

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



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Machine Electrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Etude et modélisation d'un moteur  
supraconducteur à pan coupé*

Présenté par :  
GUERRI Hatem  
Soutenu le :04 Juin 2015

Devant le jury composé de :

- Mr. ROUINA Abdelhafid
- Dr. BOUMARAF Rabia
- Mr. REZIG Mohamed

M.C.A  
M.C.A  
M.C.A

Président  
Encadreur  
Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

# Remerciements

*A tous ceux qui m'ont aidé à l'élaboration de ce modeste travail de près et de loin, je présente mes remerciements et ma gratitude.*

*Je tiens à exprimer mes sincères et profonds remerciements à mon encadreur : Mme BOUMARAF Rabia m'avoir encadré, orienté, aidé et encouragé tout au long de ma recherche.*

*Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants qui par leurs recommandations, leurs conseils, leurs paroles m'ont guidé vers le chemin du savoir*

*Je remercie surtout ma famille et mes amies qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont aidé et encouragé.*

*A tous ceux qui m'ont poussé de continuer mon chemin.*

*Merci.*

# *Dédicace*

*Je dédie cet humble travail*

*A celui qui m'a soutenu durant ce chemin d'étude et pour ce*

*qu'il a fait pour moi, j'espère qu'il est satisfait de moi*

*A mon très cher père : GUERRI Sid, longue vie et bonheur.*

*A celle qui m'a donné la foi, l'amour et le courage, ses prières*

*m'ont accompagné tout le long de mes études*

*A ma très chère mère SAIHI Ounnassa, toutes mes joies, et ma*

*gratitude.*

*A mes sœurs : Selsabil, Ikram, Hind*

*Qui ont toujours été là pour moi, que de bonheur et de succès*

*dans votre vies*

*A mes meilleurs amies : Hassen, Hacen, Nadjib, Farid, en*

*souvenir des plus beaux instants qu'on a passé ensemble.*

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Etude et modélisation d'un moteur  
supraconducteur à pan coupé*

Présenté par :

GUERRI Hatem

Avis favorable de l'encadreur :

BOUMARAF Rabia

signature

**Avis favorable du Président du Jury**

*ROUINA Abdelhafid*

*Signature*

**Cachet et signature**

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



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière :Electrotechnique  
Option :Machine

*Thème :*  
*Etude et modélisation d'un moteur  
supraconducteur à pan coupé*

Proposé par : GUERRI Hatem  
Dirigé par : BOUMARAF Rabia

**RESUMES (Français et Arabe)**

**Résumé**--Les supraconducteurs constituent des matériaux d'avenir pour l'électrotechnique. Les machines intégrant des éléments supraconducteurs offrent une voie prospective originale et innovante pour des moteurs performants en termes de masse et de rendement.

Le présent travail est une étude des différentes topologies de moteurs électriques supraconducteurs, particulièrement composés de matériaux supraconducteurs à haute température critique. Ce mémoire présente essentiellement une structure de moteur à pan coupé. Cette structure est définie par une géométrie originale et innovante se démarquant des topologies actuelles de machines électriques utilisant les capacités d'écrantage magnétique des supraconducteurs massifs. L'enrichissement d'une telle étude est complété par un travail numérique, qui apporte une assez bonne corrélation sur les performances de ce moteur, par l'observation de la carte de champ magnétique de l'inducteur seul.

## ملخص :

الموصلات الفائقة هي مواد مستقبلية بالنسبة للهندسة الكهربائية. الآلات تضم عناصر فائقة التوصيل و هي طريقة جديدة و مبتكرة و فعالة من حيث الوزن و الأداء.

العمل الحالي هو دراسة طبولوجية لمختلف المحركات الكهربائية فائقة التوصيل, ولا سيما المركبات من المواد فائقة التوصيل ذات درجة الحرارة الحرجة المرتفعة. تقدم هذه الأطروحة في الأساس مقطع من هيكل المحرك. و يعمل هذا التصميم للآلات الكهربائية باستخدام قدرات التدرج المغناطيسية فائقة التوصيل. لإثراء هذه الدراسة نكملها بعمل رقمي الذي يجمع نظرة جيدة إلى حد ما على أداء هذا المحرك, من خلال مراقبة خريطة المجال المغناطيسي للجزء الدوار فقط.

## Le mémoire contient par ordre d'apparition:

- Dédicaces
- Remerciements
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures
- Liste des abréviations
- Résumés (bilingue)

### Sommaire :

- \* Introduction générale
- \* Chapitre 1, 2, 3...  
(Chaque chapitre commence par une Introduction et se termine par une conclusion)
- \* Conclusion générale et perspectives
- \* Bibliographie
- \* Annexe

### Type d'écriture:

- Times new Roman 12
- Les titres en Gras
- Interligne 1.5
- Formules et Figures sont numérotées par chapitre :  
exp. Fig. n°Chap. n°figure (Fig. I.1) ou (Equ. I.1)

---

### **Remarques :**

- Eviter le glaçage de la page de garde.
- Respecter le contenu par ordre d'apparition.
- Ecrire les résumés bilingues dans une seule page...

- عدم تجليد الصفحة الأولى
- احترام المحتوى المذكور أعلاه
- كتابة ملخص للمذكرة باللغتين  
(العربية والفرنسية) و في صفحة  
واحدة... الخ

## *Liste de tableaux*

Tableau II.1 : quelques exemples des SMES

Tableau II.2 comparaison des différents types de SCFCL

Tableau II.3: Quelques Prototypes de transformateurs supraconducteurs basse température au début des années 1980

Tableau II.4: Quelques projets existants de transformateurs supraconducteurs à haute température critique

Tableau IV.1. Paramètres géométriques



## *Liste des figures*

Figure I.1. Heinke Kamerlingh Onnes - première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911).

Figure I.2. Evolution des supraconducteurs au cours du temps

Figure. I.3. Surface critique des différents matériaux supraconducteurs

Figure. I.4. Dépendance de la résistivité en fonction de la température pour l'état normal (I) et l'état supraconducteur (II).

Figure I.5 différents champs magnétiques

Figure. I.6. Dépendance du champ magnétique en fonction de la température

Figure I.7 : caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type I

Figure I.8 : caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type II

Figure 1.9. Fil NbTi

Figure 1.10. Fils supraconducteurs HTS

Figure 1.11. Pastilles d'YBCO – CAN Superconductor

Figure 1.12. Fil en MgB<sub>2</sub>

Figure II.1 : Stockage d'électricité : inductif (a) et capacitive (b)

Figure II.2 : Configurations toroïdale (a) et solénoïdale (b) avec les efforts induits

Figure II.3 : Configuration toroïdale en hélice avec des efforts compensés

Figure II.4 (a) Section souterraine du LHC, (b) schéma du réacteur ITER

Figure II.5 Schéma d'un réseau électrique en régime assigné, et en régime de défaut

Figure II.6 Démonstrateur CURL 10 – Nexans

Figure II.7: Comparaison des pertes (à gauche) et du rendement (à droite) entre un transformateur conventionnel d'une puissance de 63 MVA et son équivalent supraconducteur

Figure II.8: Répartitions annuelle des pertes de deux transformateurs de 63 MVA

Figure II.9: Représentation schématique d'un système de RMN destiné à la chirurgie

Figure II.10 : Un corps supraconducteur porté à une température inférieure à  $T_c$  placé au-dessus d'un aimant

Figure II.11: Représentation schématique du train à grande vitesse à sustentation électromagnétique utilisant des supraconducteurs

Figure III.1 Premier moteur supraconducteur – alternateur 12000 tr/min

Figure III.2. Plateforme d'essai AMSC – machine supraconductrice de 36.5 MW

Figure III.4. Moteur synchrone à flux axial de 22kW par

Figure III.5. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5kW par IHI

Figure III.6. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs, IHI [40] (gauche) et DEE University of Lisbonne

Figure III.7. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs

Figure III.8 : Moteurs à hystérésis, rotor fer (CHM) ou supraconducteur (SHM)

Figure III.9. Rotors supraconducteurs « Zèbre » (a) et (b), « Pilz » (c) et « Zelz » (d), moteur à réluctance

Figure III.10 : Moteur à réluctance 150kW 3000tr/min

Figure III.11 : Pompe immergée pour le transport d'hydrogène liquide

Figure III.13 : Moteur synchrone à flux piégé, maquette d'illustration et prototype réalisé

Figure III.14 : Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, principe

Figure III.15 : Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, 15kW 750tr/min et 150kW 400tr/min

Figure III.16 : Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents et flux axial, 400kW-250tr/min

Figure III.17. Moteur synchrone supraconducteur homopolaire, 91-125kW-11700tr/min

Figure III.18. Moteur asynchrone supraconducteur, 1.3kW-1800tr/min)

Figure III.19 : Tests RIG

Figure III.20 : Coupe du moteur synchrone supraconducteur à griffe de Central Japan Railway Compagny

Figure III.20 : Vue éclatée de l'inducteur à griffe, Sumitomo

Figure III.21 : Moteur supraconducteur griffe, 13.6kW-500tr/min, Central Japan Railway Compagny

Figure III.22 : Moteur supraconducteur griffe, 18kW-4500tr/min, Sumitomo

Figure III.23 : Voiture électrique supraconductrice

Figure III.24 : moteur à concentration de flux

Figure.III.25 Inducteur supraconducteur à concentration de flux magnétique

Figure IV.1. Champ magnétique créé par deux bobines de même axe et de flux de même direction

Figure IV.2. Structure de l'inducteur supraconducteur à pan coupé

Figure IV.3. Différentes formes de supraconducteurs massifs

Figure IV.4. Association de pastilles supraconductrices hexagonales sur 2 couches

Figure IV.5. Illustration de la loi de Lenz

Figure IV.6. Principe de blindage par supraconducteur massif.

Figure IV.7 : Principe de l'écrantage magnétique

Figure IV.8 : Lignes de champs dans un rotor de moteur synchro-réductante.

Figure IV.9: Lignes de champs dans un rotor de moteur synchro-réductante amélioré par deux écrans supraconducteurs

Figure IV.10. Structure de l'inducteur supraconducteur

Figure IV.11. Principe de la structure de l'inducteur à pan coupé.

Figure IV.12: Structure de l'inducteur

Figure IV.13. Moteur supraconducteur à pan coupé

Figure IV.14: Paramètres de l'inducteur

Figure IV.15 Points de calcul de l'induction

Figure 4.16 Lignes du champ produites par deux solénoïdes.

Figure IV.17: Composante transversale du l'induction magnétique à 2cm du rayon d'alésage de deux solénoïdes supraconducteurs avec (a) à  $Z=0\text{ cm}$ , (b) à  $Z= + 7\text{ cm}$  et (c) à  $Z= - 7\text{ cm}$

Figure IV.18 La composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec (a) à  $Z= + 7\text{cm}$ , (b) à  $Z= 0\text{ cm}$  et c) à  $Z= - 7\text{ cm}$ .

Figure IV.19 Structure avec l'écran supraconducteur

Figure IV.20 Lignes du champ produites par deux solénoïdes en présence de l'écran magnétique.

Figure IV.21 : Composante transversale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur en présence de l'cran supraconducteur avec (a) à  $Z=0\text{ cm}$ , (b) à  $Z= + 7\text{ cm}$  et (c) à  $Z= - 7\text{ cm}$

Figure IV.22 : Composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur en présence de l'cran supraconducteur avec (a) à  $Z=0\text{ cm}$ , (b) à  $Z= + 7\text{ cm}$  et (c) à  $Z= - 7\text{ cm}$

Figure IV.23 : Structure de l'inducteur avec fer.

Figure IV.24. Induction magnétique radiale dans l'entrefer

Figure IV.25: Composante transversale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec fer avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm  $Z=+7$

Figure IV.26 : Composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec fer avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm  $Z=+7$

## Sommaire

### Chapitre I GENERALITES SUR LES SUPRACONDUCTEURS

Introduction générale .....	1
I.1. Introduction :.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.2. Historique.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.3. Principales caractéristiques des matériaux supraconducteurs.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.3.1 Température critique .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.3.2 Champ magnétique critique .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.3.3 Densité de courant critique.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4 Classification des supraconducteurs : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4.1 Supraconducteurs de type I.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4.2 Supraconducteurs de type II.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5 Matériaux Supraconducteurs .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.1 Supraconducteurs Basse température critique LTc : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.2 Supraconducteurs à haute température critique HTc .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.5.3 Cas particulier .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.6. Conclusion .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

### Chapitre II APPLICATIONS DE LA SUPRACONDUCTIVITE EN ELECTROTECHNIQUE

II.1 INTRODCUCTION .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.2 Stockage magnétique de l'énergie (SMES).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3 Câbles supraconducteurs .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.1 Les câbles supraconducteurs conventionnels : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.2.2 Les câbles supraconducteurs HTS : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.4 Limiteurs de courant supraconducteur .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5 Les transformateurs supraconducteur.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.1 Transformateurs supraconducteurs à basse température critique ...	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.2 Transformateurs supraconducteurs à haute température critique ...	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6 Aimant supraconducteur.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

II.6.1 AIMANTS POUR L'INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.2 REALISATION D'AIMANTS POUR L'INSTRUMENTATION DE LABORATOIRE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3 RECHERCHES SUR LA FUSION NUCLEAIRE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.4 AIMANTS POUR L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.5 LEVITATION MAGNETIQUE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.Conclusion .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Chapitre III APPLICATIONS DE LA SUPRACONDUCTIVITE DANS LES MACHINES ELECTRIQUES

III.1. Introduction .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.2 Historique .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3. Machines synchrones .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.a Moteur Synchrone à pôles saillants à flux radial .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.b. Alternateurs synchrones à pôles saillants .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.c Moteur synchrone à flux axial .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.C.1.Bobines supraconductrices : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.d. Moteur synchrone à hystérésis .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.d.1 Le fonctionnement de ces machines : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.e. Moteur synchrone à réluctance .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.f. Moteur synchrone à flux piégé .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.g Moteur synchrone à aimants permanents .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3.3 Machine homopolaire .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.4 Moteur Asynchrone.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.5 Moteur à courant continu .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.6 .Machines spéciales .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.6.a. Moteur à griffe .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.7 Moteur à concentration de flux .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.4.Conclusion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Chapitre IV Réalisation est simulation de la machine synchrone

IV .1 Introduction.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
-------------------------	-------------------------------------

IV .2. Présentation de la structure de l'inducteur .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3 Effet du blindage des supraconducteurs.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.3.1 Principe.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.4 Concentration du champ magnétique.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.4.1 Amélioration des machines à réluctance variable .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.4.2 structure de l'inducteur à pan coupé.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.4.3 Analyse de la topologie proposée.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.1 Définition de FEMM.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.2. Analyse d'un problème .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.2.1.Définition du type de problème traité .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.2.2.Entrée de la géométrie.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.2.3.Maillage .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.2.4.Résolution .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.5.2.5.Exploitation des résultats .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.6 Résultats .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
IV.6.1 Cas de deux bobines supraconductrices sans écran.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
VI.6.2 Cas de deux bobines supraconductrices avec écran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
VI.6.3 Cas de deux bobines supraconductrices avec écran et avec fer ..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>defined.</b>	
VI.7 Conclusion .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Conclusion général .....	78

## ***Introduction général***

Depuis la découverte des supraconducteurs en 1911, ces matériaux se voient de plus en plus utilisés dans différentes applications. La découverte des supraconducteurs à haute température critique (HTc) en 1986) a redonné un élan formidable à la recherche et aux applications des supraconducteurs. En effet, avec des systèmes de refroidissement relativement économiques et plus simples à réaliser, l'amélioration des performances de ces matériaux a été accélérée. Ces matériaux peuvent aussi se trouver sous forme massive. Avec sa capacité de piéger une valeur très importante d'induction magnétique, un supraconducteur massif à haute température critique peut devenir un très bon aimant.

