par une force verticale dirigée de bas en haut et équilibrant le poids du corps » Ce phénomène permet de soustraire un corps à l'action de la pesanteur. Il est réalisable grâce à la magnétisation. Les trains à sustentation magnétique « flottent » (ou lèvent) au-dessus d'une piste. Ils sont propulsés par des champs électromagnétiques et peuvent atteindre des vitesses élevées, puisqu'ils ne sont pas limités par le frottement de la roue sur le rail. [24]



**Figure I 23 Train maglev chinois**

La Chine a lancé son prototype de train à sustentation magnétique conçu pour fonctionner à une vitesse maximale de 600 km/h. [24]

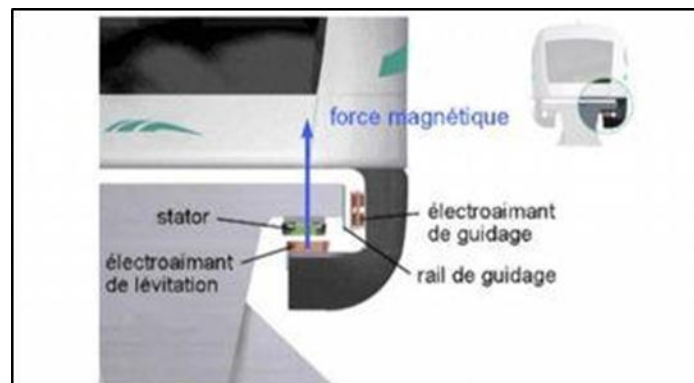


**Figure I 24 JR-Maglev train japonais**

Le JR-Maglev, le train à lévitation magnétique japonais a atteint la vitesse de 590 km/h.

#### **I.6.4.2 Les technologies :**

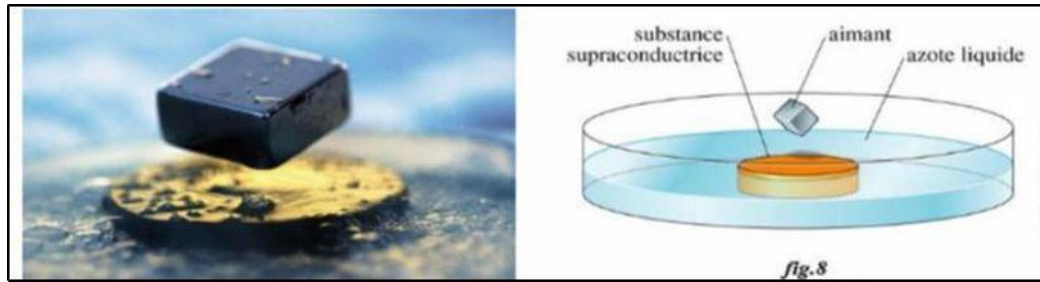
Il existe deux sortes de train à sustentation magnétique : le train à sustentation électromagnétique qui correspond au Transrapid Allemand et au Transrapid de Shanghai qui utilisent la lévitation (ou sustentation électromagnétique) et le train utilisant le système de propulsion magnétique (ou sustentation électrodynamique) qui correspond au Maglev Japonais. Le train à sustentation électromagnétique (ou EMS) : Ce train lévite strictement par attraction. Un électroaimant est placé sur la partie inférieure du train situé en dessous du rail sur lequel il circule. Des barres de fer laminé sont placées en dessous des rails de façon qu'elles se trouvent au-dessus des électroaimants. Les électroaimants sont attirés par les barres de fer laminé sans rentrer en contact avec elles. Cela permet donc au train de léviter sans avoir de contact avec le rail. Il faut noter les électroaimants ne sont supraconducteurs.[24]



**Figure I 25 Modélisation de la lévitation du transrapld**

La supraconductivité, c'est la propriété qu'ont certains matériaux de pouvoir transporter du courant électrique, sans perte et sans dissipation. Il faut imaginer que le courant électrique puisse se déplacer d'un endroit à l'autre dans ces matériaux, sans ralentir, sans perdre de l'énergie et donc, si on faisait tourner ce courant électrique dans un anneau supraconducteur, ce courant pourrait tourner quasiment à vie et même au-delà, une centaine d'années sans s'arrêter, parce que les électrons qui portent ce courant ne sont pas freinés et ne dissipent aucune énergie. C'est ça, la supraconductivité. Supra, ça veut dire que les électrons qui conduisent ce courant sont

tellement efficaces qu'ils n'auront aucune perte. C'est pourquoi on appelle ça un supraconducteur, c'est vraiment l'excellente conductivité. [24]



**Figure I 26 Effet Meissner**

L'exclusion de flux, due à ce que l'on appelle l'effet Meissner, peut être facilement démontrée en plaçant un petit aimant au-dessus d'un supraconducteur, et en abaissant la température de ce dernier en dessous de son  $T_c$ . L'aimant commencera alors à flotter au-dessus du supraconducteur.

Les supraconducteurs sont des matériaux dont le principe est de n'avoir aucune résistance électrique et de repousser les champs magnétiques à une température proche du  $0^\circ\text{C}$  absolu. En conséquence, la présence de supraconducteurs nécessite un système de refroidissement sophistiqué. Le train lévite donc une fois les électroaimants mis sous tension. Ces bobines (en yttrium) sont enfermées sous vide dans une coque qui maintient une température inférieure à 50K pendant 9h. Le trajet effectué par un train qui lévite de cette.

Manière doit donc être inférieure à 9h. L'action des électroaimants, avec les supraconducteurs qui fait léviter le train est appelée « force Laplace». [24]



**I.6.4.3 Avantages et inconvénients :**

Avantages	inconvénients
<p>*Se déplace à très grande vitesse.</p> <p>*La nuisance sonore est tres limitée.</p> <p>*La résistance aérodynamique ainsi que la vitesse lui permet de ne pas détruire le paysage et ses ecosystemes.</p> <p>*Ne rejette aucune fumée et n'utilise que peu d'électricité grace à une alimentation par secteur.</p>	<p>*Il y a très peu de trains a lévitation en service dans le monde</p> <p>*Coût de fabrication très élevé.</p> <p>*Ces trains nécessitent la présence de rails et d'aiguillages spécifiques qui ne sont pas les memes que ceux utilises pour les autres trains,</p> <p>*Pas adapte pour le transport de marchandises (une charge trop pesante pourrait entrainer des</p>

**Table I. 3 Avantages et inconvénients du train à lévitation magnétique**

**I.7. Conclusion :**

Dans ce premier chapitre nous avons présenté un bref historique de la supraconductivité, leurs propriétés et ses types, ainsi que leurs comportements magnétique. Sachant qu'il existe deux types : type I et type II. Ces derniers sont limités par des grandeurs critiques qui sont : la température critique  $T_c$ , le champ magnétique critique  $H_c$  et enfin la densité de courant critique  $J_c$ . Les supraconducteurs ont des performances et des propriétés remarquables qui rendent leur utilisation dans divers domaines d'application industriels.

# Chapitre II

## Conception des machines supraconductrices

## II.1. Introduction

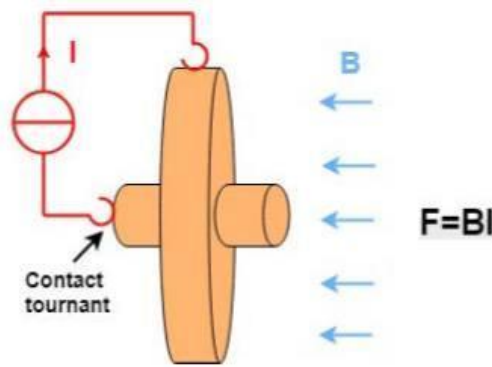
Les supraconducteurs occupent une place importante dans la recherche actuelle, et ce sont des promesses extraordinaires que toute une communauté tente d'exploiter. Si le refroidissement pénalise l'utilisation des supraconducteurs, il n'en reste pas moins que les scientifiques leur ont trouvé des applications très diverses, tant dans les domaines de l'environnement, de la médecine, de l'ingénierie que de l'électrotechnique. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la conception et le développement de moteurs et générateurs supraconducteurs depuis le début des années 1990. Nous détaillerons les différentes structures des machines produites et testées par différents travaux de recherche à travers le monde : machines synchrones, machines unipolaires, machines à hystérésis et machines aux conceptions originales

## II.2. Différentes topologies et conceptions des machines à supraconducteurs :

Pour beaucoup de réalisations, la topologie est identique aux machines électriques standards (synchrones, à aimants permanents, ...), on parle alors de cryo-copie, mais on peut également trouver des topologies propres à l'utilisation de supraconducteurs. Dans la suite de cet état de l'art, les machines supraconductrices sont répertoriées en fonction de la topologie puisque dans l'ensemble les mêmes remarques s'appliquent à des machines BTC/HTC ou totalement/partiellement supraconductrices. A ce jour beaucoup de machines supraconductrices ont été réalisées, [25]

### II.2.1. Machine homopolaire supraconductrice :

Les machines homopolaires ont été parmi les premières machines supraconductrices à être réalisées. Cela s'explique d'une part, par la simplicité de mise en œuvre qui est basée sur la loi de Laplace, et d'autre part, par l'utilisation « douce » des supraconducteurs (courants DC, bobine statique, et sans effort sur le fil). La simplicité du principe est rappelée sur la Figure 1.35. Un disque parcouru par un courant radiale (à partir de son centre jusqu'à son rayon extérieur) se met à tourner s'il est soumis à un champ magnétique parallèle à son axe de rotation. L'utilisation de supraconducteur permet d'accroître considérablement le champ magnétique inducteur DC et donc la puissance de la machine



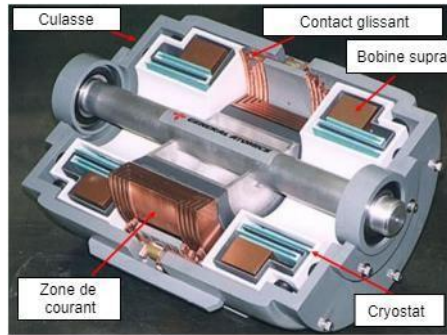
**Figure II. 1 Principe de fonctionnement d'une machine homopolaire**

Les machines homopolaires supraconductrices ont été pensées pour la propulsion des navires électriques. Quelques machines ont été réalisées, on peut citer la fabrication et l’implémentation pour trois navires de combats [26]. Mais les défauts, tel que le contact tournant, de la machine homopolaire ont conduit à l’abandon de cette topologie. Ces génératrices se comportent comme des sources de courant, les collecteurs de courant pour les très fortes intensités souffrent de mauvaises performances

	Pays	Institution	Puissance-Vitesse	Type	Remarque
1990-2000	USA	NSWC	125kW 11 700 tr/min	BSCCO	<b>Propulsion marine</b> • •125kW à <b>4 K</b> • 91 kW à <b>28 K</b> • Testé sur un bateau
2000-10	USA	General Atomics (NSWC)	3,7 MW 500 tr/min		<b>Propulsion marine</b> • •Rendement de 97 % • Champ magnétique dans l’entrefer de <b>2 T</b> • Puissance/Couple massique : <b>0,3 kW/kg - 6 Nm/kg</b>
2010-20	AUS	GET	200 kW 3600 tr/min		• Opération à <b>28 K</b> • Contact glissant en liquide métallique • Blindage actif • Rendement de 86 % • Champ magnétique dans l’entrefer de <b>2,4 T</b>

**Table II. 1 Quelques réalisations de machines supraconductrices homopolaires**

NSWC: Naval Surface Warfare Center, GET : Guinea Energy Technologies



**Figure II. 2 Coupe d'une machine supraconductrice homopolaire réalisée par General Atomics**



**Figure II. 3 Moteur Homopolaire 3,7 MW, GENERAL ATOMICS et sa charge à gauche [27].**

Le véritable propulseur de cette technologie est l'entreprise américaine GENERAL ATOMICS qui possède un programme de recherche qui vise à promouvoir cette structure pour la propulsion marine. Après avoir étudié des prototypes de faible puissance, GENERAL ATOMICS a construit le plus gros démonstrateur homopolaire SHTc connu actuellement [28], Cette machine a une puissance de 3,7 MW . D'autres projets sont à l'étude, notamment un moteur de 36,5 MW, 120 tr/min.

### **II.2.2 Machines synchrones supraconductrices**

A cause de difficultés de refroidissement, les premières machines supraconductrices synchrones avaient un induit tournant [29]. Les leviers techniques ont ensuite été franchis pour avoir des topologies à inducteur tournant.

Les machines synchrones supraconductrices sont actuellement réalisées par des fils SHT de type BSCCO ou YBCO. L'induit de ses machines est généralement sans fer et fabriqué avec des conducteurs en cuivre et seul l'inducteur est supraconducteur.