Les applications des supraconducteurs sont de plus en plus présentes dans les projets électrotechniques actuels. Ces matériaux permettant de transporter des courants très élevés et de générer des champs magnétiques importants, trouvent un intérêt avéré dans le domaine des fortes puissances.

Ces applications vont du réseau électrique (protection par des limiteurs de courants supraconducteurs, transport de courant par câbles supraconducteurs) aux convertisseurs électromécaniques (machines tournantes, sustentation magnétique de type Maglev, lanceurs électromagnétiques...) en passant par le stockage d'énergie (SMES, volant d'inertie,...).

L'application "machines tournantes" a connu, durant cette dernière décennie, un très fort développement. L'évolution des matériaux et des systèmes de refroidissement (cryoréfrigérateur) pour les supraconducteurs à haute température critique, permettent d'envisager une réelle rupture technologique (en termes de rendement et de compacité) par rapport aux solutions classiques à base de cuivre et d'aimants permanents. Ce gain en compacité est fortement recherché pour des applications telles que la propulsion marine et la génération éolienne mais aussi pour l'aéronautique et les transports.

Dans le cadre d'une thèse au laboratoire GREEN a récemment proposé une structure d'inducteur supraconducteur originale reposant sur les supraconducteurs massifs (bulks) dit à pan coupé. Le présent travail repose sur l'étude de cet inducteur supraconducteur.



Ce mémoire comporte quatre chapitres :

- dans un premier chapitre, une étude bibliographique dans laquelle nous évoquerons le phénomène de la supraconductivité d'une manière générale, notamment les grandeurs critiques qui caractérisent l'état supraconducteur un bref rappel ainsi que leurs propriétés. Ensuite nous présenterons les fils SHT, tels que : BSCCO, YBCO et MgB2.

Dans le deuxième chapitre, on résume quelques applications des supraconducteurs en électrotechnique qui vont du réseau électrique (protection par des limiteurs de courants supraconducteurs, transport de courant par câbles supraconducteurs) aux convertisseurs électromécaniques (machines tournantes, sustentation magnétique de type Maglev, lanceurs électromagnétiques...) en passant par le stockage d'énergie (SMES, volant d'inertie,...).

Dans le troisième chapitre, nous mettons l'accent sur de la conception et le développement des moteurs et des générateurs supraconducteurs depuis le début des années 1990. Nous commencerons par une description des réalisations remarquables de moteurs SHTc. Nous détaillerons les différentes topologies de machines réalisées et testées par différentes équipes de recherche de par le monde : machines synchrones, homopolaires, machines à flux axial et les machines à topologies originales.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de simulation obtenus à partir du code de calcul développé, dédié principalement à la modélisation des systèmes ayant des matériaux SHTc. Dans un premier temps, on s'intéresse à valider les modèles mathématiques et numériques. Pour cela nous avons utilisé des données expérimentales de la topologie initiale de l'inductance trouvées dans la littérature. , dans un second temps, nous abordons les performances de la nouvelle topologie proposée de l'inducteur

- Dans le quatrième chapitre, nous présentons une étude d'une nouvelle topologie de moteur supraconducteur qui repose sur un inducteur à pan coupé. Les résultats de simulation obtenus permettent de valider le principe de blindage des matériaux supraconducteurs massif ainsi que les performances de l'inducteur proposé.

Une conclusion générales et des perspectives viennent terminer ce manuscrit.

**I.1. Introduction :**

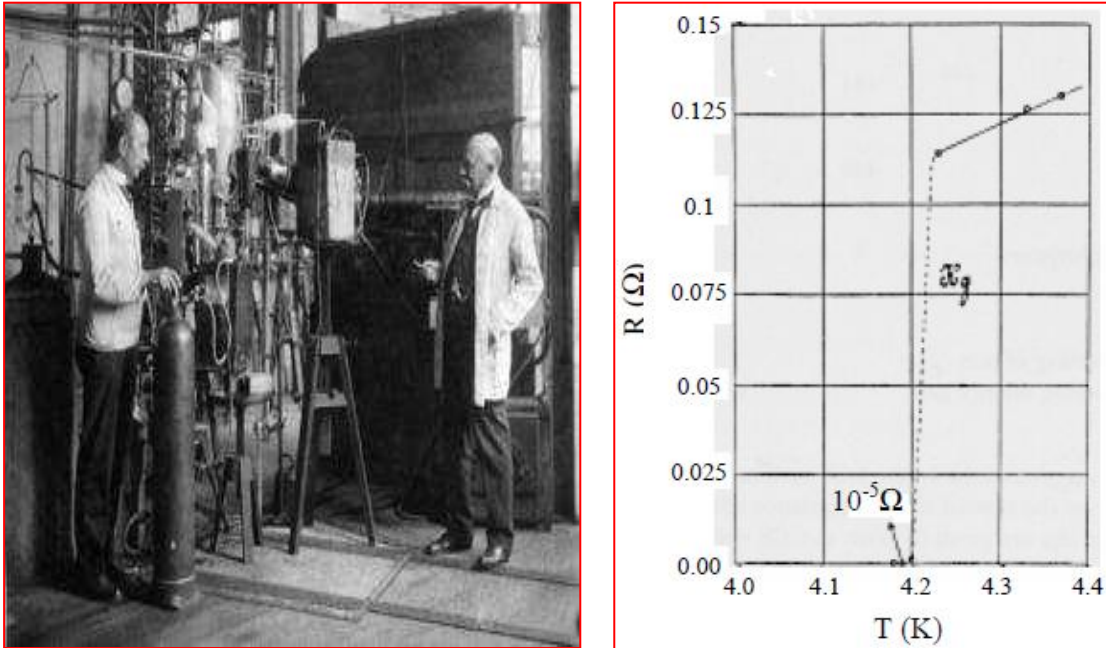
Les supraconducteurs prennent une place importante dans la recherche actuelle en électrotechnique, des promesses extraordinaires que toute une communauté tente d'exploiter.

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

L'objectif de cette partie consiste, après un rapide historique et des généralités élémentaires sur la supraconductivité, à explorer et analyser les différents types de supraconducteurs.

## I.2. Historique

En 1911, lors de recherche sur les propriétés physiques du mercure à très basse température, Gilles Holst, étudiant sous la direction du physicien Néerlandais Kamerlingh Onnes, aurait laissé l'expériences' emporter et faire apparaître une résistance non mesurable. Une erreur profitable pour la physique et en particulier le domaine de l'électrotechnique.



**Figure 1.1.** Heike Kamerlingh Onnes - première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911). [1]

Le terme non mesurable de la résistance du mercure signifiait lors de la première expérience que sa valeur chute de façon considérable en dessous d'une température, définie comme température critique  $T_c$  (**fig.1**). Kamerlingh Onnes reçu le Prix Nobel de physique en 1913 suite à cette découverte.

En 1933, une nouvelle caractéristique des supraconducteurs est mise en avant par Meissner et Ochsenfeld. Appelé effet Meissner, cela caractérise le comportement diamagnétique de ces matériaux. En effet, un supraconducteur soumis à un champ magnétique externe crée des courants induits dans le matériau qui expulse alors ce champ magnétique, cette expérience est aujourd'hui pratiquée facilement avec un supraconducteur de seconde génération dans de l'azote liquide et un aimant en lévitation. C'est en 1957, qu'une théorie nommée BCS, du nom de ses inventeurs Bardeen, Cooper et Schrieffer, qui permet d'expliquer la

supraconductivité par la formation de paires d'électrons (paire de Cooper). Pour leurs travaux, ils reçoivent le Prix Nobel de physique en 1972.

De même, des travaux essentiels menés par Ginzburg et Landau rapportent une caractérisation macroscopique des supraconducteurs grâce à l'équation de Schrödinger. Cette théorie, reprise par Abrikosov, a fait ressortir deux types de supraconducteurs, dont seulement ceux de la seconde catégorie sont utilisables. Un Prix Nobel a été délivré en 2003, à Abrikosov et Ginzburg pour leurs travaux, Landau étant décédé en 1968.

Jusqu'à 1986, la supraconductivité concernait seulement les très basses températures, et plusieurs applications refroidis à l'aide d'hélium liquide se sont vues développées, par exemple les appareils d'imagerie médicale. Cependant une nouvelle découverte, apporte un regard nouveau sur la supraconductivité : les supraconducteurs à hautes températures critiques. La découverte d'un matériau à température critique de 35K a été réalisée par Berdnoz et Müller, en étudiant une structure perovskite de cuivre à base de lanthane. Il recoive le Prix Nobel en 1987.

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

En 2001, un nouveau supraconducteur attire l'attention, le diborure de magnésium ( $MgB_2$ ). Ce supraconducteur situé à mi chemin des supraconducteurs à basses et hautes températures critiques à l'avantage de proposer un fil facilement réalisable, grâce sa structure et son processus de fabrication PIT (Powder In Tube). Il permet d'envisager des applications à des températures d'environ 20K, ou il présente des caractéristiques intéressantes (matériel médical, moteur électrique, transformateur...).[1]

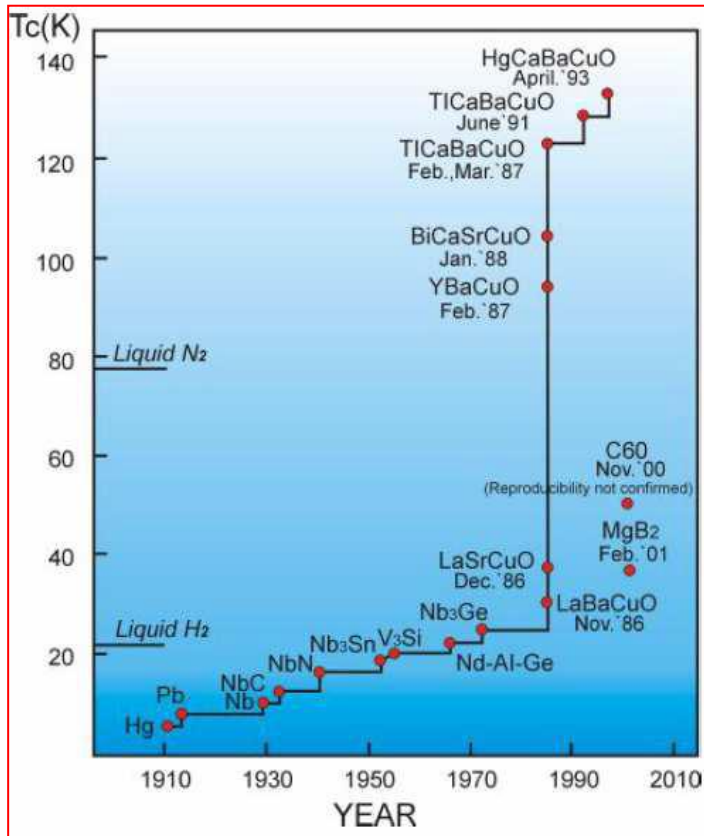


Figure I.2. Evolution des supraconducteurs au cours du temps. [1]

### I.3. Principales caractéristiques des matériaux supraconducteurs

L'état non dissipatif est délimité par trois grandeurs principales : la température critique,  $T_c$ , le champ critique  $H_c$  et la densité de courant critique.

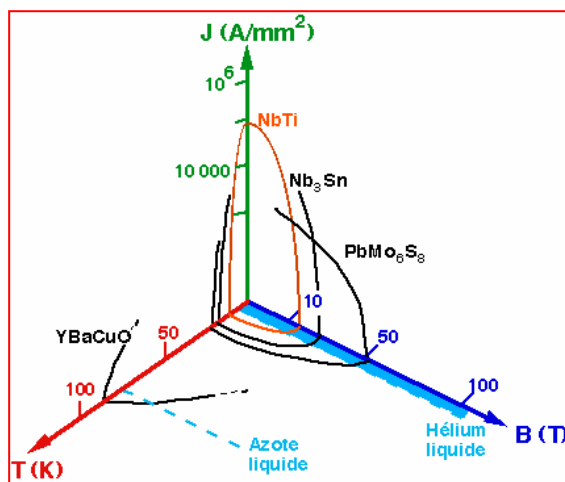
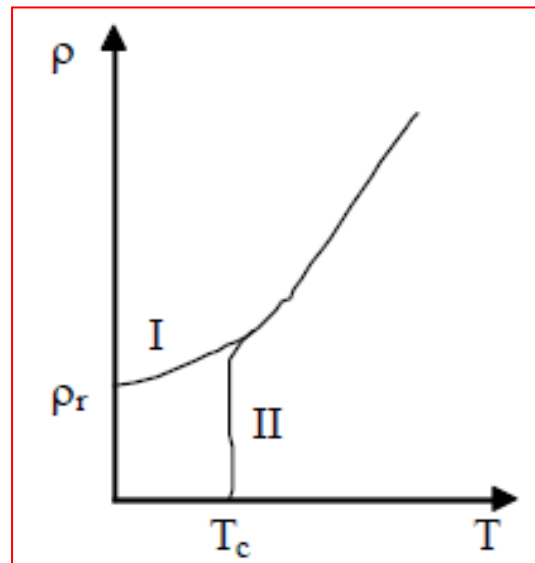


Figure. I.3. Surface critique des différents matériaux supraconducteurs. [2]

### I.3.1 Température critique

L'état de supraconductivité caractérise la plu part 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 (voir **Figure.I.4**). La partie I représente la variation de la résistivité,  $\rho(T)$  pour l'état normal, correspondante à la relation  $\rho(T) = CT^5 + \rho_r$  ou  $\rho$  est déterminé par les impuretés et les défauts du réseau cristallin. La partie II de la courbe (**Figure.I.4**) présente une chute très raide sur un intervalle de température de 0,01... 0,001 K et caractérise l'état supraconducteur. [2]



**Figure. I.4.** Dépendance de la résistivité en fonction de la température pour l'état normal (I) et l'état supraconducteur (II). [2]

### I.3.2 Champ magnétique critique

Un champ magnétique appliqué à un supraconducteur provoque un abaissement du seuil de courant qu'il peut supporter dans son état supraconducteur. En effet, plus le champ magnétique appliqué au supraconducteur est fort, plus le courant critique du supraconducteur sera faible, c'est-à-dire que le matériau perdra sa supraconductivité pour des courants d'autant plus faibles. [3]

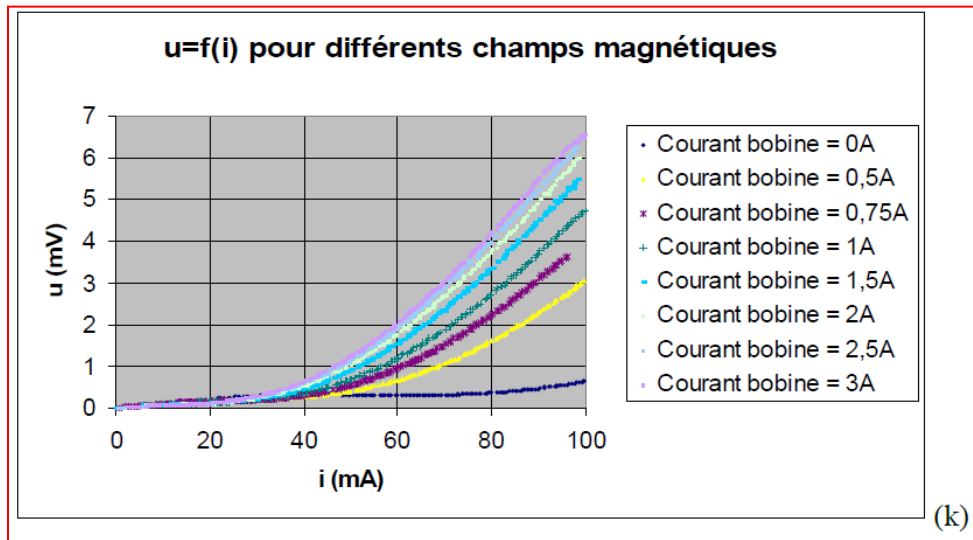


Figure I.5 différents champs magnétiques

### I.3.3 Densité de courant critique

La densité de courant critique correspond à la valeur maximale au delà de laquelle un champ électrique apparaît.

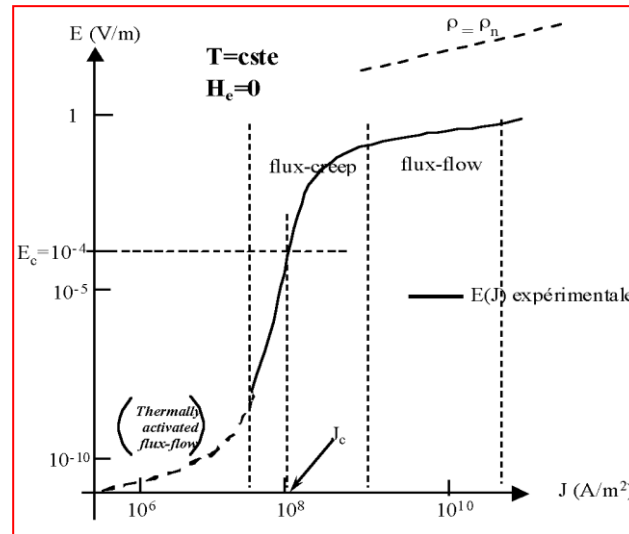
Pour les supraconducteurs de *type I*, la répartition du courant n'est pas homogène. Le courant de transport circule uniquement à la surface, dans l'épaisseur de pénétration de London.

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 ( $\sim JcB$ ) 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  $\rho_f$ . [2]

$$\rho_f = \rho_n \frac{B}{\mu_0 H_{c2}} \quad \mu_0 H_{c1} \leq B \leq \mu_0 H_{c2} \quad \text{I.1}$$

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.6.** Dépendance du champ magnétique en fonction de la température [2]

La courbe expérimentale  $E(J)$  représentée **Figure I.6** donne une image classique d'un comportement de supraconducteur HTc. Sur cette courbe, on peut distinguer trois régimes de dépendance de la valeur de  $J_c$  : le *thermally activated flux-flow* (TAFF) [4], le *flux creep* [5] et le *flux flow* [6]. Ces régimes se différencient par un comportement magnétique du supraconducteur différent qui est fonction de la force de Lorentz et donc du courant appliqué :

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. On va donc observer des déplacements de vortex par "paquets".



Un dernier régime, très controversé (en pointillé sur la **Figure.I.6**), pour de faibles courants appelé *TAFF* (*thermally activated flux-flow*) 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 *fluxcreep*).

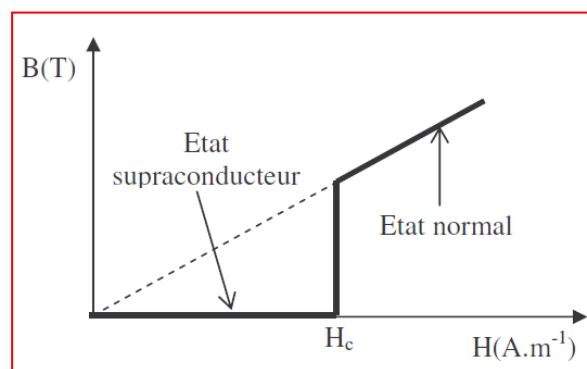
Les pertes en régime *TAFF* sont totalement négligeables devant les pertes en régime de *flux-creep*. Le régime de *flux-flow* est le plus dissipatif.

#### I.4 Classification des supraconducteurs :

Pour qu'un matériau soit supraconducteur il faut que les trois paramètres ; température  $T$ , densité de courant  $J$  et champ magnétique  $H$  soient inférieurs à ses paramètres critiques  $T_c$ ,  $J_c$  et  $H_c$ . Cependant tous les supraconducteurs n'ont pas le même comportement en présence d'un champ magnétique, on distingue les supraconducteurs de type I et les supraconducteurs de type II. [7]

##### I.4.1 Supraconducteurs de type I

Ils 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. Dans la **figure I.7**, la caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur du type I est présentée. Les supraconducteurs de type I n'ont aucune application industrielle à l'heure actuelle.



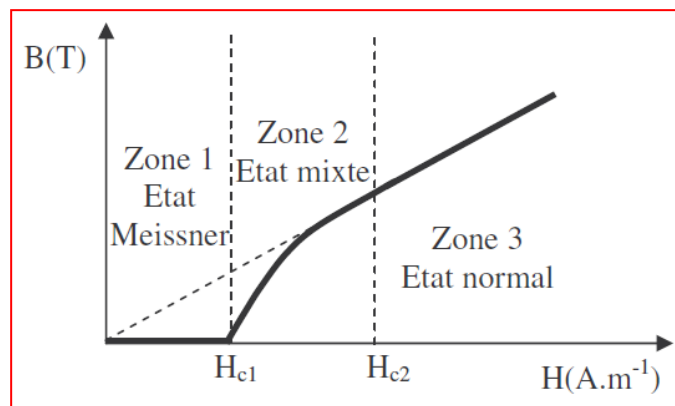
**Figure I.7** : caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type I [3]

### I.4.2 Supraconducteurs de type II

Ces supraconducteurs possèdent deux champs critiques, le deuxième nettement plus grand que le premier (il peut atteindre des dizaines de Teslas [8]). En outre, ceux-ci présentent des valeurs plus élevées de champ, de température et de courant critiques par rapport aux supraconducteurs du type I, ce qui les rend très attractifs pour l'électrotechnique.

Le comportement d'un supraconducteur du type II en présence d'un champ magnétique est décrit sur la **figure I.8**. On distingue trois zones différentes :

- Zone 1 : Etat supraconducteur, diamagnétisme parfait, pour des valeurs du champ inférieur à  $H_{c1}$  (en général petit).
- Zone 2 : Etat mixte, diamagnétisme partiel, pour des valeurs du champ entre  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$  ; bien que supraconducteur, le matériau est pénétré par le champ extérieur.
- Zone 3 : Etat normal avec une forte résistance électrique, pour des valeurs de champ supérieures à  $H_{c2}$ .



**Figure I.8** : caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type II [3].

Entre les deux champs  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$  le champ extérieur pénètre donc le matériau supraconducteur, cette pénétration du champ s'effectue sous la forme de fins tubes microscopiques dénommés vortex. Ils sont tous caractérisés par exactement le même flux magnétique. Le quantum de flux ou fluxoïde, noté  $\Phi_0$  est de  $2,07 \cdot 10^{-15}$  Wb [9]. Un vortex consiste en un coeur à l'état normal qui véhicule le champ magnétique, entouré par une région supraconductrice au sein de laquelle circule un super-courant qui confine le champ dans le coeur du vortex.

Le coeur d'un vortex, étant à l'état normal, il contient des électrons normaux qui interagissent avec le milieu. En présence d'un champ magnétique extérieur, ceux-ci sont soumis à la force de Lorentz. Les électrons en mouvement entraînent les vortex. Cette force dissipe de l'énergie dans le matériau, et par conséquent participe au réchauffement du matériau. Dans la pratique, les déplacements de tubes de flux sont empêchés en ancrant ceux-ci à des sites ad hoc de la microstructure [10]. Le courant critique est défini comme le seuil au-delà duquel la force de Lorentz dépasse la force d'ancrage et les vortex commencent à se déplacer.

Le supraconducteur de type II le plus utilisé est le NbTi [10]. Ce fil a été utilisé récemment pour réaliser les aimants du LHC au CERN, dont les densités de courant peuvent dépasser  $2000 \text{ A.mm}^{-2}$ , refroidis à  $1,9 \text{ K}$ , sous des inductions de  $9 \text{ T}$  [10].

## I.5 Matériaux Supraconducteurs

### I.5.1 Supraconducteurs Basse température critique LTc :

Il s'agit des premiers supraconducteurs utilisés pour des applications réelles. Appartenant aux supraconducteurs de second type. Leur température critique est inférieure à  $20\text{K}$  et on les utilise essentiellement avec de l'hélium liquide.

Des matériaux tels que le NbTi ou le Nb<sub>3</sub>Sn sont majoritairement utilisés, ils présentent une grande facilité de mise en forme pour des bobines à fort champ magnétique. On les retrouve par exemple dans les appareils d'imagerie médicale, en quantité phénoménale pour une structure comme le LHC.

La longueur maximale de ces fils atteint plusieurs kilomètres. Reposant sur des alliages métalliques ils sont assez robustes pour être manipulés et présentent un rayon de courbure intéressant. [1]

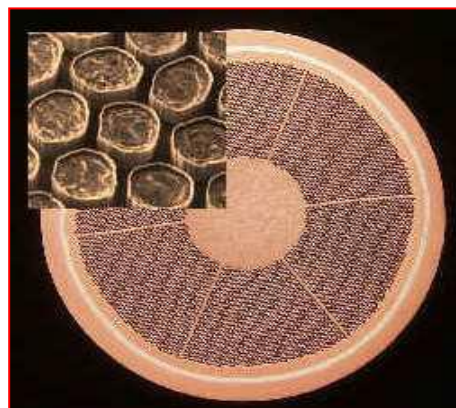


Figure 1.9. Fil NbTi

### I.5.2 Supraconducteurs à haute température critique HTc

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

On parle ici essentiellement de fil supraconducteur, des longueurs maximales disponibles ainsi que de la possibilité de les mettre sous forme de bobine. Les recherches actuelles sur ces matériaux sont principalement dédiées à l'YBCO. On doit également considérer le cas des matériaux massifs (bulks) réalisés avec des monodomains, ils peuvent permettre de s'opposer à des flux magnétiques très élevés, pour réaliser un écran magnétique, ou de piéger du champ magnétique pour concevoir un aimant supraconducteur. Actuellement les pastilles réalisées peuvent atteindre des diamètres de 50mm, des formes rectangulaires voire même hexagonales. [1]

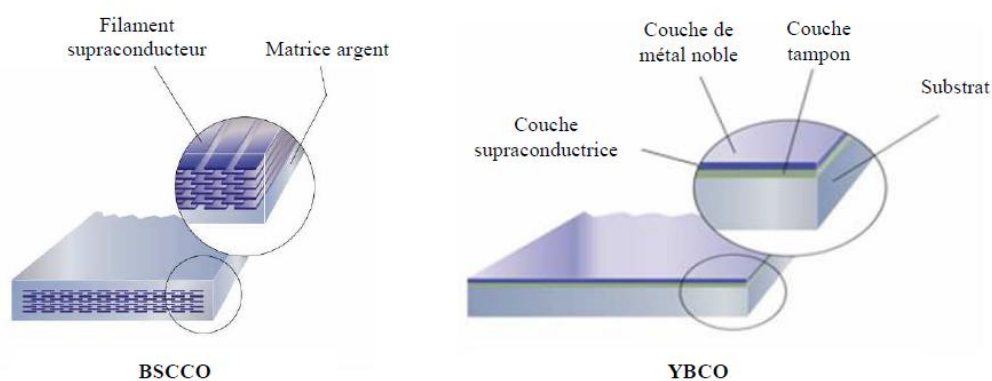


Figure 1.10. Fils supraconducteurs HTS



**Figure 1.11.** Pastilles d'YBCO – CAN Superconductor

### I.5.3 Cas particulier

En 2001, un nouveau supraconducteur fait son apparition le diborure de magnésium ( $MgB_2$ ), caractérisé par un plusieurs segments dans une armature en cupro-nikel. Ce supraconducteur se trouve à mi chemin des LTS et HTS, avec une température critique de 39K. Utilisé sous des températures de 20K, il permet d'obtenir des résultats intéressants, même s'il est moins performant que les HTS. De plus, sa base métallique en fait un fil facilement utilisable, par exemple pour la réalisation de bobines.