Un des avantages de la machine supraconductrice est de supprimer pratiquement les pertes de l'inducteur et par conséquent d'augmenter le rendement d'un à deux pour cent. Cette

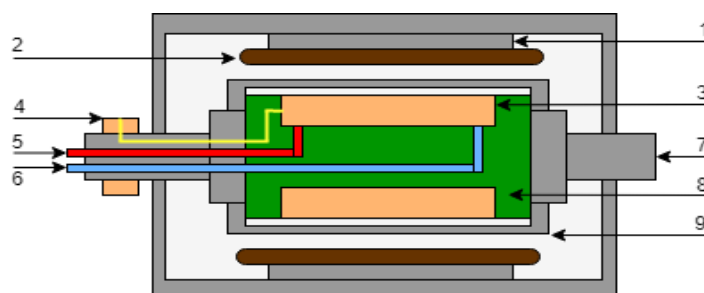
augmentation peut paraître marginale, mais dans certaines applications, comme l'exploitation pétrolière ou la compression du gaz, cela représente un gain cumulé en énergie susceptible d'intéresser les exploitants [27]. Un autre avantage, lié à la densité du courant élevée, est la minimisation de la taille des moteurs et alternateurs. On espère augmenter le couple massique ou la puissance massique d'un facteur au moins égale à deux.

Les points cruciaux de la conception sont la transmission du couple et la réalisation du cryostat. En effet, il faut relier des parties froides, à une vingtaine de Kelvin dans les réalisations récentes, à des parties chaudes, à la température ambiante, en minimisant le flux de chaleur amené à l'intérieur de l'inducteur [27].

### II.2.2.1 Rotor bobiné

Des bobines supraconductrices sont utilisées pour générer le champ magnétique DC de l'inducteur. L'induit peut être réalisé avec un bobinage supraconducteur ou avec un bobinage classique en cuivre. On peut répertorier deux différentes façons de concevoir ce type de machine [30] [31].

Les machines à «air» emploient des matériaux ferromagnétiques uniquement pour la culasse extérieure pour minimiser le rayonnement électromagnétique. Puisqu'un noyau ferromagnétique au rotor saturerait rapidement avec les forts champs magnétiques générés par les enroulements supraconducteurs, on l'élimine. Cette topologie permet d'obtenir d'importante puissance massique. Par contre en l'absence de matériaux ferromagnétiques au rotor, l'effort est directement subi par les fils supraconducteurs, ce qui peut dégrader leurs performances. Le stator peut être également dépourvu de dents ferromagnétiques. Par ce biais on peut augmenter le taux de remplissage des bobines de l'induit. De par l'absence de fer, ces machines ont une très faible réactance synchrone. Sur la (Figure II.3.), une coupe d'une machine à «air» est représentée, les bobines supraconductrices doivent être supportées par un matériau aux bonnes propriétés mécaniques et de mauvaises propriétés thermiques.



**Figure II. 4** Section d'une machine radiale à air : 1-Culasse ferromagnétique 2-Bobines en cuivre 3-Bobines supraconductrices 4-Bagues/balais 5-Sortie cryogène 6-Entrée cryogène 7-Arbre mécanique 8-Support non-magnétique 9-Cryostat/Blindage électromagnétique

### II.2.2.2 Machines à aimants supraconducteurs :

Ce type de structure suscite un très fort intérêt pour les applications à forte densité de puissance, par la possibilité d'aimanter les massifs supraconducteurs à des valeurs bien au-dessus des aimants permanents. La principale difficulté dans la réalisation de ces machines est la magnétisation in-situ. Ainsi par soucis d'encombrement, la technique du champ pulsé est préférée dans beaucoup de cas. Cependant, les élévations de température lors des pulses de champ magnétique sont très néfastes sur les propriétés des supraconducteurs. C'est pour cette raison qu'aujourd'hui le champ piégé avec cette technique n'est guère meilleur qu'une utilisation d'aimants permanents

### II.2.2.3 Quelques machines synchrones :

On peut citer trois exemples distincts de machines synchrones supraconductrices de forte puissance qui ont été réalisées et testées. Leur topologie et leur principe de fonctionnement sont similaires à ceux d'une machine synchrone classique. Le premier concerne un moteur fabriqué par American Superconductor et General Electric, pour la propulsion marine de 36,5 MW à 120 tr/min [32] et qui a été testé avec succès à pleine charge. Par rapport aux moteurs classiques, ce moteur a un bon rendement, et le gain en terme de compacité (poids et volume) est de plus 50 % .



**Figure II. 5 Moteur HTC le plus puissant (36,5 MW) jamais construit [32]**

Des machines à noyaux rotoriques sont des machines avec un noyau ferromagnétique au rotor. La présence de fer réduit la quantité de fil supraconducteur à utiliser et ainsi le prix. Il est également possible d'ajouter des plots ferromagnétiques au tour des bobines supraconductrices. Ces plots vont canaliser les lignes de champ dans le fer et ainsi réduire la contrainte magnétique sur le fil supraconducteur, ce qui va en améliorer les performances. De

plus, à condition de ne pas trop le saturer, l'effort principale est repris par les plots. Pour les mêmes raisons que précédemment, on peut se passer des dents ferromagnétiques pour le bobinage de l'induit.

American Superconductor a construit d'autres moteurs d'une puissance comprise entre 0,75 à 5 MW [33] utilisant le ruban BSCCO. Différents tests dans des conditions réelles de fonctionnement ont été menés sur ces machines afin de démontrer leur robustesse et leur viabilité commerciale [34].

SIEMENS, autre acteur d'importance dans le domaine des machines supraconductrices, a réalisé une machine de 400kW. Cette machine a pu fonctionner jusqu'à 700% de sa capacité nominale contre 130% seulement pour une machine classique [35] La machine, en fonctionnement alternateur [36] a pu produire 600kW pendant 15 minutes ce qui représente un pic de production 150% de sa puissance nominale. Les performances ayant montré la validité du concept ont conduit à la réalisation de machine à 4MVA et 3600 tr/min



**Figure II. 6 Machine SIEMENS de 4 MW [37]**

En France, la première machine SHTc est fabriquée par Convertteam Nancy en 2008. Ce démonstrateur 250 kW-1500 tr/min a été réalisé dans le cadre du projet européen ULCOMAP (ULtra-COMpact MARine Propulsion), Ce projet vise à montrer le gain en compacité des moteurs SHTc par rapport aux machines conventionnelles, pour une utilisation dans les applications marines. Cette machine a été réalisée et testée en pleine charge [38]

<i>Puissance</i>	<i>250 kW</i>	<i>Nombre de</i>	<i>3</i>
<i>Vitesse</i>	<i>1500</i>	<i>Fil HTc</i>	<i>1G Bi-</i>
<i>Paire de pôles</i>	<i>tr/min</i>	<i>Refroidissement de l'inducteur</i>	<i>2223-Néon</i>
<i>Fréquenc</i>	<i>50 Hz</i>	<i>Courant</i>	<i>30 A</i>
<i>Tension nominale</i>	<i>400V</i>	<i>Réactance directe</i>	<i>Xd = 0.22 pu</i>
<i>Courant nominal</i>	<i>360A rms</i>	<i>Quadrature axis réactance</i>	<i>Xq= 0.1 pu</i>

**Table II. 2 Caractéristiques du générateur 250 KW-1500 tr/min, Convertteam Nancy**





Figure II. 7 Machine ULCOMAP de 250 kW [38]

### II.2.3 Machine Asynchrone Supraconductrice :

D'une manière générale, le couple de démarrage d'une machine asynchrone est assez faible. C'est la raison pour laquelle des doubles encoches ou des encoches rotoriques de formes particulières sont employées sur les rotors à cage d'écureuil. En contrepartie pour un couple donné et proche de la vitesse de synchronisme, le glissement et donc les pertes sont augmentées

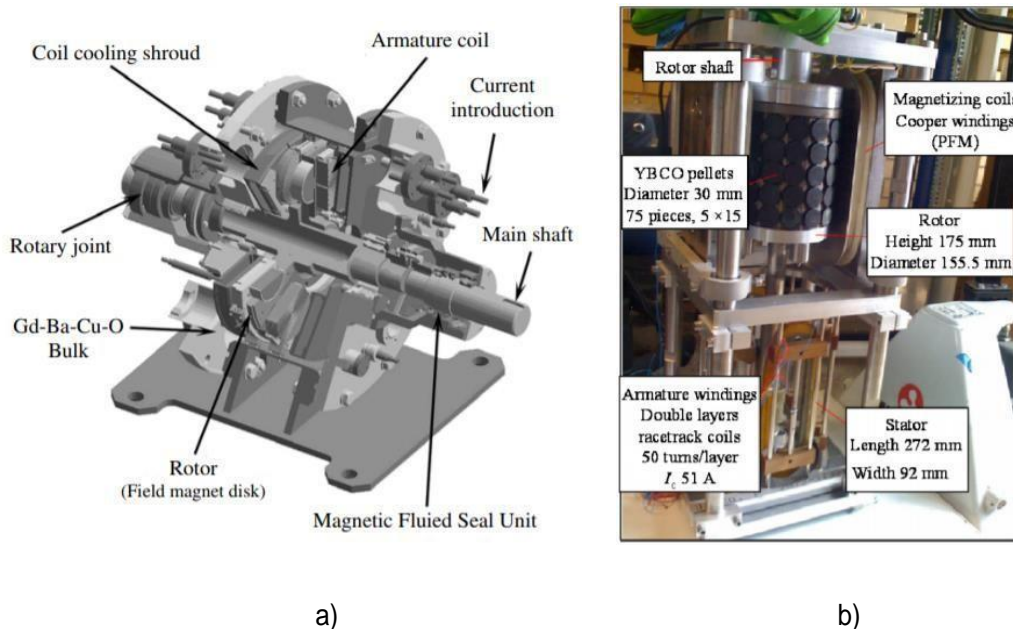


Figure II. 8 Machine à aimant supraconducteur a) axiale de 10 kW [38] b) radiale de 7,8 kW [39]

Cependant, une machine a synchrone supraconductrice profite d'un fort couple au démarrage et d'un couple non-dégradé proche du synchronisme. En effet, la caractéristique

non-linéaire E-J des supraconducteurs permet ce comportement. Au moment du démarrage, la valeur du glissement vaut 1 car le rotor ne tourne pas. Les supraconducteurs sont utilisés dans le urétat dissipatif (au-dessus de  $E_c$ ) et un courant important circule dans les barres du rotor. Le couple de démarrage est important. Au contraire quand le moteur accélère la résistance du rotor diminue fortement avec le glissement (en dessous de  $E_c$ ). La particularité est que proche de la vitesse de synchronisme (in atteignab le avec une machine asynchrone standard), un flux magnétique est piégé entre les barres permettant au rotor d'atteindre la vitesse de synchronisme.

A ce jour, peu de machine sa synchrones existent sous une forme partiellement supraconductrice car le large entrefer engendre de fortes fuites de flux. Les quelques réalisations concernent des machines toutes supraconductrices.

Pays	Institution	Puissance-Vitesse	Type	Remarque
JAP	NEDO	20 kW 1200	BSCCO	• Opération à <b>77 K</b>
CHI	Beijing University	500 kW	BSCCO	• Opération à <b>77 K</b> • Puissance massique : <b>3,3 kW/kg</b> • Pas testé

**Table II. 3 Quelques réalisations de machines asynchrones supraconductrices**



**Figure II. 9 Machine à induction supraconductrice de 20 kW [40]**

## II.2.4 Des machines à topologies a typiques

Cette partie répertorie les machines supraconductrices dont le fonctionnement n'est pas commun. Elles trouveraient toutes leurs places dans la partie sur les machines synchrones mais

leurs particularités méritent que l'on s'attarde sur leurs comportements. Le second point commun entre ces structures est l'utilisation de massifs supraconducteurs.

### II.2.4.1 Machine à hystérésis

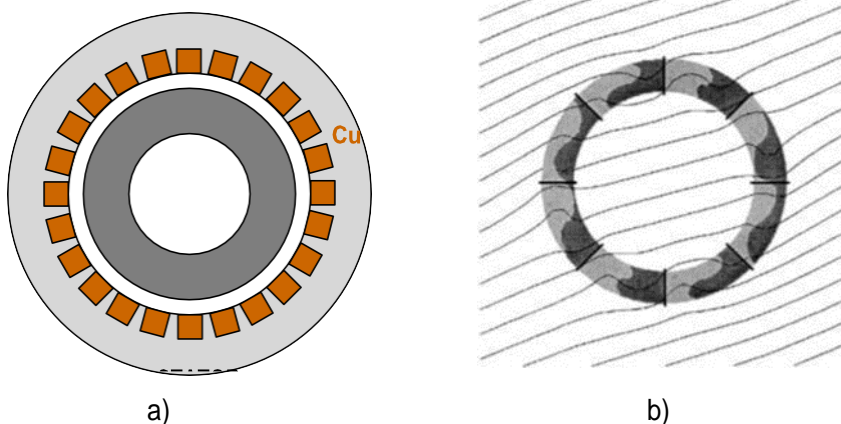
Le schéma d'une machine supraconductrice à hystérésis est représenté sur la (**Figure II.10.a**). Idéalement, le rotor prend la forme d'un anneau supraconducteur creux disposé sur la partie centrale du rotor qui doit être fabriqué avec un matériau paramagnétique. A l'époque de ces travaux, la difficulté pour réaliser l'anneau conduit à utiliser plusieurs massifs supraconducteurs maintenus par une résine d'époxy. Quant au stator, il est composé d'un circuit ferromagnétique et de bobines en cuivre classiques.