**Figure 1.12.** Fil en  $MgB_2$

**I.6.Conclusion**

Dans ce chapitre, on a essayé de donner quelques notions de base sur la supraconductivité (propriété générales, Principales caractéristiques des matériaux supraconducteurs, Classification des supraconducteurs, Matériaux Supraconducteurs).

Dans le chapitre suivant on donne quelques applications des supraconducteurs en électrotechnique.

## II.1 INTRODCUCTION

L'intérêt technologique des supraconducteurs est indéniable. En effet, les systèmes classiques actuels qui remplissent parfaitement leurs fonctions ont plusieurs limites :

- Leurs conducteurs chauffent : phénomène incontournable dû aux pertes par effet Joule.
- L'induction magnétique créée par leurs circuits est limitée à 2 Teslas.

De plus, les circuits magnétiques classiques sont contraignants au vu de leurs encombrements et du poids.

- Le couple, directement lié au courant et grandeur physique importante se trouve lui aussi limité dans les machines électriques classiques. Et, les pertes par effet Joule limitent fortement l'intensité du courant.

Nous voyons donc tout de suite l'intérêt de l'utilisation de machines supraconductrices et les enjeux qu'elles représentent pour contrecarrer ces obstacles. Bien que l'industrie électrique ne soit pas encore totalement prête à opter pour la technologie des supraconducteurs (cela constitue pour elle un grand changement), plusieurs applications ont vu le jour.

On note toutefois que les supraconducteurs se rencontrent surtout dans les domaines où les contraintes économiques sont peu importantes, comme la recherche ou le développement car les besoins en réfrigération pénalisent les petites industries. Bien que l'utilisation des supraconducteurs soit limitée par la basse température qu'ils nécessitent, il n'en reste pas moins que les scientifiques leur ont trouvé des applications très diversifiées que ce soit dans les domaines de l'environnement, de la médecine, de l'ingénierie, de l'électronique.

Le présent chapitre est consacré aux divers domaines d'applications de la supraconductivité, on y citera les principales applications dans le domaine de l'électrotechnique

## II.2 Stockage magnétique de l'énergie (SMES).

L'idée de stocker de l'énergie dans une bobine supraconductrice en court-circuit remonte à 1969 avec les travaux de M. Ferrier. Une bobine supraconductrice permet en effet de faire circuler un courant électrique sans dissipation d'énergie et donc de produire un champ magnétique qui devient permanent une fois le bobinage bouclé sur lui-même par un connecteur supraconducteur. Une bobine supraconductrice permet donc le maintien de l'énergie stockée dans la bobine de manière théoriquement permanente. Utiliser un aimant résistif serait impossible puisque l'énergie serait dissipée en quelques ms. Parmi les propriétés très intéressantes des SMES on peut noter sa capacité à se décharger très rapidement (sur des durées inférieures à la seconde), son rendement très intéressant (>95%) et le nombre de cycles de charge/décharge très élevé (potentiellement infini). Un SMES est donc davantage une source

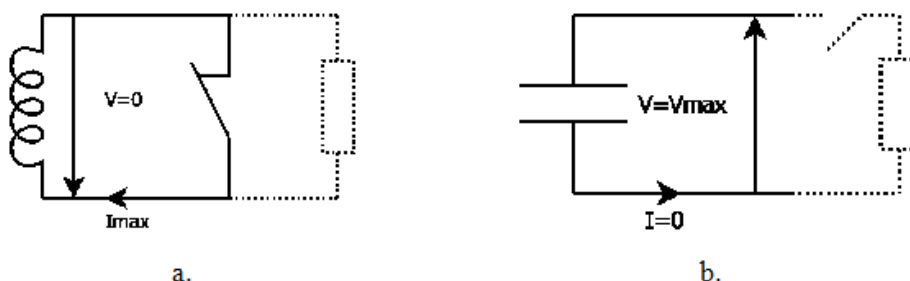
de courant impulsionnelle qu'un dispositif de stockage d'énergie. C'est aussi une excellente solution pour des alimentations non-interruptibles ou certains FACTS (Flexible AC Transmission System), équipements statiques pour améliorer le fonctionnement des réseaux électriques. La nécessité de source impulsionnelle d'énergie pour des applications émergentes comme les lanceurs électromagnétiques à vocations militaires ou civiles offre aussi d'autres opportunités aux SMES. Le SMES est alors une solution particulièrement bien adaptée et apporte des avantages substantiels par rapport aux solutions conventionnelles, en termes de rendement, mais aussi de légèreté et d'encombrement.[11].

Plusieurs SMES ont démontré leurs performances et capacités opérationnelles pour des puissances dans la gamme du mégawatt et des durées de l'ordre de la seconde. Ils ont été utilisés comme sources non-interruptibles (« onduleur ») pour des charges sensibles ou pour stabiliser des réseaux électriques.

Les SMES peuvent aussi être une solution de relais avant le démarrage d'installation de production d'appoint mais restent encore peu utilisés comme moyen de fort stockage d'énergie à cause de leur relative faible énergie stockée par rapport à d'autres technologies plus mature (barrages hydroélectriques, batteries, ...). Les SMES sont aussi plus avantageux que les supercapacités en termes d'énergie stockée et de puissance mais sont réservés à un stockage direct du courant. Le stockage de l'énergie du réseau électrique dans un SMES nécessite une transformation du courant alternatif en courant continu. Cette étape est celle générant le plus de pertes dans le fonctionnement du SMES.

Le principe du stockage d'énergie électrique par un SMES ou une supercapacité est décrit par la formule II-1 et présenté sur la **Figure II.1**.

$$E_{\text{inductif}} = \frac{1}{2} LI^2 \text{ (SMES)}; \quad E_{\text{capacitif}} = \frac{1}{2} CV^2 \text{ (Supercapacité)} \quad \text{II. 1}$$



**Figure II.1** : Stockage d'électricité : inductif (a) et capacitive (b)[11].

Dans un SMES l'énergie stockée est reliée aux contraintes magnétiques subies par les matériaux par le théorème du Viriel étendu au magnétisme. Ce théorème est résumé par la formule simplifiée II.1 où  $W_{\text{mag}}$  est l'énergie magnétique stockée,  $\sigma_u$  est la contrainte dans

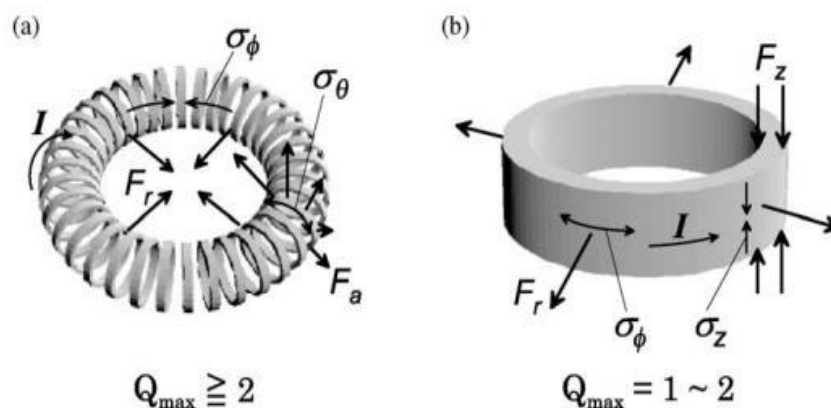


le bobinage,  $\rho$  la est la densité moyenne et  $M_t$  et  $M_c$  sont respectivement la masse du bobinage travaillant en traction et celle travaillant en compression. Ce lien entre l'énergie magnétique et les contraintes est à la base de la limitation des SMES pour le stockage de fortes densités massiques d'énergie et par la même de leur utilisation.

$$W_{\text{mag}} = \frac{\sigma_u}{\rho} (M_t - M_c) \quad \text{II.2}$$

L'optimisation des conceptions de SMES se fait en partie par l'utilisation de ce théorème.[11]

Plusieurs conceptions de SMES sont actuellement étudiées. Les deux principales configurations sont celles des solénoïdes et des tores. Les schémas de ces deux configurations, incluant les principales forces, sont présentés sur la **Figure II.2**. Le choix de la configuration dépend de l'utilisation du SMES, de l'énergie stockée, de l'encombrement, La configuration toroïdale génère un champ de fuite relativement faible voire nul ce qui favorise son utilisation par exemple dans les zones habitées. La densité d'énergie stockée est cependant plus faible (limitée à un tiers de l'optimum donné par le théorème du Viriel [11]) que celle des solénoïdes et son encombrement est donc souvent plus important. La conception solénoïdale présente un fort champ de fuite. Elle nécessite donc souvent un blindage magnétique pour pouvoir être implantée dans des endroits habités, ou comportant des appareils sensibles au champ magnétique. Elle présente néanmoins plusieurs avantages : la réalisation est plus facile que celle toroïdale et sa densité d'énergie peut se rapprocher de celle donnée par le théorème du Viriel dans le cas d'un solénoïde ayant une longueur très faible [11]. Le cas d'un solénoïde infini présente une densité d'énergie similaire à la configuration toroïdale. Si la limite du théorème du Viriel n'est pratiquement pas atteignable, des densités supérieures à la moitié de celle prédite par le théorème sont cependant accessibles. Le principal inconvénient de cette structure est la non-uniformité des contraintes dans le bobinage rendant le dimensionnement plus délicat.



**Figure II.2** : Configurations toroïdale (a) et solénoïdale (b) avec les efforts induits [11]

Dans le cadre de l'optimisation de la densité d'énergie stockée, une optimisation de la conception toroïdale peut permettre de dépasser le tiers de l'optimum donné par le théorème du Viriel et de se rapprocher de cet optimum par une configuration toroïdale twistée adaptée comme le montre la **Figure II.3**. [11]



**Figure II.3** : Configuration toroïdale en hélice avec des efforts compensés [12].

Le tableau suivant représente quelques exemples des SMES. **Tableau II.1**

Origine	Année	Conducteur	refroidissement	Energie/ Puissance	Application
BPA	1 983	LTC (NbTi)	hélium cycle fermé 4,5 K	30 MJ	Correction des instabilités réseau
Japon	2 003	LTC (NbTi)	Bain hélium 4,2 K	7,3 MJ/5 MW	
Finlande	2 003	LTC (Nb <sub>3</sub> Sn)	Conduction 10 K	0,2 MJ	
Allemagne	2 003	HTC (Bi-2212)		150 kJ/20 kW	
Japon	2 004	HTC (Bi-2212)	hélium cycle fermé 4,2 K	1 MJ/1 MW	Stabilité de tension
Corée	2 005	LTC (NbTi)	Bain hélium 4,2 K	3 MJ / 0,75 MW	
Chine	2 007	HTC (Bi-2223/Ag)	Bain hélium 4,2 K	1 MJ / 0,5 MW	
France	2 007	HTC Bi-2212	Conduction 20 K	800 kJ / 175 kW	Application pulsée, canon électrique
Japon	2 008	LTC (NbTi)	Conduction 4 K	1 MJ / 1 MW	
Japon	2 008	HTC (YBCO)		2 GJ / 100 MW	
Corée	2 011	YBCO	Conduction 20 K	2,5 MJ	Qualité de la tension
Japon	2 012	YBCO		Classe MJ	Stabilisation du réseau

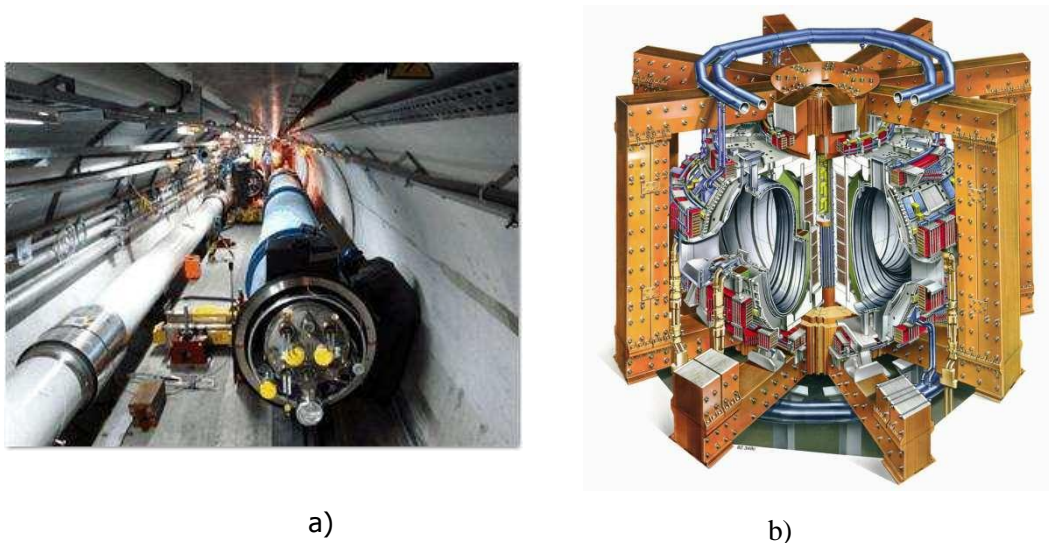
**Tab II.1** : quelques exemples des SMES

## II.3 Câbles supraconducteurs

Les excellentes propriétés des supraconducteurs en transport de courant, notamment grâce à des densités de courant de plusieurs  $\text{kA}/\text{mm}^2$ , en font un matériau très prisé pour les applications de pointe en physique et en électrotechnique. Cependant leur utilisation reste limitée car ces matériaux dépendent d'une lourde cryogénie. Toutefois les récents progrès réalisés sur les supraconducteurs HTS et les systèmes cryogéniques (tubes à gaz pulsé) tendent à faciliter leur utilisation [14].

### II.2.1 Les câbles supraconducteurs conventionnels :

Les câbles conventionnels, c'est-à-dire les câbles supraconducteurs à basse température critique (LTS), sont essentiellement utilisés en physique de pointe pour l'élaboration de bobines à fort champ magnétique. Les principaux projets qui utilisent ce type de bobines sont le cyclotron du LHC (CERN) et le projet ITER (CEA-Cadarache), **Figure II.4**.