Quand le rotor supraconducteur est placé dans le champ tournant du stator, les vortex qui existent dans l'état mixte du supraconducteur se déplacent jusqu'à un autre site d'ancrage. Ce mouvement induit des super-courants qui magnétisent l'anneau. D'une façon analogue aux machines asynchrones, ce sont les pertes au rotor qui se traduisent en couple mécanique. Afin d'augmenter la puissance de la machine, il faut augmenter les pertes. La pénétration du courant joue alors un rôle car si l'épaisseur de l'anneau supraconducteur est trop importante, les performances sont diminuées. Une simulation de la pénétration du courant est montrée sur la (**Figure II.10.b**) pour plusieurs massifs imprégnés.

Avec un refroidissement à l'azote liquide, les machines supraconductrices à hystérésis ont atteint des puissances massiques 5 à 7 fois plus importantes que des machines à hystérésis avec du fer [45 41] Les limites de ces machines sont:

- La création d'un champ tournant suffisamment important pour pénétrer les massifs.

Le sectionnement du rotor, où des études numériques sont montrées que les fuites de flux entre les massifs étaient trop importantes.



**Figure II. 10 a) Section d'une machine à hystérésis b) Courant induit dans l'anneau supraconducteur du rotor**

### II.2.4.2 Machine à réluctance variable :

Le couple d'une machine à réluctance est lié à la saillance magnétique du rotor, c'est-à-dire la différence de perméabilité entre l'axe de tq du rotor (définis sur la **Figure II.11**). Cette différence est généralement créée par une alternance de matériaux amagnétiques et ferromagnétiques. Une machine supraconductrice à réluctance hybride consiste à remplacer les matériaux amagnétiques par des matériaux supraconducteurs fonctionnant en écrans. L'effet recherché est l'augmentation de la saillance avec la réponse fortement diamagnétique des massifs supraconducteurs. La différence de perméabilité entre l'axe de tq est ainsi fortement augmentée, le flux suivant l'axe q étant n théorique nul.

Plusieurs réalisations jusqu'à 40kW ont montré que la puissance massique de ces moteurs était augmentée de 3 à 6 fois par rapport à des machines à réluctance standard. Une telle augmentation est justifiée par:

- La même machine a été utilisée sauf que pour la machine standard les parties supraconductrices ont été enlevées. Le circuit à réluctance possède donc de moins bonnes qualités.
- La totalité de la machine supraconductrice a été plongée dans l'azote liquide. Un courant de plus forte amplitude pouvait alors circuler dans le cuivre

Des machines de 150kW ou encore des structures linéaire sont été dimensionnées suivant cette topologie

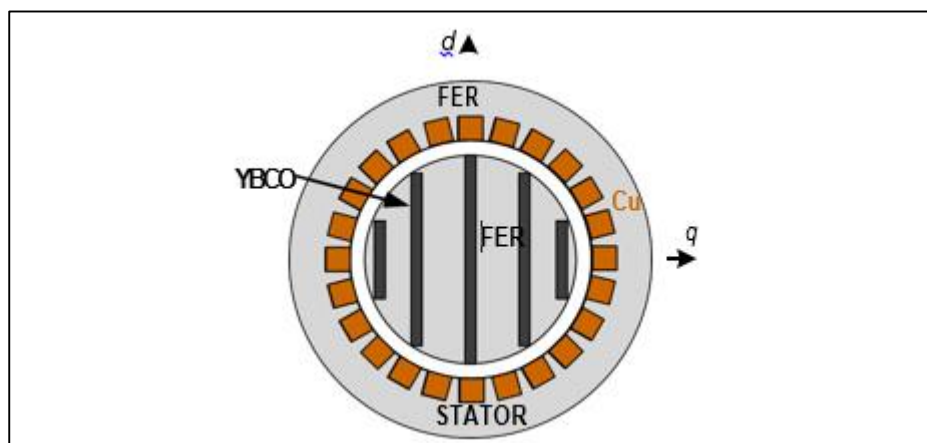


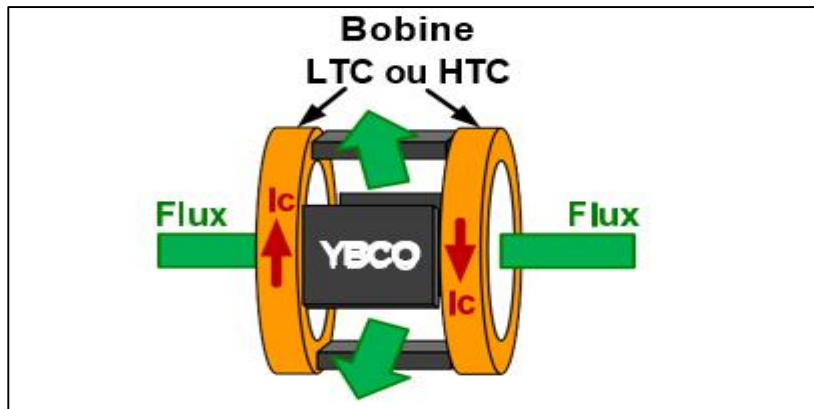
Figure II. 11 Section d'une machine à réluctance variable

### II.2.4.3 Machines à modulation de flux

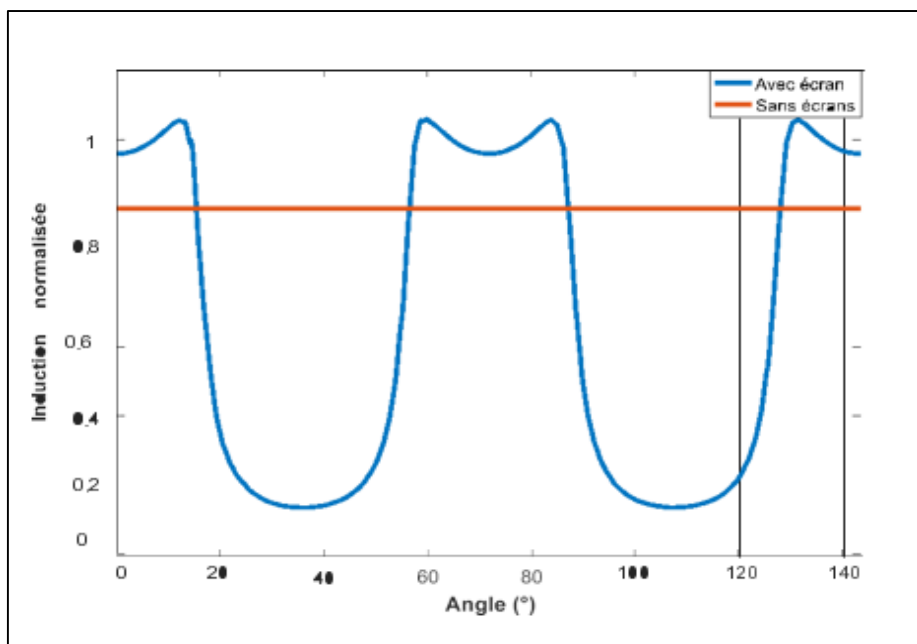
Ce sont des machines qui ont été développées et réalisées au sein du laboratoire du GREEN de Nancy. L'inducteur d'une machine à modulation de flux est représenté sur la **Figure II.12**. Sur cette figure, deux solénoïdes supraconducteurs coaxiaux sont alimentés avec des courants opposés. Ainsi le flux est dirigé radialement entre les solénoïdes.

Des massifs supraconducteurs sont ensuite disposés à l'endroit où la direction du flux est radiale et sont répartis sur le pourtour. Pour cette machine, les massifs sont utilisés comme des écrans grâce à la réponse diamagnétique des supraconducteurs. Le champ magnétique ne peut donc circuler qu'entre les écrans.

La variation de l'induction magnétique, observé dans l'entre fer, est donc une alternance entre une zone de fort champ magnétique entre les pastilles et une zone où le champ magnétique est faible derrière une pastille, voir **Figure II.12**. Cette distribution est particulière car elle ne s'apparente pas à un inducteur standard où l'alternance est positive et négative.



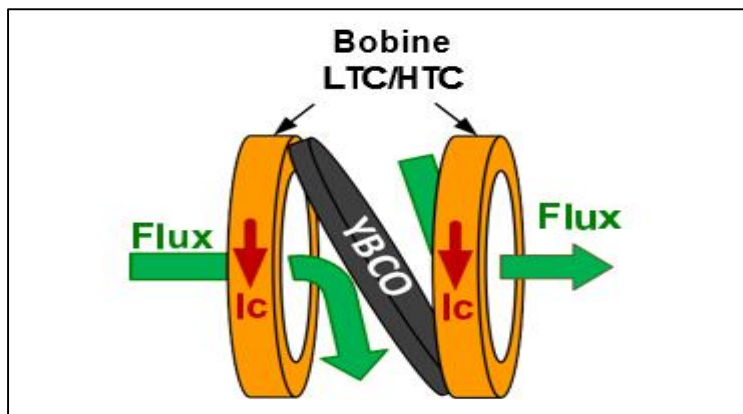
**Figure II. 12** Principe de l'inducteur à modulation de flux



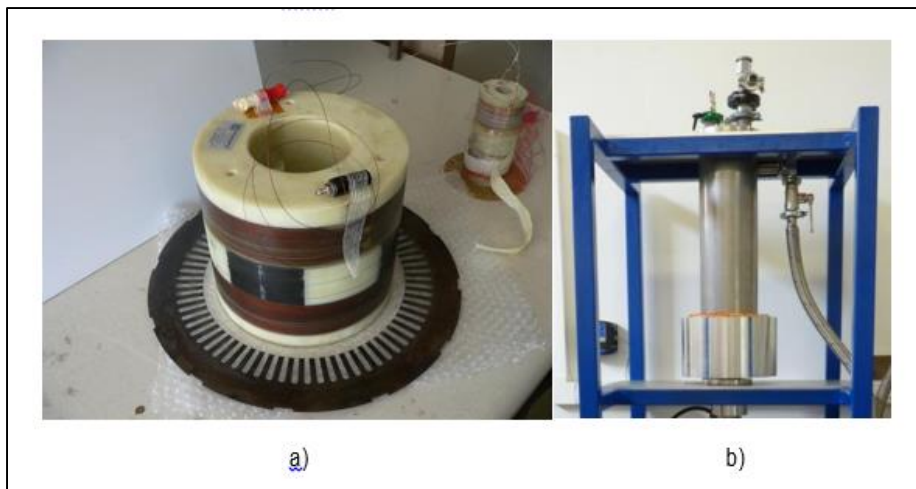
**Figure II. 13 Répartition du flux magnétique dans l'entrefer**

**II.2.4.4 Machines à barrière de flux :**

La machine à barrière de flux utilise également la réponse diamagnétique des supraconducteurs. L'inducteur est représenté sur la **Figur II.14**. On retrouve la topologie avec les deux solénoïdes supraconducteurs mais cette fois-cialimentés par des courants dans la même direction. La variation du champ magnétique dans l'entrefer est créée par l'ajout d'un massif supraconducteur inséré enbiais entre les solénoïdes .L'avantage de cette structure est la création d'une variation de l'induction magnétique très proche d'une sinusoïde



**Figure II. 14 Principe de l'inducteur à barrière de flux**



**Figure II. 15 a) Inducteur à modulation de flux [42] b) Machine à barrière de flux [43]**

### **II.3 Conclusion :**

Le travail accompli par les équipes de recherche universitaires et les équipes de développements industriels mondiales est conséquent et le panel des réalisations est très varié. Les machines synchrones à pôles saillants à flux radial demeurent les plus répandues pour les fortes puissances. Pour ces moteurs, les applications embarquées et industrielles sont principalement les plus visées. Aussi, la faisabilité ainsi que la fiabilité de ces machines est démontrée, des études sur leur comportement et leurs performances à long terme ont été menées avec succès.

Chapitre III  
Etude de conception de machine  
supraconductrice à concentration de flux



### **III.1-INTRODUCTION :**

Les machines supraconductrices sont plus légères, plus compactes et plus efficaces par rapport aux machines conventionnelles, et elles offrent également un fonctionnement stable nettement supérieur dans un système électrique [44] en raison de leur faible réactance synchrone. Récemment, des moteurs et des générateurs supraconducteurs ont été conçus et testés avec succès [45]-[46].

Afin d'explorer les différentes possibilités d'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les machines électriques. Le laboratoire 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

Notre travail est consacré à l'étude d'une machine supraconductrice à huit pôles constituée d'une armature conventionnelle rotative et d'une inductance supraconductrice stationnaire basée sur la concentration du flux magnétique. L'inducteur est maintenu fixe afin de simplifier la cryogénie et de minimiser les pertes de froid. L'inductance utilise une topologie originale formée de bobines de champ et de plaques supraconductrices massives conduisant à une densité de flux d'entrefer accrue.

Depuis 1998, plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans par le Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy (GREEN), plus particulièrement dans le cadre de deux thèses qui ont permis de valider un principe de machine électrique sur un inducteur modèle, puis de réaliser un moteur de 20kW-750tr/min.

Les travaux menés par P. Masson, ont permis, après une étude sur la concentration de flux magnétique entre des écrans supraconducteurs, de proposer une géométrie d'un inducteur original basé sur un principe de concentration de flux. Ensuite un moteur synchrone a réalisé avec succès à Nancy par El Hadj Ailam [50] .

### **III.2 Etude préliminaire des composants de la structure de l'inducteur.**

Dans ce paragraphe, nous présentons l'étude menée par P. Masson d'une structure qui utilise un matériau supraconducteur pour diriger et focaliser un champ magnétique. Qui commence d'abord par expliquer le principe du blindage magnétique par refroidissement hors champ des supraconducteurs.

Suivit d'une expérience qui montre la possibilité de modifier la distribution spatiale de l'induction magnétique à l'aide de supraconducteurs cryogéniques à champ nul, et ainsi augmenter la valeur de l'induction magnétique en concentrant le flux.

Nous terminerons par la structure de l'inducteur qui fonctionne sur le principe de la concentration du flux magnétique.

### III.2.1 Les mécanismes du blindage magnétique

Nous appelons blindage magnétique la capacité d'un supraconducteur refroidi hors champ à repousser les lignes de champ magnétique. Nous présentons dans cette partie le principe du blindage.

D'après la loi de Lenz lorsqu'un circuit conducteur est soumis à une variation du flux magnétique à travers sa section, celui-ci développe des courants qui s'opposent à la variation de flux et donc au phénomène qui a créé la variation de flux. Par exemple, la figure III.1 présente un anneau conducteur devant lequel, un aimant permanent est avancé. Des courants se développent dans l'anneau afin de s'opposer à la variation du flux et génèrent donc une force qui s'oppose au déplacement de l'aimant.

Dans un conducteur résistif, les courants induits s'amortissent.

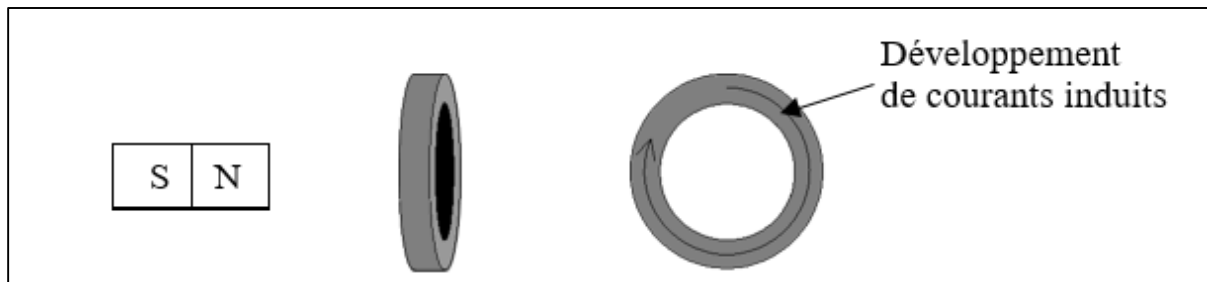
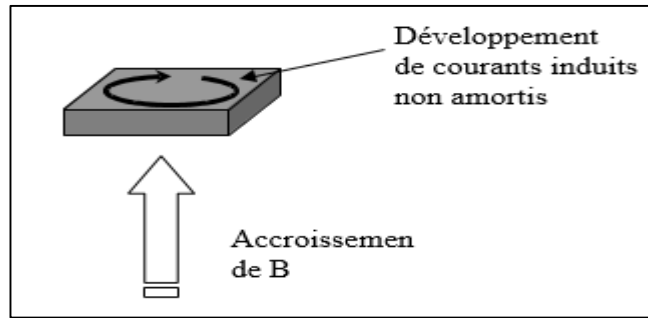


Figure III 1 illustration de la loi de Lenz [48]

Un élément supraconducteur soumis à une variation de champ magnétique extérieur développe des courants qui s'opposent à la variation du flux magnétique dans le volume de l'élément. Ces courants, non amortis, maintiennent la valeur du flux constante.



**Figure III 2 Principe du blindage par supraconducteur massif [48]**

Un supraconducteur ne peut pas voir de variation de flux dans son volume. La figure III.2 illustre le principe du blindage magnétique par supraconducteur massif.

Si un supraconducteur est refroidi à champ nul, il va « essayer », dans les limites de ses capacités (essentiellement en terme de densité de courant) de garder un champ nul dans son volume. Tout champ magnétique imposé de l'extérieur est donc repoussé et les lignes d'induction contournent le matériau.

### **III.2.2 Le modèle des états critiques :**

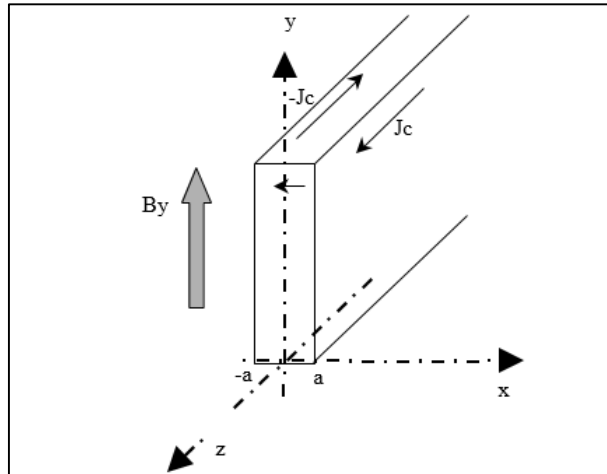
A fin de mieux comprendre le phénomène de blindage magnétique ainsi que ses limites, voyons comment le modèle des états critiques de Bean prédit le développement des courants.

La figure III.3 présente une plaque supraconductrice ayant pour dimension  $2a$  suivant l'axe  $x$  et étant de grandes dimensions suivant les deux autres axes  $y$  et  $z$ .

En 1964, C.P.Bean [BEA64] a présenté un modèle basé sur le principe que la densité de courant dans un supraconducteur est soit nulle, soit égale à sa densité de courant critique  $J_c$ .

$$J=0 \quad \text{ou} \quad J=J_c$$

Dans des cas simples, ce modèle permet de prévoir le comportement des supraconducteurs. Dans le cas simple d'une plaque supraconductrice.

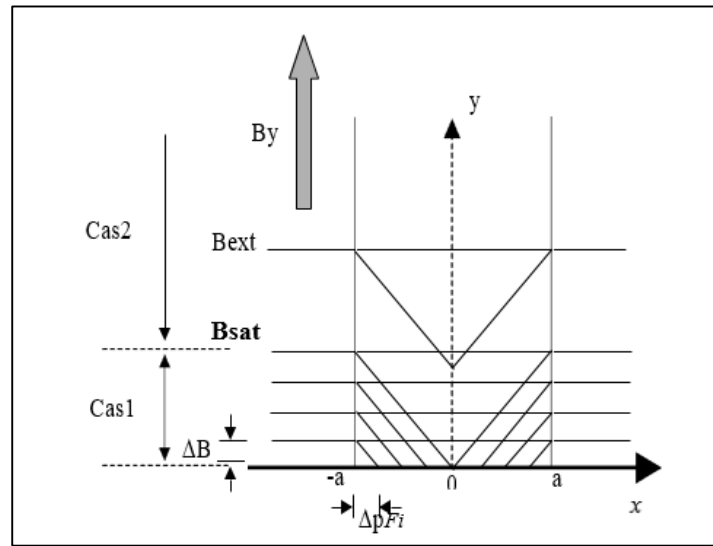


**Figure III 3 Plaque supraconductrice infiniment longue [48]**

Si un champ extérieur croissant ( $B_y$ ) est appliqué suivant l'axe y, des courants sont induit sa fin de s'opposer à la variation du flux à l'intérieur de la plaque. Ces courants sont très proches des courants de Foucault à l'exception près qu'ils ne s'amortissent pas, car le supraconducteur ne présente pas de résistance électrique.

La figure suivante FigureIII.4 représente le profil de la distribution de l'induction à l'intérieur de la plaque supraconductrice pour différentes valeurs de la composante suivant l'axe y du champ appliqué.

Considérons un accroissement  $\Delta B$  partant de  $B=0T$ . Cet accroissement de champ va produire le développement de courants dans une zone de largeur  $\Delta p$ . Dans cette zone, nous avons développement de courants de densité  $J_c$  et donc pénétration de l'induction. Le reste du volume reste à courant et à champ nul.



**Figure III 4 Modèle des états Critiques[48]**

Les courants se développent donc de l'extérieur du matériau vers l'intérieur. Lors que le courant occupe tout le volume du supraconducteur, un accroissement supplémentaire du champ extérieur ne peut être contré par la création d'un courant supplémentaire, l'accroissement de champ pénètre donc le supraconducteur.

Ce cas est connu par la saturation en courant. C'est la limite de la capacité de blindage du matériau.

Pour une application de blindage magnétique, le supraconducteur reste froidi à champ extérieur nul. Ensuite, le champ magnétique croît jusqu'à la valeur désirée. Le supraconducteur n'est alors soumis qu'à un accroissement du champ permettant le développement des courants de blindage.

En s'appuyant sur la figure III.4, il apparaît deux cas: cas1 :le supraconducteur n'est pas saturé en courant.

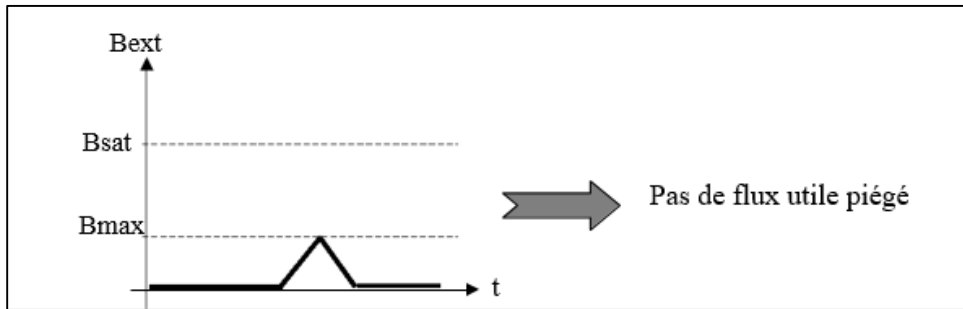
Si on représente un cycle de champ magnétique  $B=0T$

$\Rightarrow B=B_{max}$

$\Rightarrow B=0T$ .Le cas non saturé correspond à

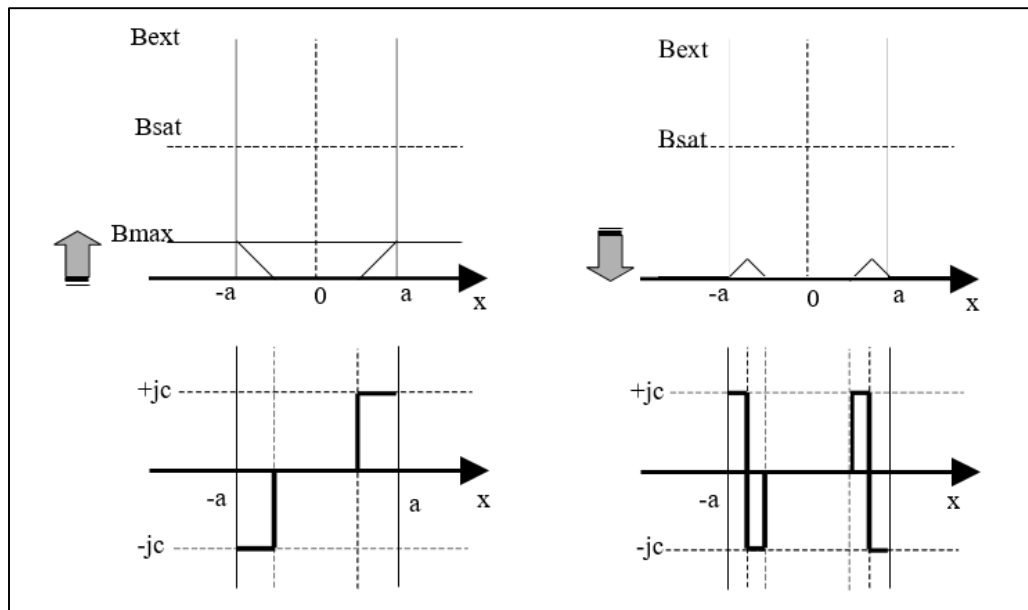
$B_{max} < B_{sat}$ .