**Figure II.4** (a) Section souterraine du LHC, (b) schéma du réacteur ITER

Parmi les matériaux supraconducteurs conventionnels seuls le NbRTi et le Nb<sub>3</sub>Sn sont utilisés dans la production industrielle de câbles de part leurs propriétés supraconductrices et leur aptitude à être mis en forme. Le NbRTi dispose des bonnes propriétés supraconductrices ( $T_c = 9$  K,  $a_0H_{c2} = 12$ T) et de très bonnes propriétés mécaniques (très ductile) lui garantissant une mise en forme aisée. Le Nb<sub>3</sub>Sn possède les meilleures caractéristiques supraconductrices des alliages métalliques ( $T_c = 18,3$  K,  $a_0H_{c2} = 23$  T), mais a de très mauvaises propriétés

mécaniques. Encore aujourd'hui la méthode d'élaboration des câbles multi-filamentaires de Nb<sub>3</sub>Sn demeure coûteuse, et n'est utilisée que pour des bobines de plus de 8 T [13].

Le marché grand public, pour les câbles supraconducteurs conventionnels, concerne la spectroscopie du solide et l'imagerie par résonance magnétique (RMN et IRM), qui sont actuellement les seules applications industrielles [2] des aimants supraconducteurs. La résolution et la sensibilité d'un appareil de résonance magnétique nucléaire (RMN) sont pour l'essentiel limitées par les caractéristiques du champ magnétique : stabilité et intensité du courant. Les aimants supraconducteurs présentent une grande stabilité temporelle et acceptent de fortes intensités : ils sont donc plus adaptés que les électroaimants classiques pour ces applications. Les supraconducteurs sont aussi des matériaux idéaux pour les applications de lévitation magnétique comme le transport à grande vitesse. Le MAGLEV (superconducting MAGnetically LEvitated Vehicle) lévite grâce à des bobines supraconductrices de Nb-Ti, fixées aux wagons, qui génèrent un champ suffisant pour le faire léviter et mouvoir. Ce train à lévitation magnétique est en développement dans plusieurs pays dont l'Allemagne, le Japon et la Chine. A Shanghai, une liaison de 30,5 km est assurée par le Transrapid roulant à une vitesse maximale de 431 km/h. [13]

## II.2.2 Les câbles supraconducteurs HTS :

Depuis leur découverte en 1986, les matériaux HTS offrent de nouvelles potentialités d'applications : ces matériaux peuvent fonctionner avec une cryogénie à l'azote liquide, et la production de câble pour le transport de courant devient alors envisageable. Cependant ces matériaux sont des céramiques très peu ductiles et se prêtent mal aux opérations classiques intervenant dans la réalisation de câbles. L'enjeu majeur est de mettre au point un procédé de fabrication de câbles permettant d'obtenir de bonnes propriétés électriques et mécaniques.

Le domaine du transport d'énergie électrique est en pleine évolution : avec l'accroissement de la demande en énergie, certaines lignes électriques nécessitent d'être renforcées et les projets de réseaux électriques doivent désormais tenir compte de nouvelles contraintes socio-économiques et environnementales. Pour ces raisons, les câbles supraconducteurs représentent une solution sérieuse dans des zones fortement urbanisées ou protégées. Les câbles supraconducteurs de puissance (**Figure II.4.a**) présentent trois principaux avantages [15]:

➤ Ils peuvent transporter trois à cinq fois plus de puissance que les câbles conventionnels (aluminium ou cuivre). Un des principaux objectifs du développement des câbles

supraconducteurs HTS est de remplacer les câbles actuels. Dans les villes où la consommation électrique est en constante augmentation (Hong Kong, Tokyo, New York), il sera possible de transmettre beaucoup plus de courant dans la même section en utilisant l'infrastructure existante, évitant ainsi de lourds travaux de terrassement, et des expropriations (**Figure II.4.b**).

➤ Ils n'ont pas d'impact thermique ou électromagnétique sur l'environnement. Les matériaux supraconducteurs ont une résistance nulle : il n'y a donc pas de perte par effet Joule et pas de dégagement de chaleur. De plus, les câbles supraconducteurs sont munis d'un bouclier supraconducteur (Figure II.4.a) qui piège le champ magnétique produit par le passage du courant à l'intérieur du câble. Ceci permettra d'implanter de nouveaux chemins de câbles de puissance où cela était jusqu'à présent interdit.

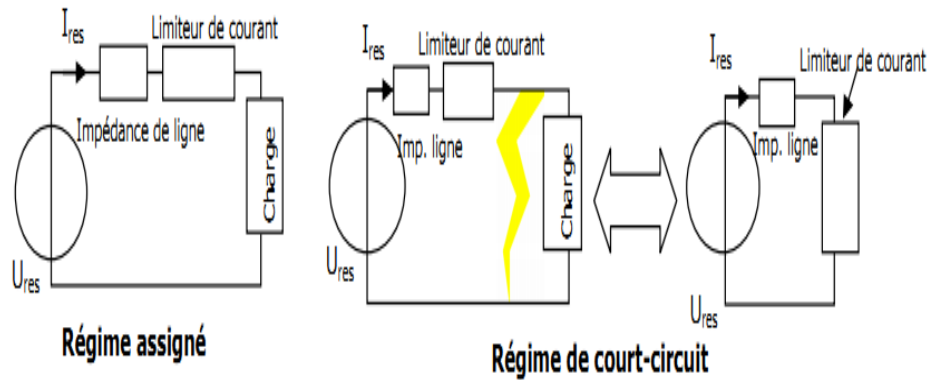
➤ Ils permettent de réduire drastiquement l'impédance des lignes (meilleur contrôle des flux).

Ces trois principaux avantages suffisent à justifier l'utilisation de câbles supraconducteurs de puissances et donc banaliser l'utilisation de la cryogénie dans le domaine du transport de courant [17].

#### II.4 Limiteurs de courant supraconducteur

Une autre application des supraconducteurs à haute température critique est le limiteur supraconducteur. Ce dispositif permet de protéger les réseaux électriques des courants de court-circuit en agissant comme un régulateur naturel de courant [16] [13]. Cette application est très intéressante si l'on souhaite protéger efficacement les réseaux qui sont de plus en plus interconnectés.

Le limiteur de courant agit comme une impédance variable en série avec le circuit électrique, **Figure II.5**. Le courant est limité par une augmentation rapide de l'impédance ( $< 2$  ms) pour limiter le courant maximum à une valeur seuil, nettement inférieure à la valeur théorique de court-circuit. Lors de l'apparition d'un défaut, le limiteur est soumis à la pleine tension du réseau. La puissance dissipée est donc très importante.



**Figure II.5** Schéma d'un réseau électrique en régime assigné, et en régime de défaut

Les limiteurs de courant supraconducteurs (SCFCL Superconducting Fault Current Limiter) sont d'excellents candidats pour la limitation de courant : ils sont extrêmement rapides et autonomes. La transition brutale d'un supraconducteur, couplée à sa résistivité à l'état normal, permet d'introduire rapidement et naturellement une forte résistance en série avec le réseau, limitant ainsi le courant. Cependant, comme tout système supraconducteur, ils nécessitent un environnement cryogénique.

Il existe plusieurs types de SCFCL : les limiteurs résistifs, à noyau magnétique, pont redresseur et contrôleur de courant de défaut. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le **Tableau II.2** [16]. Parmi l'ensemble des SCFCL, c'est le limiteur résistif qui est le plus compact. Les SCFCL n'utilisant pas la transition du supraconducteur ont des temps de récupération très courts, et les SCFCL utilisant des composants électroniques sont moins fiables car il n'y a pas de limitation intrinsèque en cas de défaillance du système.

Type de SCFCL	Localisation des pertes	Sûreté après défaillance	Volume de supraconducteur	Taille	Temps de récupération
Résistif	Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Petit	Secondes/minutes
Noyau magnétique écranté	Bobine primaire Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Grand	Secondes
Pont redresseur	Semiconducteur	Non	Réalisable sans supraconducteur	Moyen	Immédiat
Contrôleur de courant de défaut	Semiconducteur Bobine de limitation	Non	Réalisable sans supraconducteur	Moyen	Immédiat
Noyau magnétique saturé	Noyau Magnétique Bobine primaire	Oui	Petit	Moyen	Immédiat

**Tab II.2** comparaison des différents types de SCFCL [16]

Actuellement certains SCFCL sont proches de la commercialisation [17], et d'importants projets excitent à travers le monde, notamment avec les conducteurs déposés. La plupart des projets utilisent des SCFCL résistifs. Nexans SuperConductors a développé un limiteur triphasé CURL 10 de 10 kV/10 MVA, **Figure II.6**. Ce démonstrateur en BSCCO a été testé avec succès en 2003 sur le réseau de distribution RWE en Allemagne [18][19], mais n'a subi aucun court-circuit triphasé.



**Figure II.6** Démonstrateur CURL 10 – Nexans[13]



Au Japon, plusieurs limiteurs de courant résistifs utilisant des conducteurs déposés ont été réalisés dans le cadre du projet Super-ACE. Le premier de 6.6 KV / 100 A est adapté aux hautes tensions et le second de 200 V / 1 KA aux forts courants. Un limiteur triphasé de 10.5 kV / 70 A a été développé par ABB en Suisse. Ce limiteur utilise plusieurs cylindres de BSCCO-2212, il a été installé dans une centrale hydro-électrique Suisse en novembre 1996 et a fonctionné avec succès pendant une année.[13]

## II.5 Les transformateurs supraconducteur

Les transformateurs sont parmi les appareillages électriques les plus utilisés dans les réseaux d'énergie électriques. Ils sont principalement employés pour augmenter ou abaisser les niveaux de tensions, selon l'utilisation que l'on souhaite. Cela peut être quelques centaines de volts pour la distribution chez les clients résidentiels, mais également plusieurs milliers de volts afin de réduire les pertes sur de grandes distances dans le cas des réseaux de transport

Malgré un rendement élevée pouvant atteindre 98% ou 99%, les transformateurs avec des enroulements en cuivre ou en aluminium, que l'on va qualifier de transformateurs "classiques", génèrent des pertes dont les origines sont multiples. En premier lieu, il y a les pertes par effet Joule dans les enroulements, qui sont le résultat de la résistance des enroulements multipliés par l'intensité du courant qui les traverse au carré ( $RI^2$ ). Viennent ensuite les pertes d'origine magnétique, appelées communément "pertes fer". Elles trouvent leurs origines dans le circuit magnétiques du transformateur. Elles sont de deux types :

- Les pertes par courants de Foucault
- Les pertes par hystérésis

Ces deux types de pertes peuvent éventuellement, en plus faible proportion, se retrouver dans la carcasse du transformateur si le matériau qui la constitue est conducteur, aussi bien électriquement que magnétiquement. Malgré une efficacité déjà élevée, l'amélioration du rendement des transformateurs de quelques dixièmes de pourcent peut être très importante étant donné les puissances mises en jeu, qui peuvent être de l'ordre de plusieurs MVA.

Les pertes par effet Joule dans le cuivre sont relativement importantes si on les compare à celles du circuit magnétique et peuvent atteindre 75% des pertes totales. On voit donc clairement l'intérêt de créer des bobinages supraconducteurs. Les transformateurs comportant des enroulements supraconducteurs présentent une géométrie

et un arrangement qui peut être similaire aux transformateurs usuels en cuivre. La différence principale réside dans le matériau utilisé. Grâce aux propriétés intrinsèques des matériaux supraconducteurs, les pertes cuivre d'un transformateur classique peuvent être quasiment éliminées, et ce, même s'il existe des pertes pour les matériaux supraconducteurs soumis à un champ magnétique variable.

### II.5.1 Transformateurs supraconducteurs à basse température critique.

Le développement des transformateurs supraconducteurs a commencé dans les années 1960 avec l'utilisation de supraconducteurs à basse température critique, c'est-à-dire pour des températures inférieures à 30 K. Deux matériaux étaient principalement utilisés, le niobium titane (NbTi) et le niobium étain (Nb<sub>3</sub>Sn), qui étaient refroidis à l'hélium liquide, dont la température est de 4.2 K. Les coûts cryogéniques étaient alors très importants et rendaient les projets non viables économiquement. Il a fallu attendre l'apparition de nouveaux conducteurs autorisant une baisse significative des pertes AC pour rendre rentables les transformateurs à base de supraconducteurs à basse température critique.

Un transformateur abaisseur 500 kV/22 kV d'une puissance de 1000 MVA utilisant ces nouveaux câbles a fait l'objet d'une étude dans les années 1977-1981 par Westinghouse Electric Corporation. Les résultats montrent que, si le projet est réalisable et que le rendement économique est meilleur que son homologue en cuivre, ils subsistent tout de même des problèmes. Le transformateur ne pouvait pas retrouver ses caractéristiques après un "quench", c'est à dire le passage brusque de l'état supraconducteur vers l'état résistif, car la puissance à dissiper était trop importante et dépassait la capacité de refroidissement, et ce, malgré l'utilisation d'un enroulement supplémentaire pour dissiper de l'énergie. Le transformateur était donc instable et dans un réseau cela aurait pu provoquer de graves problèmes de fiabilité. Ajouter une réserve de puissance pour générer plus de froid aurait certainement rendu le système non rentable économiquement, annulant ainsi l'intérêt d'utiliser des matériaux supraconducteurs.

Grâce à quelques progrès réalisés sur les câbles par ABB et GEC Alsthom au début des années 1980, fabriquer de grandes longueurs de câbles multi-filamentaires à base de NbTi devenait possible. Cela permettait de s'affranchir de soudeuse pour créer les longueurs nécessaires et évitait par la même occasion d'ajouter des parties résistives qui sont génératrices de pertes, et donc de chaleur dans les bobinages. Les pertes furent donc encore réduites, et quelques prototypes ont vu le jour les années suivantes (voir **tableau II.3**)

Ces différents prototypes (voir **tableau II.3**) ont démontré la faisabilité, une réduction de poids et une plus grande efficacité des transformateurs supraconducteurs par rapport à leurs homologues classiques. Cependant, la puissance nécessaire au refroidissement restait très (trop) importante. Les projets furent quasiment abandonnés pour privilégier les supraconducteurs à haute température critique durant les années 1990. Le rapport puissance absorbée sur puissance utile à basse température est supérieur à 1000 pour les supraconducteurs à basse température critique (4.2 K), c'est à dire qu'il faut fournir 1000 W de puissance électrique pour évacuer 1 W de chaleur à 4.2 K. Ce même rapport pour les supraconducteurs à haute température critique est d'environ 20 lorsque l'on utilise de l'azote liquide à 77 K. L'utilisation de ces matériaux et de l'azote liquide s'est donc naturellement imposée d'un point de vue cryogénique.

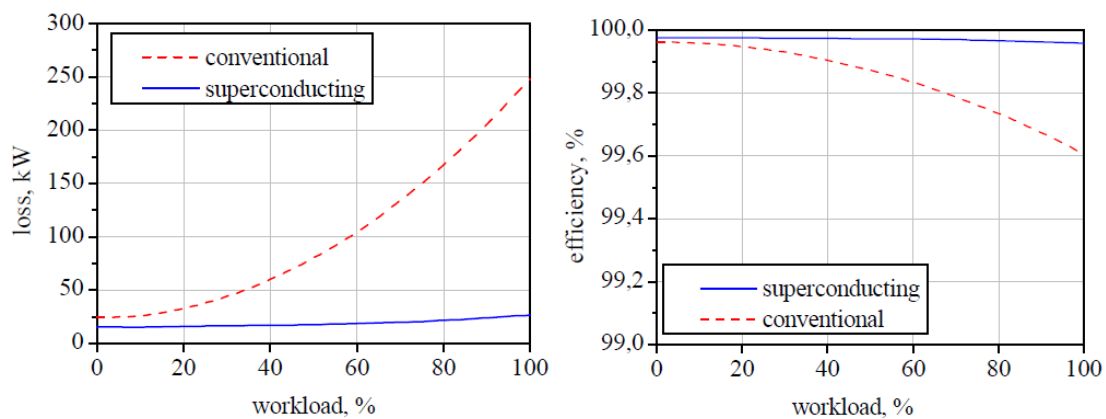
Constructeur	Nombre de phase	Puissance	Type de supraconducteur
Toshiba	1	30 kVA	NbTi
Osaka University	3	40 kVA	NbTi
Alstom	1	80 kVA	NbTi
ABB	1	330 kVA	NbTi
Kansai Electric Power Company	3	2000 kVA	Nb <sub>3</sub> Sn

**Tableau II.3:** Quelques Prototypes de transformateurs supraconducteurs basse température au début des années 1980

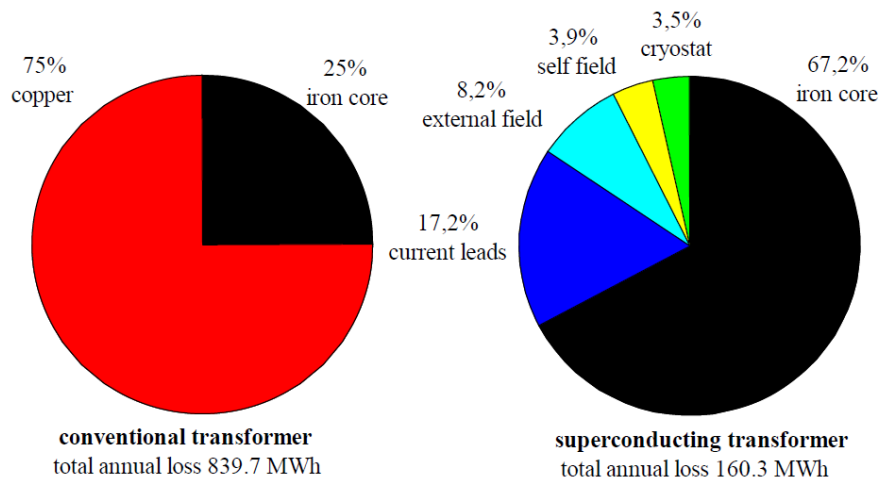
### II.5.2 Transformateurs supraconducteurs à haute température critique.

La découverte des supraconducteurs à haute température critique (>30 K) a permis de renforcer l'intérêt des supraconducteurs pour les applications électrotechniques. Le problème majeur de ces nouveaux matériaux était la méconnaissance des pertes AC et la difficulté de les évaluer, rendant la conception de dispositifs utilisant ces nouveaux matériaux plutôt difficile. Les premiers appareils ont utilisé des conducteurs composés de BSCCO-2212 déposé sur de l'argent. Par la suite, le BSCCO-2223 en conducteurs déposés ou multifilamentaires, et enfin les fils supraconducteurs à base d'YBCO ont fait leur apparition en électrotechnique. Malgré l'utilisation de matrice peu résistive tel que l'argent ou l'or qui engendrent des pertes par courants de Foucault ou par couplage plus importants, la possibilité de travailler à des températures plus élevées a permis de tolérer des pertes AC plus élevées autant dans les câbles supraconducteurs que les bobinages, en partie grâce aux coûts cryogéniques nettement inférieurs avec l'utilisation d'azote liquide à une température de 77 K.

Une étude réalisée par Berger et al compare deux transformateurs de 63 MVA. Le premier est classique avec enroulements en cuivre, et le second est son homologue supraconducteur avec des enroulements utilisant des conducteurs déposés de seconde génération en YBCO. La **figure II.7** montre qu'une "simple" amélioration de rendement en passant de 99.6% pour un transformateur conventionnel à 99.9% peut permettre d'économiser 80% de l'énergie perdue par an dans les enroulements d'un transformateur classique. Comme on peut le voir dans la **figure II.8**, la majorité des pertes dans les transformateurs supraconducteurs trouvent leur origine dans le circuit magnétique (pertes fer). La seconde grande source de pertes se situe au niveau des amenées de courant qui permettent de transporter le courant, qui arrive à l'extérieur du cryostat à température pièce, jusqu'au enroulement qui sont immergés dans le fluide cryogénique. Ainsi, pour améliorer de façon notable le rendement des transformateurs supraconducteurs, ces deux composants devraient être sérieusement pris en compte lors de la conception. Un autre avantage important pour le transformateur supraconducteur est, comme on peut le constater sur la **figure II.8**, son rendement exceptionnel quelque soit le niveau de charge de ce dernier grâce à "l'annulation" des pertes par effet Joule dans les enroulements, qui sont dépendante du carré du courant circulant dans les bobines.



**Figure II.7:** Comparaison des pertes (à gauche) et du rendement (à droite) entre un transformateur conventionnel d'une puissance de 63 MVA et son équivalent supraconducteur



**Figure II.8:** Répartitions annuelles des pertes de deux transformateurs de 63 MVA

Le **tableau II.4** montrent qu'un grand nombre de projets ont déjà été réalisés ou sont en cours de réalisation. Les puissances s'étalent sur une plage de quelques kVA à plusieurs MVA. Les niveaux de tension sont également assez larges, allant de quelques dizaines de volts à plusieurs dizaines de

Kilovolts pour certains transformateurs. Ce grand nombre de projets démontre un réel intérêt scientifique et industriel, ainsi que la faisabilité de tels transformateurs. Dans les projets les plus récents, on constate que l'YBCO est beaucoup utilisé.

Constructeur	Année	Nombre de phase	Puissance	Type de supraconducteur
ABB, EDF and AmSC	1998	3	630 kVA	Bi-2223
Siemens	2002	1	1 MVA	Bi-2223
Nagoya University. Japon	2007	3	100 kVA	YBCO CC
DEE and CIRSE Nagoya university Chubu Electric Power Company Forschungszentrum Karlsruhe	2004	1	6.25 kVA	Bulk Bi-2212 and CuNi
Kyushu Electric Power Fuji Electric System Kyushu University	2007	3	20 MVA	YBCO filament tape
Nagoya University	2007	3	100 kVA	YBCO CC
Turksat AS	2008	1	12.5 kVA	MgB <sub>2</sub>
KIT Germany	2010	1	60 kVA	YBCO CC
WES, SuperPower, ORNL, SCE	2010	3	28 MVA	YBCO CC

**Tab II.4:** Quelques projets existants de transformateurs supraconducteurs à haute température critique

## II.6 Aimant supraconducteur

### II.6.1 AIMANTS POUR L'INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE

La production de champs magnétiques intenses pour les laboratoires de recherche fut l'une des premières applications de la supraconductivité. Les dispositifs utilisant des conducteurs conventionnels en cuivre ou autres types de conducteurs ont atteint leurs limites soit à cause de la saturation des culasses ferromagnétiques limitant la valeur maximale de l'induction magnétique, soit par les puissances électriques énormes à mettre en oeuvre lorsqu'on ne peut pas utiliser de fer [20].

Par contre les supraconducteurs permettent d'obtenir des inductions magnétiques très élevées, dans des volumes très grands sans noyaux ferromagnétiques, avec des pertes acceptables, essentiellement dues aux systèmes de cryogénie.

La construction de ces bobines doit tenir compte des exigences propres à chaque application. On peut citer :

- Le degré d'homogénéité du champ dans un volume déterminé par le besoin de l'utilisateur.
- la stabilité temporelle du champ.
- le comportement de la bobine lorsqu'on impose un courant variable.
- la tenue mécanique du bobinage sous l'effet des forces électromagnétiques.

## II.6.2 REALISATION D'AIMANTS POUR L'INSTRUMENTATION DE LABORATOIRE

Elle a été la première application à voir concrètement vu le jour ; [21] cela est essentiellement du aux besoins liés à l'étude des supraconducteurs eux même, études qui nécessitent des champs magnétiques élevés, en effet la découverte de supraconducteurs à fort  $H_{c2}$  tel que le  $NbTi$ ,  $Nb_3Sn$  [21] à nécessité la disposition d'aimant supraconducteurs pour produire ces champs. D'autres domaines de la science on manifestés les même besoins pour des champs magnétiques intenses, tel que la physique et la chimie du solide.

Par exemple pour les expériences de résonance magnétique nucléaire, pour lesquelles l'amélioration de la résolution, et donc la montée en fréquence, implique une augmentation du champ magnétique que seuls les supraconducteurs peuvent fournir.

## II.6.3 RECHERCHES SUR LA FUSION NUCLEAIRE

Les réacteurs nucléaires existant actuellement fonctionnent selon le principe de la fusion nucléaire, mais il existe une autre voie pouvant permettre de tirer de l'énergie du nucléaire il s'agit de la fusion nucléaire. Le principe de base pour la réalisation de ce type de réactions est le suivant : des atomes légers se combinent pour former des atomes plus lourds dégagent ainsi une énergie colossale, pour que de telles réactions y aient lieu il faut chauffer les noyaux très fortement (100 millions de degrés). Les noyaux chauffés ne doivent toucher aucune paroi il doivent être maintenus à un état de plasma confiné dans un réacteur.

Ce confinement peut être obtenu par voie magnétique dans des dispositifs appelés tokamak dans lesquelles le confinement du plasma est effectué dans un tore grâce à une configuration complexe du champ magnétique. Les valeurs des inductions magnétiques nécessaires pour de telles applications étant très élevées les bobines supraconductrices semblent être bien placés pour jouer un tel rôle.

#### II.6.4 AIMANTS POUR L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

L'I.R.M. est basée sur le principe suivant : un noyau atomique doté d'un moment magnétiseur et soumis à une induction  $B_0$  constante décrit un mouvement de procession autour de son axe avec une vitesse angulaire proportionnelle à  $B_0$ . En appliquant un champ magnétisant perpendiculaire à  $B_0$ , on observe un phénomène de résonance si la fréquence d'excitation  $f$  est égale à la vitesse angulaire de procession. On recueille ainsi un signal caractéristique.

L'induction de polarisation  $B_0$  varie dans l'espace, et  $f$  aussi, ce qui permet l'obtention des images.

La résolution et la sensibilité d'un appareil de RMN sont pour l'essentiel limitées par les caractéristiques du champ magnétique : l'intensité de celui-ci est, directement liée au rapport signal/bruit ; la largeur en fréquence de la résonance est directement fonction de l'homogénéité spatiale et de la stabilité temporelle du champ magnétique.

Les aimants supraconducteurs présentent sur tous points des avantages décisifs sur les électroaimants classiques. L'absence de noyau ferromagnétique d'une part permet d'atteindre des valeurs élevées de l'induction magnétique et, d'autre part, rend plus aisée l'obtention d'une excellente homogénéité du champ ( $=10^{-5}$ ) dans des volumes considérables [28].

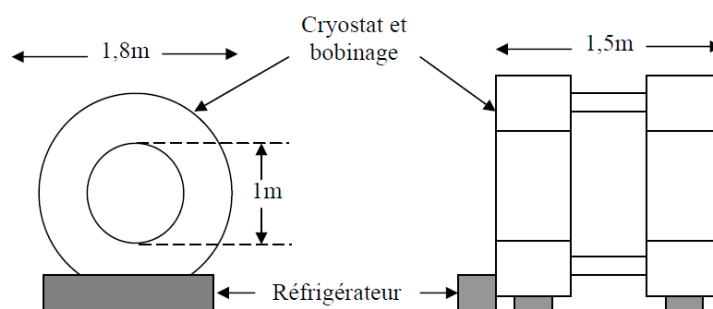


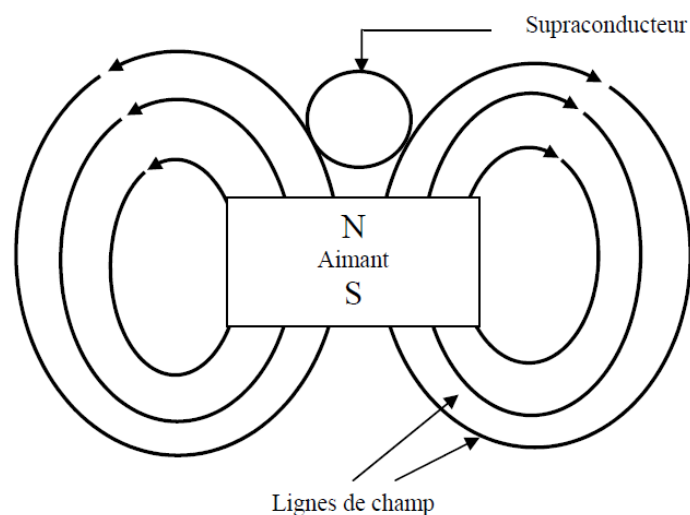
Figure II.9: Représentation schématique d'un système de RMN destiné à la chirurgie [20]



## II.6.5 LEVITATION MAGNETIQUE

L'une des plus importantes caractéristiques des supraconducteurs est l'effet Meissner, cette propriété traduisant l'aspect diamagnétique des supraconducteurs peut être à l'origine de l'une des plus importantes applications de la supraconductivité qui est la lévitation magnétique.

Si on place un corps diamagnétique dans un champ magnétique les lignes de celui-ci sont expulsées de se corps diamagnétique donnant ainsi naissance à un moment magnétique à l'échelle macroscopique poussant le corps sous l'effet d'une force magnétique à ce déplacer vers des zones de faible champ magnétique. La compensation de cette force par la force de graviter terrestre conduit à un état d'équilibre dans lequel le corps se trouve suspendu dans l'air sans contact mécanique avec ce qui l'entour, comme le montre la **Figure II.10**.