$B_{sat}$  étant la valeur de l'induction nécessaire pour saturer le supraconducteur en courant.



**Figure III 5 Cycle de champ inférieur à  $B_{sat}$  [48]**

Dans ce cas, aucun flux magnétique utile n'est piégé, néanmoins, des courants antagonistes circulent dans le supraconducteur comme nous pouvons le constater sur la *Figure III.6* et il existe un flux résiduel dans le matériau. Ces courants ont été créés par la montée et la descente du champ extérieur.



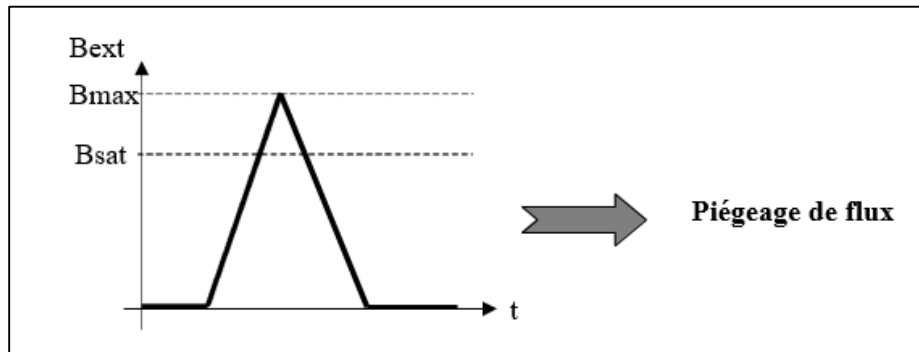
**Figure III 6 Modèle d etas desable pour un supraconducteur non saturé. [48]**

Les courants antagonistes créés lors du cycle ont une contribution en champ très faible vu de l'extérieur du matériau.

Cas 2: le supraconducteur est saturé en courant.

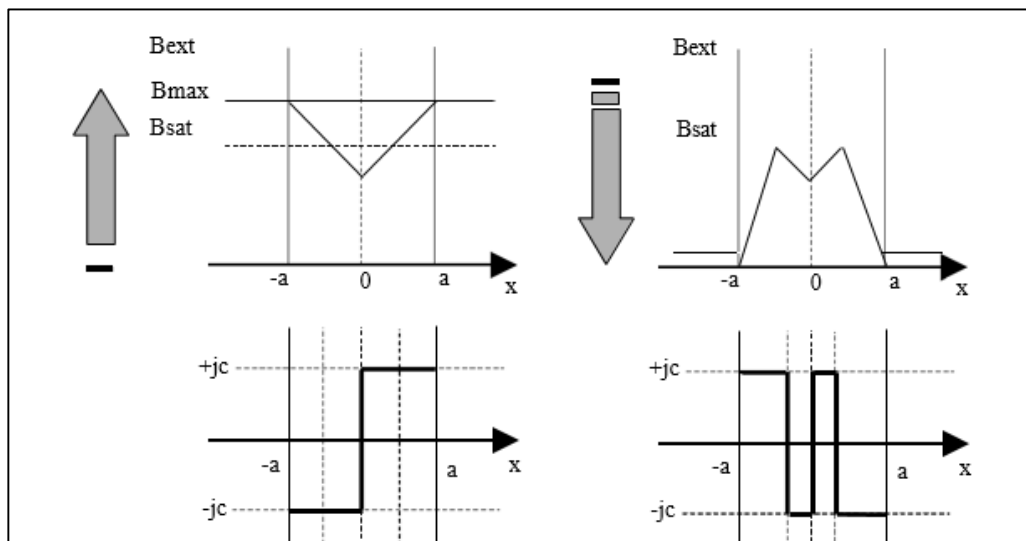
Ce cas est représenté par  $B_{max} > B_{sat}$ .

La figure III.7 présente un cycle de champ magnétique extérieur en fonction du temps.



**Figure III 7 Cycle de champ magnétique conduisant à la saturation du supraconducteur. [48]**

Le champ magnétique extérieur ayant continué à augmenter au de là de la valeur de saturation, un flux magnétique a pénétré le supraconducteur et donc, conformément à la loi de Lenz, ce flux a été piégé. Le supraconducteur est alors saturé en courant.



**Figure III 8 Modèle de stas desable pour un supraconducteur saturé en courant. [48]**

Nous pouvons constater dans ce cas que lors que le champ magnétique extérieur est revenu à zéro, les courants qui circulent dans le matériaux ne se compensent pas. Le matériau a donc piégé du flux.

La valeur du champ magnétique extérieur conduisant à la saturation en courant du matériau est une donnée très importante lorsqu'on désire obtenir un blindage magnétique efficace. Cette valeur dépend de la densité critique du courant et constitue un critère de choix pour le matériau.

Plus la densité de courant critique est élevée, plus la valeur de  $B_{sat}$  est élevée.

### III.2.3 Modification de la répartition de l'induction magnétique :

Nous avons vu le principe du blindage magnétique par supraconducteurs massifs. Les supraconducteurs, refroidis à champ nul, s'opposent aux variations du champ magnétique. Cette réaction des supraconducteurs déforment les lignes de champ qui ont tendance à contourner matériau. le Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy (GREEN) a utilisé ce phénomène pour réaliser une concentration de l'induction.

Deux bobines en série et de même axe créent un champ magnétique tel que celui représenté sur la (Figure III.9). La (Figure III.10) donne une idée de la valeur de l'induction dans une telle structure. Les zones sombres sont les zones dans lesquelles l'induction est la plus élevée.

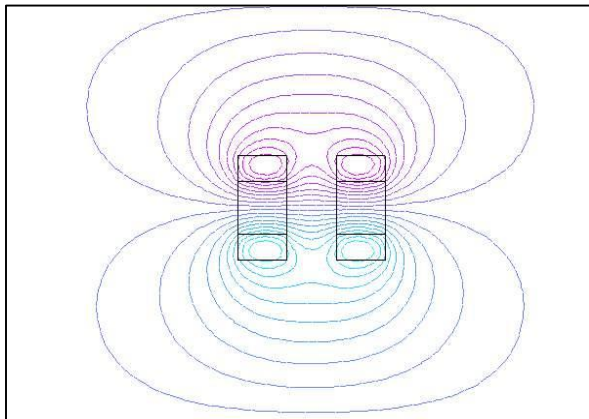


Figure III 10 Lignes de champ dans un système de deux bobines en série. [48]

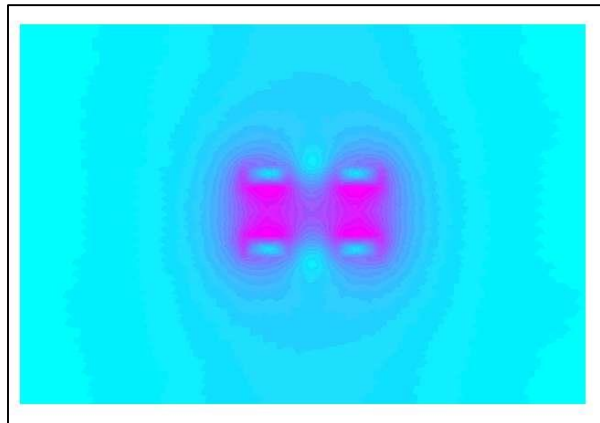
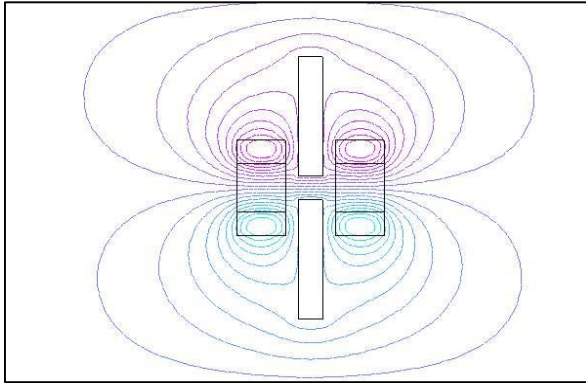


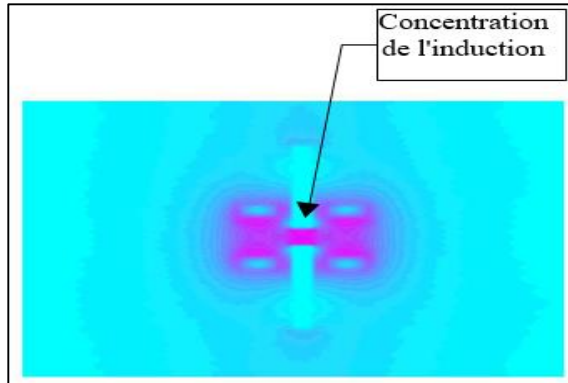
Figure III 9 Induction dans un système de deux bobines en série. [48]

Si deux plaques supraconductrices sont placées de part et d'autre de l'axe entre les deux bobines, les lignes de champ passant d'une bobine à l'autre vont avoir un espace réduit pour le faire. Elles se trouveront alors plus serrées, et donc, la valeur de l'induction sera augmentée entre les deux plaques, comme l'illustre la figure suivante.





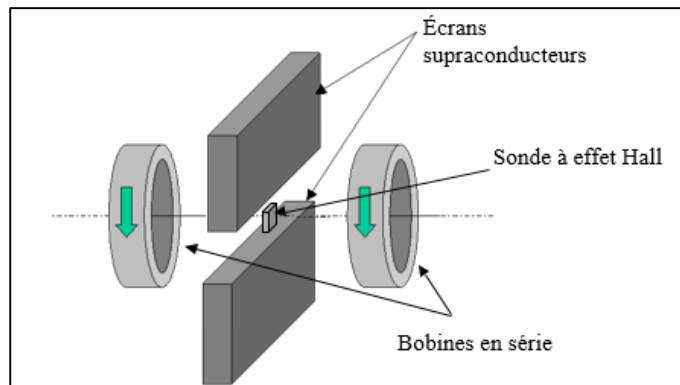
**Figure III 12** Lignes de champ après concentration de l'induction [48]



**Figure III 11** Induction après concentration [48]

Nous pouvons voir que les lignes sont effectivement plus serrées entre les plaques diamagnétiques (**Figure III.11**) et que, par conséquent l'induction magnétique est plus élevée (**Figure III.12**).

A fin de valider cette propriété, l'équipe du laboratoire GREEN a mis en œuvre une manipulation à l'azote liquide. Le schéma du système est donné sur la figure suivante



**Figure III 13** Schéma expérimental pour la concentration de flux [48]

Deux pastilles supraconductrices à haute température critique mesurant 20mm\*20mm\*5mm en Bi-2223 ( $\text{Bi}_{1,8}\text{Pb}_{0,26}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ ) ont été utiliser.

La figure suivante présente les mesures effectuées a température ambiante ( $T=300\text{K}$ ) et dans l'azote liquide ( $T=77\text{K}$ ).

Entre la manipulation à température ambiante et celle dans l'azote liquide, La valeur de l'induction magnétique a été multipliée par 1,3. Cette expérience a permis de démontrer qu'il était possible d'utiliser des supraconducteurs massifs dans le but de concentrer un flux magnétique.

### III.2.4 Structure d'inducteur de la machine :

La répartition spatiale de champ magnétique a été modifiée en utilisant des écrans supraconducteurs. L'objet de cette étude est de concevoir la structure d'un inducteur pouvant être utilisé dans une machine classique. L'objectif est donc d'obtenir une variation angulaire du champ produit par l'inducteur.

Partons d'une structure produisant une répartition de champ indépendante de la position angulaire autour de l'axe des bobines.

Une telle répartition peut être générée par deux solénoïdes de même axe et en opposition.

La figure III.14. montre qu'entre les solénoïdes, le champ créé au niveau du rayon extérieur des bobines est radial et ne dépend pas de la position angulaire du système. [48]

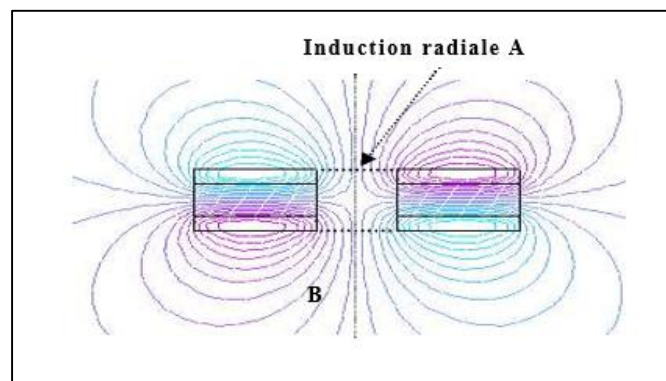


Figure III 14 Lignes de champ produites par deux solénoïdes en opposition [48]

Dans le plan A-B de la (Figure III.14), l'induction radiale est représentée sur la (Figure III.15).

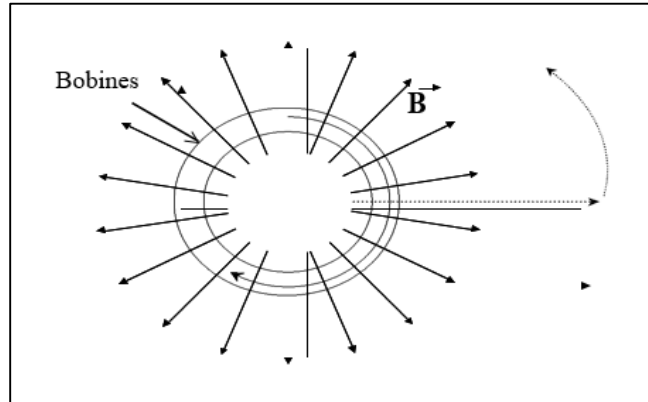


Figure III 15 Vue de face des lignes de champ produites par deux solénoïdes en opposition [48]

La (Figure III.16) présenté la valeur de l'induction radiale en fonction de l'angle  $\theta$ .

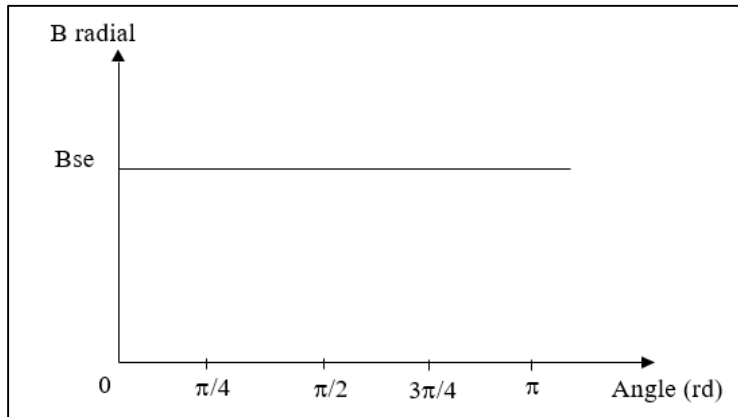


Figure III 16 Répartition angulaire de  $B_r$  pour deux solénoïdes en opposition [48]

Cette induction doit être dépendante de  $\theta$ . Pour cela, il faut annuler par endroits le champ magnétique en utilisant des écrans supraconducteurs. La (Figure III.17) présente schématiquement les lignes de champ produites par les deux solénoïdes en opposition et perturbées par quatre écrans supraconducteurs.

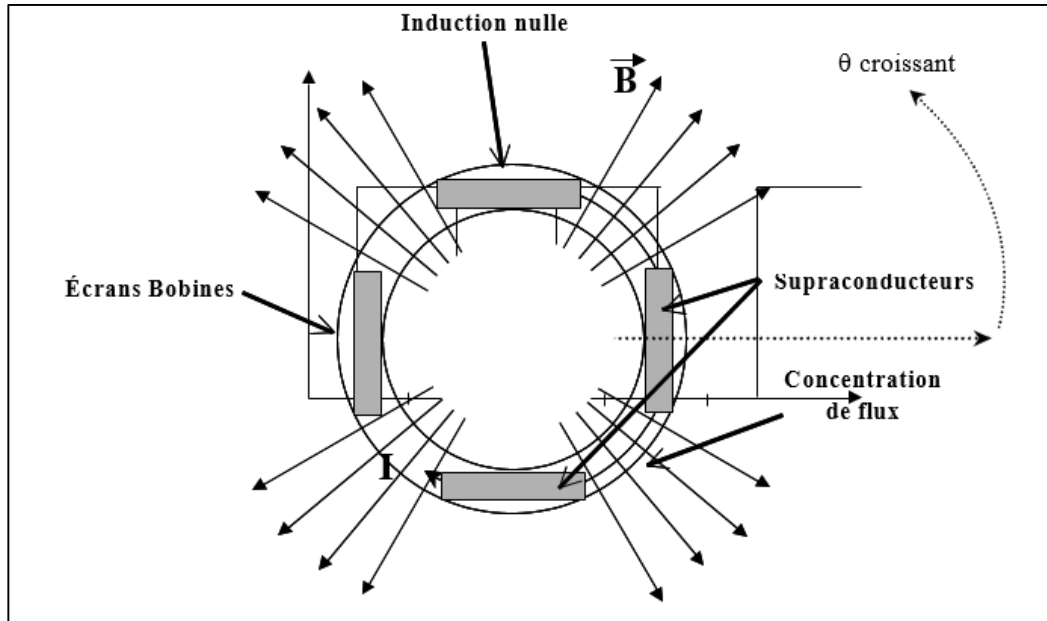
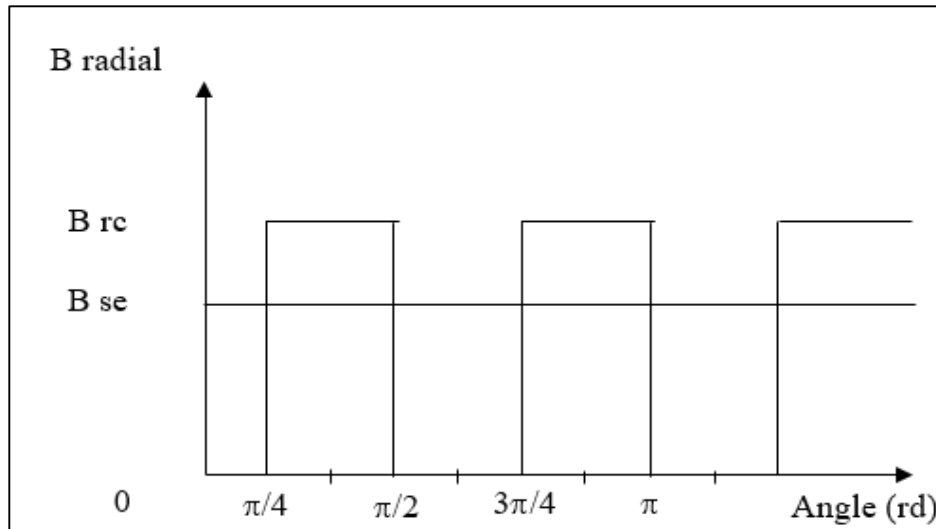


Figure III 17 Lignes de champs produites par l'inducteur (schéma) [48]

En théorie, des zones à induction nulle ont été créées, et donc diminuées la surface de passage du champ. La conservation du flux conduit à l'augmentation de la valeur de l'induction magnétique. Le flux est donc concentré par les écrans supraconducteurs. La (Figure III.18) présente la courbe idéale représentant la valeur de B radial en fonction de l'angle  $\theta$  ainsi obtenue.



**Figure III 18 Répartition angulaire de l'induction produite par l'inducteur [48]**

$B_{rc}$  représente l'induction radiale concentrée et  $B_{se}$  l'induction sans écran.

Les écrans supraconducteurs perturbent le champ magnétique essentiellement d'un point de vue radial, mais aussi suivant le direction de l'axe, ceci créant probablement des fuites, c'est pourquoi  $B_{rc} < 2 * B_{se}$  est choisi.

L'inductance est constituée de deux bobines coaxiales en NbTi alimentées par des courants opposés. Quatre plaques massives YBaCuO sont situées entre les deux bobines pour masquer la composante normale du champ magnétique [49]-[50], et façonner les lignes de flux. Les plaques YBaCuO utilisées

Pourraient être considérés comme un matériau diamagnétique parfait [50]. Grâce à cette propriété, une disposition pertinente conduit à une distribution périodique de la densité de flux qui peut être utilisée dans une machine électrique pour induire une force électromotrice alternative. La (Figure III.1) illustre ce principe d'inducteur : deux bobines créent une densité de flux radial qui est modulée par la distribution des plaques YBaCuO. La valeur maximale de la densité de flux est mesurée au milieu de l'espace entre deux plaques en YBaCuO, et la valeur minimale est mesurée derrière les plaques.

Afin d'assurer les meilleures performances de l'inducteur, un écart maximal entre les valeurs maximale et minimale de la densité de flux magnétique doit être atteint. Avec l'utilisation de quatre plaques en YBaCuO, on obtient une inductance fixe à huit pôles, qui est refroidie à 4,2K à l'aide d'hélium liquide. Une cryostatine fixe est utilisée afin de simplifier le système de refroidissement et d'éviter les joints tournants. Une armature tournante a été fabriquée, elle utilise des bobinages en cuivre et un noyau magnétique

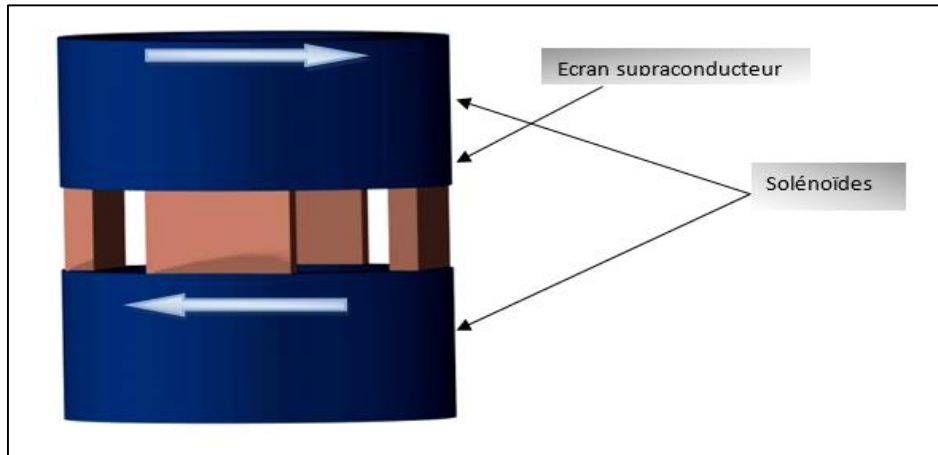


Figure III 19 Structure de l'inducteur, vue en3D

### III.3 Etude de la conception de l'inductance :

Dans cette partie on présente les études effectuées par l'équipe de recherche du laboratoire GREEN sur les dimensionnements des différents composants de l'inducteur ainsi que le choix des supraconducteurs utilisés. Depuis la fabrication de l'inducteur, les matériaux supraconducteurs ont connu de nombreux développements. En particulier, les dimensions des domaines monomères YBaCuO ont été significativement augmentées.

#### III.3.1 Etude du format des écrans YBaCuO :

##### III.3.1.1 Choix des écrans supraconducteurs :

L'équipe de recherche du laboratoire GREEN a utilisé quatre blocs mono-domaines d'YBaCuO fournis par

entreprise CAN SUPERCONDUCTOR(Tchécoslovaquie).

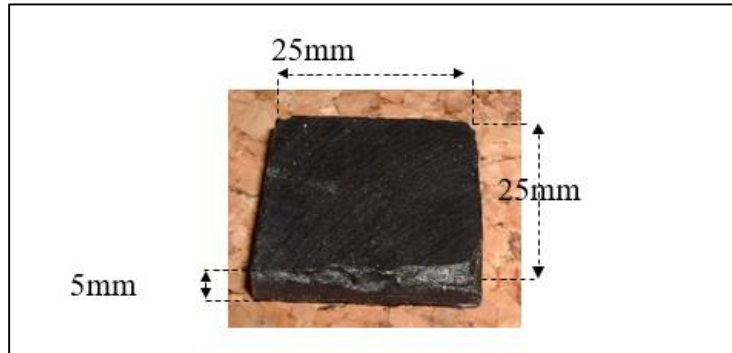


Figure III 20 mono domaine d'YBaCuO [48]

A partir de la taille des écrans, le diamètre de l'inducteur ainsi que la distance entre les bobines sont définis. Les écrans sont placés sur un octogone régulier inscrit dans la section de l'inducteur comme indiqué sur la figure VI.21.