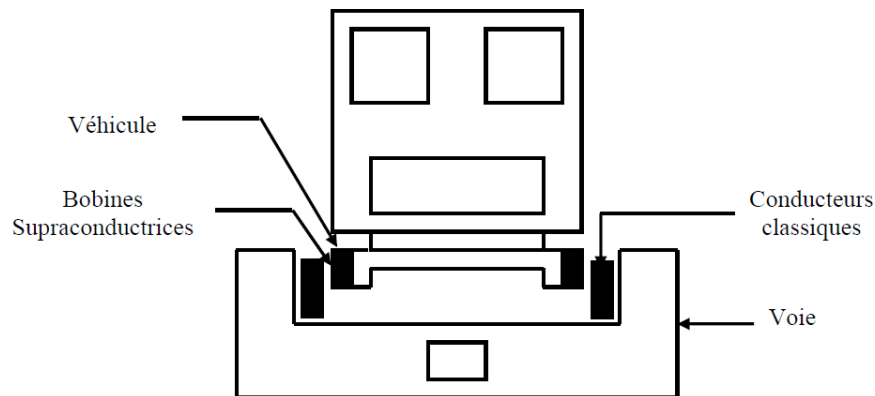
**Figure II.10** : Un corps supraconducteur porté à une température inférieure à  $T_c$  placé au-dessus d'un aimant

Une des applications potentielles de ce phénomène est la réalisation de volants d'inertie pour le stockage d'énergie.

La principale application envisageable pour l'utilisation de cette propriété est le transport à grande vitesse [21]. Le principe de cette application est le suivant :

Un champ magnétique intense est créé par un bobinage supraconducteur embarqué sur la partie mobile provoquant lors du déplacement des courants de Foucault dans une bande métallique fixée à la voie la sustentation du mobile résulte alors de l'interaction de ces courants avec le champ magnétique créé par la bobine. L'utilisation de tels

dispositifs permet de surmonter les problèmes liés à la maintenance des roux qui s'use rapidement sous l'effet des frottements. Sur la **Figure II.11** une représentation schématique d'un train à grande vitesse à sustentation électromagnétique utilisant des supraconducteurs.



**Figure II.11:** Représentation schématique du train à grande vitesse à sustentation électromagnétique utilisant des supraconducteurs

## II.7. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré aux principales applications de la supraconductivité notamment dans le domaine de l'électrotechnique où nous avons essayé de donner quelques détails importants et mettre l'accent sur les applications dans le domaine des machines et celui du transport de l'énergie.

On peut dire que pour tout ce qui concerne les équipements de distribution et de conditionnement de l'énergie électrique, les supraconducteurs ont suscité de nombreux espoirs qui ont été en permanence maintenus vivaces par les progrès constants sur les performances des matériaux et sur leur mise en forme.

L'inconvénient majeur que rencontre l'utilisation des supraconducteurs dans les dispositifs destinés à l'électrotechnique est la présence du système de cryogénie, qui impose des contraintes au niveau du dimensionnement de ces dispositifs, et une diminution des performances des supraconducteurs.

**Bibliographie.**

SMES : **32732\_LECREVISSE\_2012\_archivage**

Câble : **these\_finale**

Limiteurs : **these\_finale+ These\_COINTE\_2**

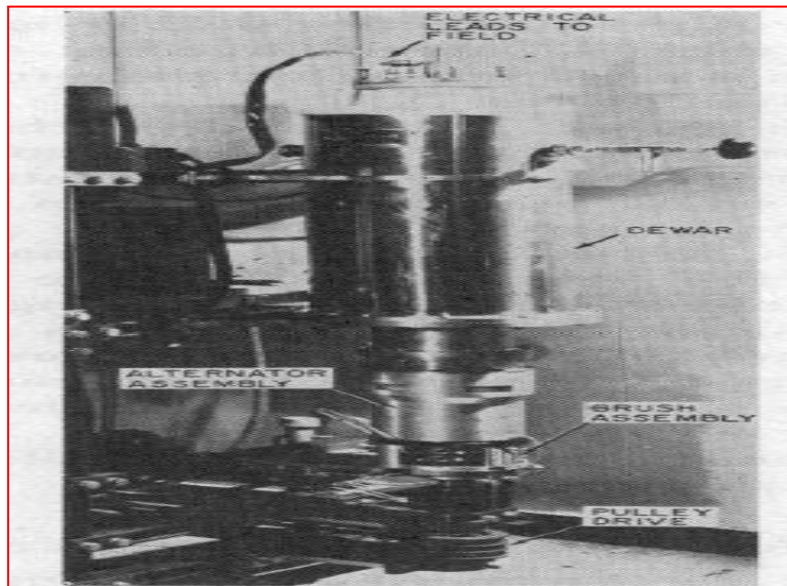
Transformateur : **2012\_Charles-HenriBonnard**

### **III.1. Introduction :**

En fonction du type de supraconducteur utilisé, on a deux générations différentes de machines supraconductrices. Jusqu'à la fin des années 90 ce sont les supraconducteurs à basse température critique qui étaient les plus utilisés dans la réalisation de ces machines. Après la découverte des supraconducteurs à haute température critique et le développement de ces matériaux, une autre période a commencé. Actuellement la quasi-totalité des machines, réalisées ou étudiées, contiennent des supraconducteurs à haute température critique.

### III.2 Historique

La recherche dans le domaine des moteurs électriques supraconducteurs a débutée dans le milieu des années 60, avec comme première réalisation un alternateur de 12000tr/min (**Fig. III.1**). Pendant 30 ans, les matériaux à basse température critique ont permis d'envisager des structures de machines synchrones ou encore à réluctances [22] supraconductrices.



**Figure III.1** Premier moteur supraconducteur – alternateur 12000 tr/min [23]

Un premier prototype est proposé en 1967, Dimatech est une machine entièrement supraconductrice, dont les essais présenteront trop de pertes sous champ magnétique variable. Une première réalisation marquante est le fruit du MIT en 1969, avec la première levée des difficultés concernant les systèmes cryogéniques tournants, il s'agissait d'un alternateur 40kVA à rotor supraconducteur. Avec du recul, cette réalisation caractérise un point de départ de travaux de recherche conséquents sur les machines électriques supraconductrices à basse température critique, utilisant des bobinages en NbTi. De 1980 à 1995, des moteurs de plus en plus puissants sont proposés, l'ensemble fil supraconducteur à basse température critique – système cryogénique (fixe ou tournant) – machine électrique commence à être assimilé et des structures intéressantes sont proposées. En France, un des projets importants est mené par Pascal Tixador, la réalisation d'une machine hybride à rotor à aimants en NdFeB et induit en NbTi, de 150kW.

Des projets concernant les machines électriques à matériaux supraconducteurs à haute température critique commencent à voir le jour au début des années 90. Comme

par exemple un moteur synchrone à pôles saillants de 750 kW en 1996 réalisé par American Superconductor. L'Allemagne reste également très présente dans ces recherches, avec des topologies de machines synchrones équivalentes et propose plusieurs machines, un premier prototype de 380kW et un alternateur de 4MVA, respectivement en 2002 et 2007. 2003, marque le point de départ de la première réalisation industrielle française d'un moteur à supraconducteur à haute température critique, ULCOMAP devra aboutir par la réalisation d'un moteur synchrone à inducteur en BSCCO de 250kW. En janvier 2009, American Superconductor propose une machine de 36MW destinée à la propulsion marine.



**Figure 3.2.** Plateforme d'essai AMSC – machine supraconductrice de 36.5 MW [24]

Les dernières années nous offrent ainsi un large panel de réalisations et projets de moteurs supraconducteurs. Un travail important de référencement bibliographique a été effectué, nous classifions ces moteurs suivant leur principe de fonctionnement, pour détailler leurs topologies. Il sera divisé comme suit :

- Machines synchrones,
- Moteur homopolaire,
- Moteur asynchrone,
- Machine à courant continu,
- Machines spéciales.

### **III.3. Machines synchrones**

Cette catégorie de machines supraconductrices regroupe près de 90% des machines réalisées, avec une structure dominante de moteur synchrone à pôles

saillants, où la partie supraconductrice concerne un inducteur tournant. Consistant à reprendre un moteur classique cuivre et à remplacer la partie enroulement à courant continu par des bobines supraconductrices.

### **III.3.a Moteur Synchrone à pôles saillants à flux radial**

La majorité des réalisations industrielles est basée sur cette topologie, elle sera, donc décrite d'une manière plus détaillée par rapport aux autres types de machines.

Ces machines supraconductrices sont basées sur une conception similaire aux machines synchrones classiques à pôles saillants à flux radial. Le rotor est composé d'un enroulement d'excitation supraconducteur, tandis que l'induit du stator est formé d'une armature en cuivre classique. Dans cette catégorie, on peut distinguer deux types de réalisations, les alternateurs synchrones à pôles saillants et les moteurs synchrones à pôles saillants.

### **III.3.b. Alternateurs synchrones à pôles saillants**

Les vitesses de rotation généralement choisies pour ces générateurs se situent dans la plage 1500-3600 tr/min, pour des puissances supérieures au mégawatt. L'application recherchée et envisagée pour ces alternateurs synchrones de forte puissance est essentiellement la production d'énergie dans les systèmes embarqués.

Ces machines ont été conçues avec des inductions d'entrefer de l'ordre de 1,2 Tesla, ce qui est supérieur aux inductions dans les machines conventionnelles en cuivre (de l'ordre de 0,8 Tesla), et inférieur à celles adoptées sur les moteurs à pôles saillants HTc (de l'ordre de 2 Tesla). En effet, on recherche pour ces alternateurs un rendement élevé dans un premier temps, puis la compacité (puissance-volumique). Le rendement des différents générateurs déjà réalisés est légèrement supérieur à celui des générateurs conventionnels. Cependant, on constate un bon rendement sur une grande plage de puissance (même pour des petites puissances) et le facteur de puissance de la machine influe peu sur le rendement. Ces avantages sont un atout considérable pour des applications embarquées.

### **III.3.c Moteur synchrone à flux axial**

Les machines synchrones à flux axial consistent en une structure dite discal, où le stator et le rotor sont en vis-à-vis. Cette topologie permet d'envisager des machines à double rotor, on peut ainsi augmenter la puissance de la machine en disposant de deux

inducteurs et d'un induit central (ou inversement), sans doubler l'encombrement global.

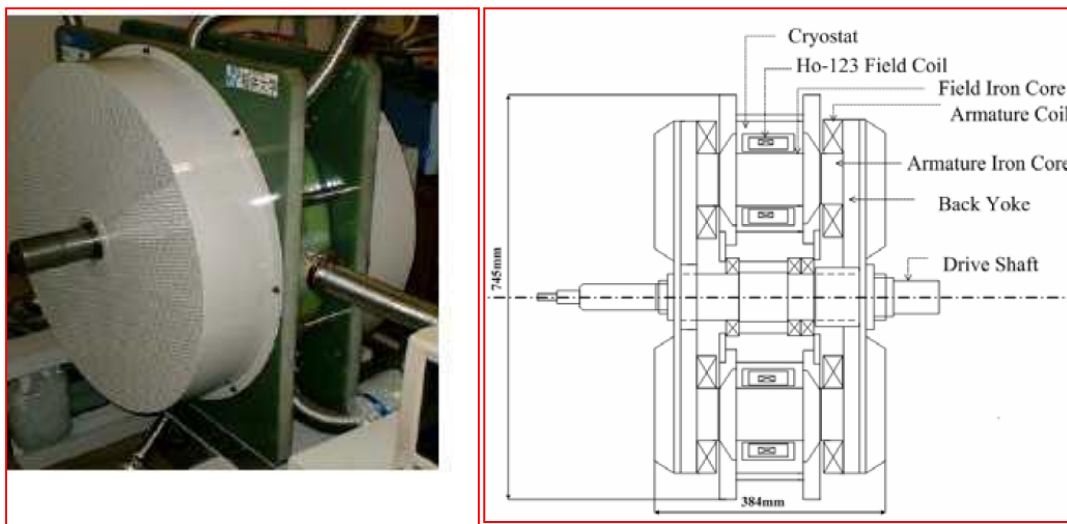
Plusieurs structures ont été proposées, on distingue deux catégories :

- Machines avec bobines supraconductrices,
- Machines avec des matériaux supraconducteurs passifs (bulks).

### III.3.C.1. Bobines supraconductrices :

Au Japon, IHI Corporation est porteur de plusieurs projets, de la machine à inducteur supraconducteur de 22kW refroidis à l'azote liquide par un cryocooler (**fig. III.4**), à la machine composée seulement d'enroulements supraconducteurs de 12.5kW (**Fig. III.5**).

Le moteur de 22kW comporte un inducteur supraconducteur fixe et un induit tournant, l'avantage est de disposer d'un système cryogénique simple. Le cryocooler, utilisé à une température de 77 K avec de l'azote liquide, fonctionne donc avec une puissance cryogénique importante. La structure détaillée (**Fig III.4**), montre un inducteur supraconducteur central, composé de 8 bobines à supraconducteur à haute température critique, le tout placé sur un axe fer en tôle laminé. Deux induits extérieurs tournants permettent de transmettre le couple.