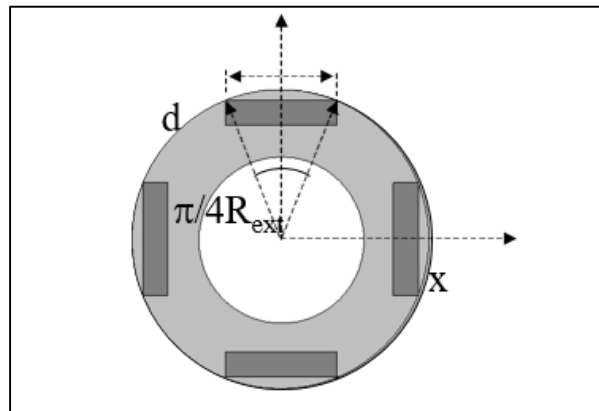


Figure III 21 Définition des grandeurs pour le calcul du rayon extérieur. [48]

Le rayon extérieur de l'inducteur s'écrit alors:

$$R_{ext} = \frac{d}{2 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right)} = 3.3 \text{ cm}$$

A partir de ces deux dimensions :  $d=2.5\text{cm}$  et  $R_{ext}=3.3\text{cm}$  la forme des bobines d'inducteur est déterminé.

Le fait de fixer la valeur de  $R_{ext}$  va fixer la valeur du flux magnétique maximum, et donc le niveau de champ.

### III.3.2 Etude des bobines de champ :

L'objectif de ce paragraphe est de trouver les dimensions des deux solénoïdes en opposition. Cette partie du système permet de générer un champ radial indépendant de la position angulaire.

La figure III.22 représente une coupe du système. Ce schéma présente les différentes variables qu'il va falloir ajuster

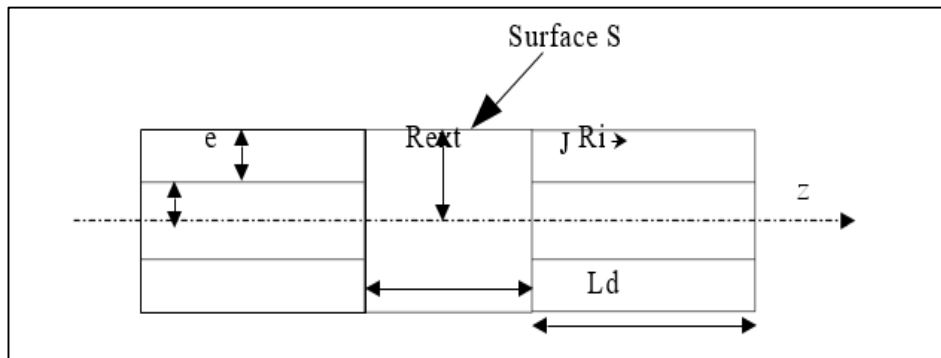


Figure III 22 Variables pour le dimensionnement. [48]

Les variables du dimensionnement sont donc les suivantes :

<i>Nom</i>	<i>Unité</i>	<i>Description</i>
R	M	Rayon extérieur
$R_i$	M	Rayon intérieur
e	M	Épaisseur des conducteurs
L	M	Longueur des bobines
d	M	Distance entre les bobines
j	A/m <sup>2</sup>	Densité de courant

Table III. 1 Les variables utilisées pour le dimensionnement [48]

D'abord ils ont fixé  $R = R_{ext} = R_i + e$ , afin que les écrans soient positionnés comme sur la (Figure III.22).

$$L = 0.045 \text{ m et } e = 0.01 \text{ m.}$$



Alors la forme suivante:

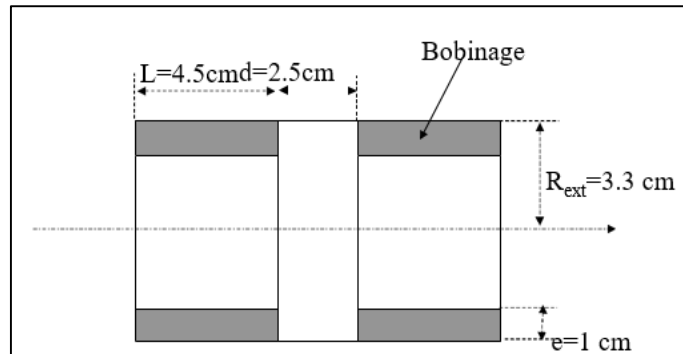


Figure III 23 Forme retenue pour l'inducteur [48]

### III.3.3 Choix du matériau pour le support :

Le support doit être un matériau amagnétique. La fibre de verre-epoxy (G11) semble être un matériau résistant et facile à usiner et mettre en forme.

Le G11 est à même de tenir les contraintes exercées par les deux bobines sans le moindre problème avec une bonne marge de sécurité.

Le support pour le prototype de l'inducteur usiné par l'équipe du laboratoire de GREEN selon le plan suivant.

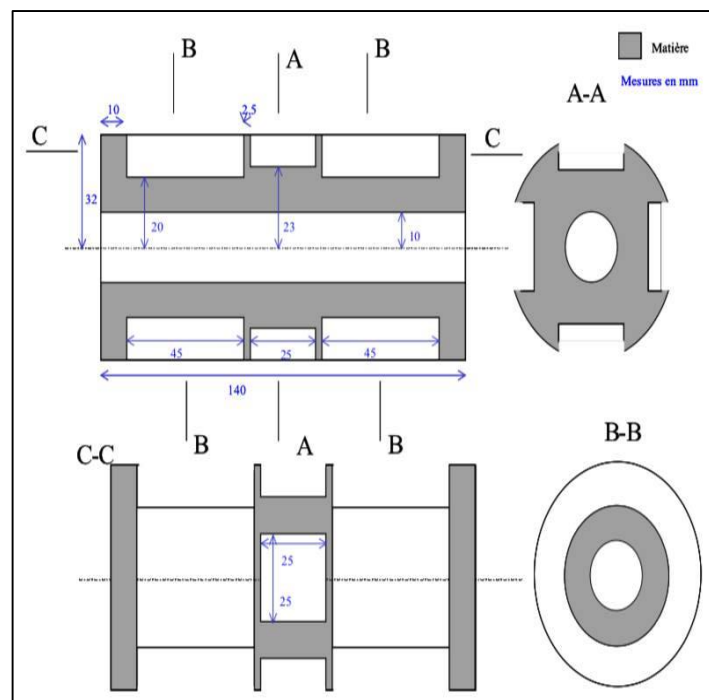


Figure III 24 Plan de support du prototype d'inducteur [48]

### III.3.4 Bobinage des solénoïdes :

Le bobinage des solénoïdes a été réalisé dans les ateliers du Centre de Recherche sur les très Basses Température (C.N.R.S., Grenoble).

Le support devant accueillir le bobinage mesure 4.5cm de long pour 1cm de haut. Le fil utilisé possède un diamètre de 0.74 mm, ce qui fixe le nombre de spires. Ils ont placé 13 couches de 60 spires, soit, un total de 780 spires.

Les deux bobines sont placées en série et bobinées en sens inverse. L'entrée et la sortie ont été doublées. [48]

### III.3.5 Forme et position des écrans

Dans cette partie, on présente l'étude élaboré par l'équipe de recherche du laboratoire GREEN sur écrans supraconducteurs d'un point de vue positionnement des écrans et à la forme des écrans.

Quelques suggestions pour le placement et la forme des écrans :

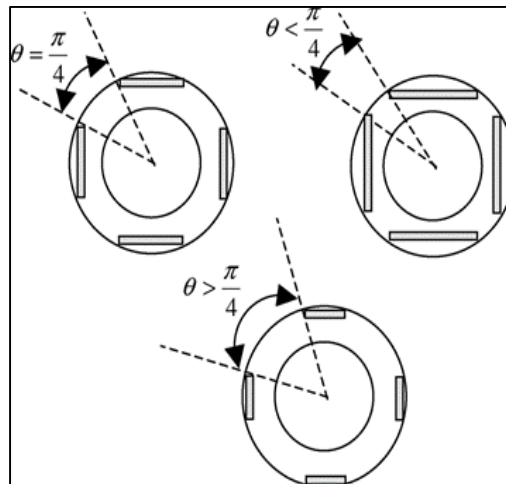


Figure III 25 Inducteur avec différentes valeurs d'angle entre les plaques [51]

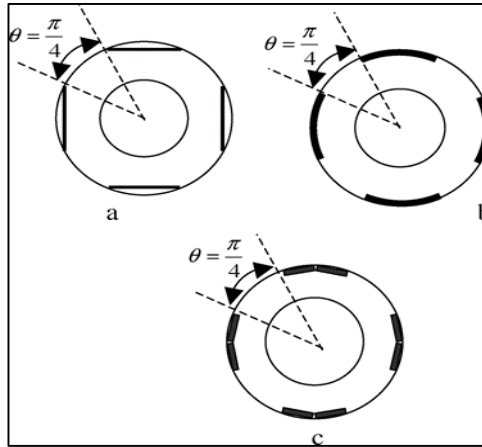


Figure III 26 Différentes formes d'écrans. (a) 1 bloc rectangulaire par poteau. (b) 1 vrac courbé par pôle. (c) Deux masses rectangulaires par poteau [51]

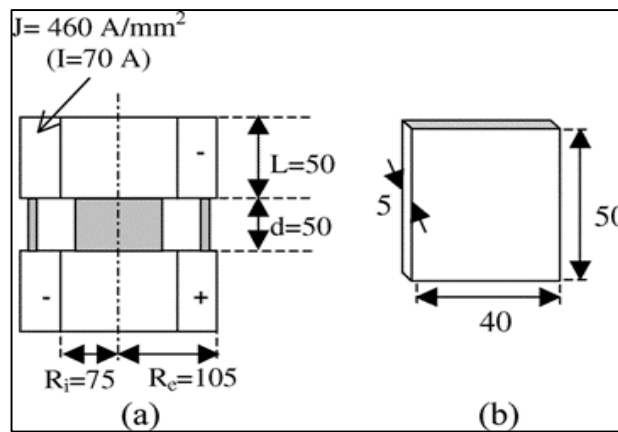
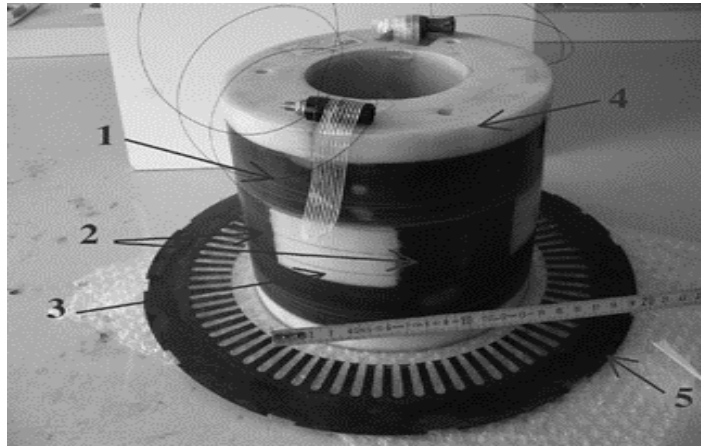


Figure III 27 III.27 Dimensions en millimètres de (a) l'inducteur optimisé et (b) Plaques YBaCuO. [51]



**Figure III 28 Inducteur assemblé[51]**

(1) solénoïde supraconducteur ; (2) Plaques superconductrices YBaCuO : région de densité de flux minimale ; (3) région interbulk : densité de flux maximale ; (4) support d'inducteur non magnétique ; (5) laminage de l'armature [51]

Les solénoïdes, bobinés en sens inverses, permettent de créer un flux magnétique axial important, qui se trouve concentré entre les plaques supraconductrices et génère une induction magnétique à forte composante radiale dans l'entrefer, supérieure à la valeur sans écrans magnétiques. Le choix des matériaux a été effectué selon les facilités du laboratoire à les obtenir. Le moteur a été totalement étudié au GREEN, du dimensionnement, à la conception pour aboutir aux essais [52] Ainsi, le choix s'est porté sur des bobinages en NbTi et des écrans en YBCO (Figure III.28), l'ensemble fonctionnant à l'hélium liquide, ce qui permet d'utiliser aux mieux les propriétés de ces supraconducteurs. Ce moteur à concentration de flux magnétique a été réalisé sous forme de machine inversée, de manière à avoir une partie cryogénique fixe. Les essais moteurs (Figure III.28) ont permis de valider ce principe, et de faire apparaître un couple massique des plus élevés en machine supraconductrice.

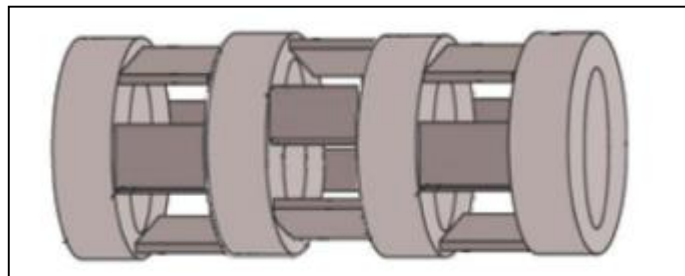


**Figure III 29 Moteur supraconducteur à concentration de flux, 20kW-750tr/min [47]**

#### **III.4 Inducteur multi-empilement (Multistack) :**

Plusieurs façons sont possibles pour augmenter la densité de puissance du moteur supraconducteur.

- 1 .La première solution évidente suggère un nouveau fil supraconducteur avec une possibilité de densité de courant plus élevée.
2. La seconde consiste en une plus grande dimension de rayon d'inducteur, mais une limite apparaît avec la longueur du fil supraconducteur.
3. Enfin, la troisième alternative est d'explorer une grande longueur d'inductance. Cette solution correspond à plusieurs inducteurs sur un même arbre. Le modèle suggéré comprend deux inducteurs supraconducteurs précédents reliés par des boucliers HTS. Pour chaque pile, le système en écrans nécessitait une rotation de 90 degrés (FigureIII.30). Ainsi, le multistack supraconducteur a une bonne densité de flux spatial .



**Figure III 30 Principe de l'inductance multistack. [53]**

### **III.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes ainsi que les études successives élaborés par les équipes de recherches du laboratoire GREEN de Nancy France pour la réalisation d'un inducteur modèle supraconducteur à concentration de flux dans un premier temps, ce qui a permis de réaliser en deuxième phase un moteur à concentration de flux magnétique sous forme de machine inversée, de manière à avoir une partie cryogénique fixe. Les essais moteurs ont permis de valider ce principe.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

L'apparition des supraconducteurs à hautes températures (SHTc) a permis un développement continu des moteurs supraconducteurs. Ces dispositifs supraconducteurs permettent d'obtenir des puissances et des couples massiques et volumiques très élevés, et sont des alternatives intéressantes aux machines conventionnelles. Dans le domaine de la motorisation électrique, les supraconducteurs sont utilisés pour augmenter le champ magnétique dans l'entrefer et ainsi accroître la compacité des machines électriques.

Ce travail est une contribution à l'étude des machines électrique intégrant des matériaux supraconducteurs à haute température critique et à structure originale (innovante). On s'est intéressé à une structure de moteur supraconducteur à concentration de flux magnétique. Pour cela nous avons analysé indépendamment l'inducteur modèle réalisé par le laboratoire GREEN. Afin d'explorer les différentes possibilités d'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les machines électriques. Le laboratoire GREEN consacre un effort conséquent à la recherche de nouvelles structures de machines électriques.

La réalisation d'une étude bibliographique sur les machines réalisées après les années 1990 a permis de dégager des tendances dans les structures adaptées et leurs domaines d'application. De plus, les prédictions offertes par les matériaux supraconducteurs permettent d'imaginer une nouvelle topologie de machine.

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).

Un inducteur original basé sur un principe de concentration de flux a été étudié

Une machine supraconductrice a été conçue avec succès, construit et testé à GREEN. Des fils supraconducteur basse température NbTi ont été utilisés pour générer un champ magnétique élevé concentré utilisant le supraconducteur haute température YBaCuO (HTS)

En perspectives, Aussi d'autres formes d'inducteurs supraconducteurs peuvent être proposées dans le but d'améliorer les performances de la machine.



## Reference Bibliographie

## Reference Bibliographie

[1] Il s'agit du  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ , une céramique. William D. Callister, Science et génie des matériaux, Modulo Éditeur, 2001, p.620

[2] Davide Castelvecchi, « First room-temperature superconductor excites — and baffles — scientists », Nature, vol. 586, 15 octobre 2020, p. 349 (DOI 10.1038/d41586-020-02895-0)

[3] Elliot Snider, Nathan Dasenbrock-Gammon, Raymond McBride, Mathew Debessai, Hiranya Vindana et al., « Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride », Nature, vol. 586, 15 octobre 2020, p. 373-377 (DOI 10.1038/s41586-020-2801-z)

[4] ABDERREZAK Amira «Etude des propriétés structurales, électriques et magnétiques de céramiques supraconductrices  $\text{YBaCuO}$  et  $\text{BiSrCaCuO}$ », thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine, 28/09/2005.

[5] Siham BADI, «Interfaces optoélectroniques ultra-rapides pour l'électronique supraconductrice à quantum de flux magnétique», thèse de doctorat, Université de Savoie, 16 Octobre 2008.

[6] BAKOUR, S. E. (2013). Etude de l'évolution des frontières libres de conduction dans les matériaux Supraconducteurs de type II (Master dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila). [00] BOUROUBI, M., & HERABI, A. (2020). Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par SFCL en présence du défaut de court-circuit (Master dissertation, Univ M'sila).

[7] Didier Buzon, « Limitation de courant à partir de matériaux supraconducteurs HTC », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 30 Sep 2002.

[8] Benlembarek Freiha, «Etude Numérique d'un Limiteur de courant de défaut», Mémoire de master en Réseau électrique, Université de M'sila, 2015

[9] Jérôme DELAMARE, Fabien FAURE « Les paliers magnétiques », Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, B.P. 46, 38402 Saint Martin d'Hères CEDEX

[10] Amir Faiçal, Salmi., & Mohamed, Deghiche. (2019). Etude de l'influence des courants de courtcircuit sur la stabilité des réseaux électriques (Master dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).

[11] Samir BENSAID « Contribution a la caractérisation et a la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes», thèse de doctorat, Université de Nantes, Année 2006.

## Reference Bibliographie

- [12] Mohamed YAHIA, « Modélisation Electromagnétique des Structures Complexes par Couplage des Méthodes », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 9 novembre 2010.
- [14] Belkhiri, S. Modeling a superconducting fault current limiter inserted in a nine-bus electrical network.
- [15] Yves Brunet, Pascal Tixador, « Supraconducteurs - Environnement et applications », N°d3662, Techniques de l'Ingénieur, 01/12/ 2012.
- [16] Yannick Cointe, « Limiteur supraconducteur de courant continu », Thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- [17] DAHMANI, H. (2018). Modélisation des matériaux supraconducteurs application a la limitation de courant de défaut dans un réseau électrique à neuf (09) jeux de barres (Master dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [18] Cheung K.Y.C., Cheung S.T.H., Navin De Silvia R.G., Juvonen M.P.T., Singh R. et Woo J.J., Large-Scale Energy Storage Systems, Imperial College London, ISE2, 2002/2003.
- [19] Yuan, Weijia; Zhang, Min (2015-07-16), "Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems", Handbook of Clean Energy Systems, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–16, doi:10.1002/9781118991978.hces210, ISBN 978-1-118-99197-8, retrieved 2021-01-26
- [20] Tixador, P. (2012), "Superconducting magnetic energy storage (SMES) systems", High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications, Elsevier, pp. 294–319, doi:10.1533/9780857095299.2.294, ISBN 978-0-85709-012-6, retrieved 2021-01-23
- [21] CYROT Michel La supraconductivité et ses applications Avril 2014 Article : 008
- [22] Groupe de travail A3.23, Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems, vol. 497, CIGRÉ, coll. « brochure » juin 2012
- [23] Nasser Tleis, Power Systems Modelling and Fault Analysis : Theory and Practice, Oxford, Newnes, 2008 (ISBN 978-0-7506-8074-5, lire en ligne [archive]), p. 520-549
- [24][https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/train\\_a\\_levitation\\_magnetique.pdf](https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/train_a_levitation_magnetique.pdf)

## Reference Bibliographie

- [25] G. Malé, « Étude d'une structure d'inducteur supraconducteur à modulation de champ magnétique », PhD Thesis, Université de Lorraine, 2012
- [26] M. J. Superczynski et D. J. Waltman, « Homopolar motor with high temperature superconductor field windings », IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 7, no 2, p. 513–518, 1997
- [27] REZZOUG Abderrezak, EL-HADI Zaim Mohammed, « Machines électriques non conventionnelles » Edition EGEM Lavoisier 2011
- [28] R. J. Thome, W. Creedon, M. Reed, E. Bowles, et K. Schaubel, « Homopolar motor technology development », in 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, vol. 1, p. 260-264 vol.1.
- [29] J. Smith, J. Kirtley, et P. Thullen, « Superconducting rotating machines », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 11, no 2, p. 128–134, 1975.
- [30] J. F. Gieras, « Superconducting electrical machines-State of the art », Organ, vol. 12, p. 09, 2009.
- [31] B. Gamble, G. Snitchler, et S. S. Kalsi, « HTS generator topologies », in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 5-pp.
- [32] B. Gamble, G. Snitchler, et T. MacDonald, « Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor », IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, no 3, p. 1083-1088, juin 2011
- [33] G. Snitchler, B. Gamble, et S. S. Kalsi, « The Performance of a 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor », IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, p. 2206-2209, juin. 2005.
- [34] Y. S. Jo, T. Nakamura, T. Hoshino, Y. D. Chung, J. P. Hong, and Y. K. Kwon, “Characteristic study and 3D magnetic field analysis of the superconducting synchronous machine,” Physica C, Vol 416, pp. 108–114, 2004.
- [35] H. W. Neumüller et al., « Advances in and prospects for development of hightemperature superconductor rotating machines at Siemens », Superconductor Science and Technology, vol. 19, p. S114-S117, mars. 2006

## Reference Bibliographie

- [36] S.K. Baik, M. H. Sohn, D. Y. Park, J. B. Ahn, Y. K. Kwon , and K. S. Ryu, “A 30Kva Superconducting Generator Developpement and Basic Tests,” IEEE Trans. Appl .Supercond., vol. 10, no. 1, pp.947–950, March 2000
- [37] W. Nick, M. Frank, P. Kummeth, J. J. Rabbers, M. Wilke, et K. Schleicher, « Development and construction of an HTS rotor for ship propulsion application », in Journal of Physics: Conference Series, 2010, vol. 234, p. 032040
- [38] M. Miki et al., « Applied HTS Bulks and Wires to Rotating Machines for Marine Propulsion », in AIP Conference Proceedings, 2010, vol. 1218, p. 254–260.
- [39] W. Xian, Y. Yan, W. Yuan, R. Pei, et T. A. Coombs, « Pulsed field magnetization of a high temperature superconducting motor », IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, n° 3, p. 1171–1174, 2011.
- [40] D. Sekiguchi et al., « Trial test of fully HTS induction/synchronous machine for next generation electric vehicle », IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, n° 3, p. 5200904–5200904, 2012
- [41] L. K. Kovalev et al., « HTS electrical machines with YBCO bulk and Ag–BSCCO plate-shape HTS elements: recent results and future development », Physica C: Superconductivity, vol. 354, n° 1-4, p. 34–39, 2001.
- [42] D. Netter, J. Lévêque, B. Douine, P. J. Masson, et A. Rezzoug, « Design and testing of a superconducting rotating machine », IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 17, n° 1, p. 27–33, 2007
- [43] R. Alhasan, T. Lubin, B. Douine, Z. M. Adilov, et J. Lévêque, « Test of an original superconducting synchronous machine based on magnetic shielding », IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 26, n° 4, p. 1–5, 2016.
- [44] S. S. Kalsi, “Development status of superconducting rotating machines,” presented at the IEEE PES Meeting New York, Jan. 27–31, 2002
- [45] P. Kummeth, M. Frank, W. Nick a, G. Nerowski, and H.-W. Neumueller, “Development of synchronous machines with HTS rotor,” Physica C, vol. 426–431, pp. 1358–1364, 2005
- [46] J. R. Hull and M. Murakami, “Applications of bulk high- temperature superconductors,” Proc. IEEE, vol. 92, no. 10, pp. 1705–1718, Oct. 2004

## Reference Bibliographie

[47] el hadj. Ailam, « Machine synchrone à plots supraconducteurs : Etude et réalisation, » Thèse de Doctorat, Université henri poincare Nancy I, 2006.

[48] Philippe MASSON “Étude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs. Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale” Soutenue publiquement le 17 décembre 2002

[49] ] P. Masson, D. Netter, J. Leveque, and A. Rezzoug, “Magnetic field concentration: Comparison between several shapes of superconducting shields,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no. 1, pp. 2248–2251, Mar. 2001

[50] P. Masson, J. Leveque, D. Netter, and A. Rezzoug, “Experimental study of a new kind of superconducting inductor,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 2239–2242, Jun. 2003

[51] El Hadj Ailam, Denis Netter, Jean Lévêque, Bruno Douine, Philippe J. Masson, Member, IEEE, and Abderrezak Rezzoug, Member, IEEE “Design and Testing of a Superconducting Rotating Machine ”TRANSACTIONS IEEE SUR LA SUPRACONDUCTIVITÉ APPLIQUÉE, VOL. 17, NON. 1, MARS 2007

[52] el hadj ailam, denis netter, jean lévêque, bruno douine, philippe j. Masson, and abderrezak rezzoug, : “design and testing of a superconducting rotating machine”, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 17, no. 1, march 2007.

[53] Renaud Moulin, Jean Lévêque, Lionel Durantay, Bruno Douine, Denis Netter, and Abderrezak Rezzoug, Member, IEEE “Superconducting Multistack Inductor for Synchronous Motors Using the Diamagnetism Property of Bulk Material” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 1, JANUARY 2010