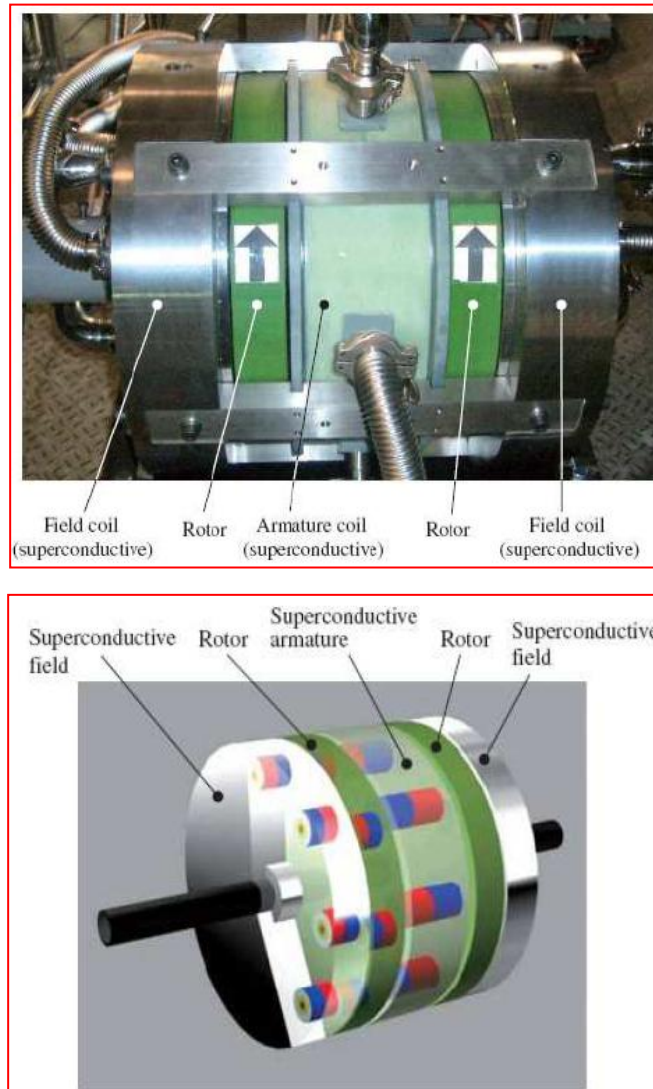


**Figure III.4.** Moteur synchrone à flux axial de 22kW par IHI [25]

Suite à ces travaux, une machine entièrement supraconductrice de 12.5kW a été réalisée . Refroidie à l'azote liquide par le centre de l'axe, elle se compose de deux inducteurs fixes extérieurs et d'un induit supraconducteur central également fixe (**Fig. III.5**), ainsi toutes les parties supraconductrices sont fixes. La transmission du couple



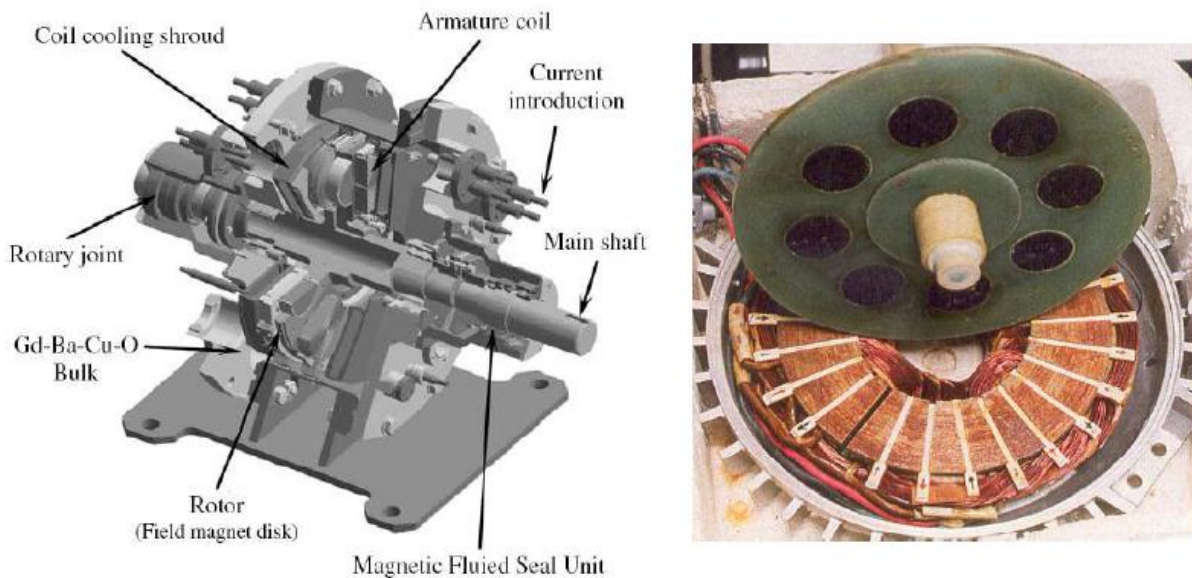
se fait par deux pièces polaires situées dans le double entrefer, qui se magnétisent et tournent par répulsion et attraction dues aux champs magnétiques axiaux créés et au champ magnétique tournant de l'induit. Ce moteur est envisagé pour la propulsion marine.



**Figure III.5.** Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5kW par IHI [26]

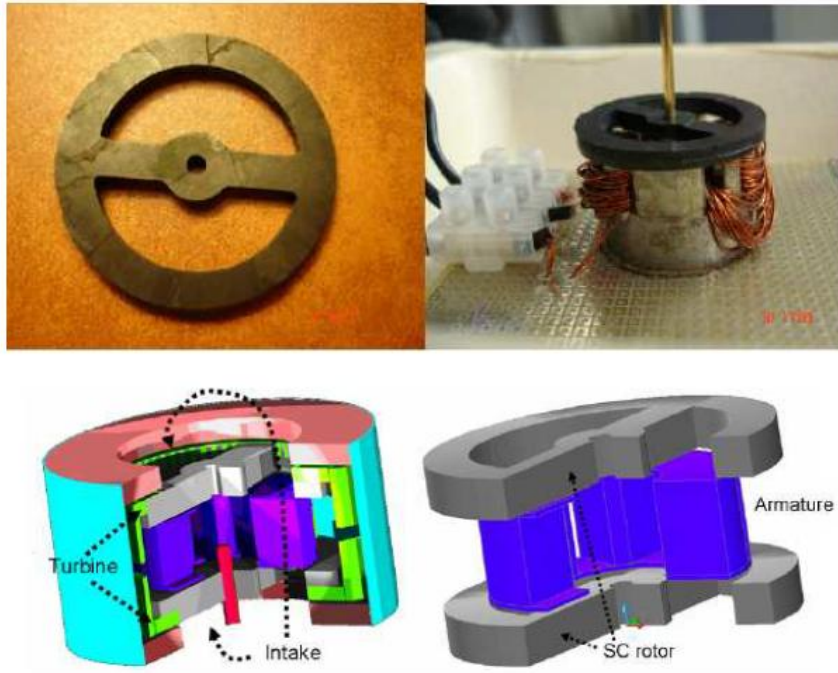
Deux prototypes originaux proposent des moteurs synchrones à flux axial, où la partie supraconductrice est un inducteur tournant composé de pastilles en YBCO. Ces deux machines de faible puissance sont refroidies à l'azote liquide et permettent dans un premier temps de vérifier le bon fonctionnement d'une structure axiale. Les *bulks* sont dans un premier temps magnétisés, grâce à l'armature. Une fois le flux piégé grâce aux bobinages statoriques, on obtient des aimants permanents » supraconducteurs et l'armature peut être utilisée dans le rôle d'induit pour le fonctionnement de machine

électrique. Des premiers résultats conduisent à un champ magnétique radial pouvant atteindre au maximum 1.04T à 77K, pour une application avec un rotor à 8 bulks . Des comparaisons sur des moteurs discaux de même dimension ont permis de faire apparaître un gain d'un rapport 3 sur la valeur du couple moteur entre un moteur à inducteur à aimants permanents et un inducteur à 8 pastilles d'YBCO refroidis dans un bain d'azote liquide. Ces deux machines sont présentées en (figureIII.6)



**Figure III.6.** Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs, IHI [27] (gauche) et DEE University of Lisbonne [28]

Des applications à faible puissance et haute vitesse de rotation ont été envisagées, en particulier une pompe pour transfert cryogénique à grande fiabilité (pompe immergée dans l'azote liquide), solution sans roulement, et un servomoteur fonctionnant avec des pastilles supraconductrices à flux piégé. Ces moteurs sont composés aux extrémités d'un double inducteur, deux pastilles supraconductrices en YBCO (fig. III.7), permettant une structure 2 pôles. Afin d'augmenter la puissance du moteur, il est envisagé d'assembler plusieurs rotors sur le même axe.



**Figure III.7.** Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs [29]

### III.3.d. Moteur synchrone à hystérésis

Les premières machines électriques à hystérésis « classiques » ont été réalisées avec des inducteurs en fer, réalisé à partir d'un anneau rotorique en fer 'dur', sans encoche rotorique ni bobines de champ, la conception est donc relativement simple. Le principe de fonctionnement utilise le cycle d'hystérésis. Ces moteurs sont des moteurs de petites puissances, généralement inférieures à 1.5 kW, de faibles performances : facteur de puissance et rapport couple sur volume faibles. L'intérêt de telle machine est de fournir des moteurs précis à couple constant du démarrage au fonctionnement nominal (vitesse de synchronisme). Les applications utilisant ce type de chaînes sont les enregistreurs sur rubans magnétiques, les disques durs et horloges, et des équipements de précisions.

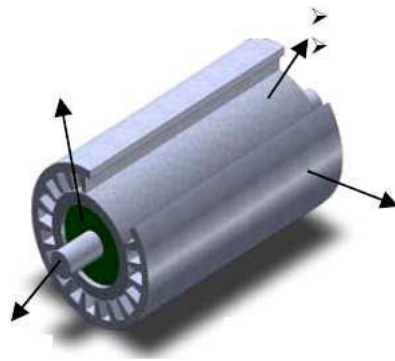
L'utilisation des supraconducteurs pour des machines à hystérésis a débuté avec l'apparition des supraconducteurs massifs à haute température critique, au début des années 90. Le champ magnétique alternatif créé par l'induit étant en interaction avec le rotor supraconducteur, ce qui engendre une variation de courant dans les grains et entre les grains de ce matériau.

### III.3.d.1 Le fonctionnement de ces machines :

Le stator cuivre crée un champ magnétique tournant radial dans l'entrefer, le cylindre supraconducteur est à l'intérieur de ce champ magnétique variable. Il est dans un état mixte, les vortex vont essayer de s'ancrer en un nouvel état d'équilibre. Les mouvements de ces vortex induisent des « supercourants » entre grains dans le supraconducteur massif, ce qui a pour effet de le magnétiser. L'interaction des deux champs magnétiques produit ainsi un couple moteur, il est proportionnel aux pertes par hystérésis dans le matériau supraconducteur. Le choix du matériau supraconducteur pour ce type de moteur est essentiel, puisque sensible à la pénétration du champ magnétique, ainsi les matériaux de type I, caractérisé par un comportement de type Meissner et qui expulsent le champ magnétique ne sont pas adaptés.

Ces premières réalisations ont été testées dans un cryostat à l'azote liquide, moteur complètement immergé. Les premières applications envisagées de ces machines électriques de petites puissances sont les pompes cryogéniques immergées.

Plus récemment, un moteur de 4kW a été réalisé à l'université Nova de Lisbonne, les simulations antérieures à la conception faisait apparaître un couple constant à partir de 15% de la vitesse et jusqu'au fonctionnement nominal (vitesse de synchronisme). Pour une géométrie identique, entre une machine à hystérésis à rotor en fer, et l'application à un rotor supraconducteur, il y a un rapport 4 sur la valeur du couple, on vérifie ainsi l'intérêt des supraconducteur à haute température critique, représentée (**figure III.8**). Le tube supraconducteur est composé de plusieurs segments d'YBCO dans un corps en fibre de verre reposant sur un arbre conçu en matériau paramagnétique.



**Figure III.8 :** Moteurs à hystérésis, rotor fer (CHM) ou supraconducteur (SHM) [30]

La contrainte principale de ce type de machine est de réaliser des rotors de grandes dimensions, la taille des supraconducteurs massifs (ici des tubes) n'étant pas encore importantes. Pour résoudre ces problèmes, une étude numérique à rotor constitué de plusieurs segments en supraconducteur a été réalisée, l'inconvénient étant des fuites magnétiques entre les différents « bulks » [30].

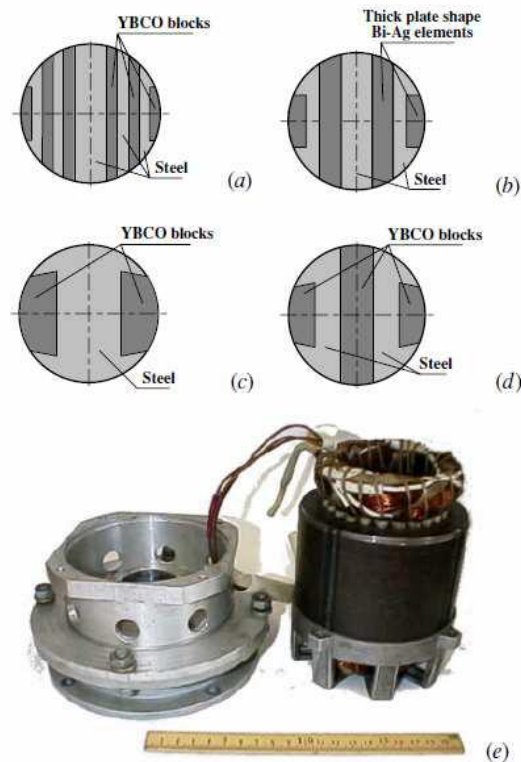
Ces réalisations de moteur supraconducteur à hystérésis peuvent également être envisagées avec un induit supraconducteur et un rotor en fer, inducteur de structure type des applications classiques, ou entièrement supraconducteur. Cependant, des améliorations sur les fils supraconducteurs en courant alternatif sont primordiaux afin d'appliquer un champ tournant.

### II.3.e. Moteur synchrone à réluctance

Au début des années 2000, et en parallèle des recherches sur les moteurs synchrones à hystérésis, des laboratoires russes ont débuté leur recherche sur les moteurs synchrones supraconducteurs à réluctance. Plusieurs prototypes de différentes conceptions de rotor à « bulks » en YBCO (**fig. III.9**) ont permis de réaliser des machines fournissant jusqu'à une dizaine de kilowatts et les perspectives sont vers des puissances de plusieurs centaines de kilowatts.

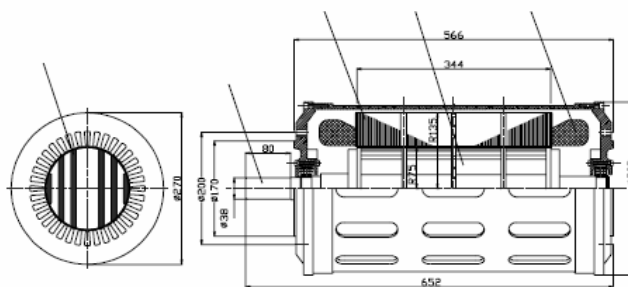
Suivant le principe des moteurs à réluctance synchrone, proposant des rotors massifs à dents, le rotor d'une machine synchrone supraconductrice à réluctance présente des couches alternées de fer et de supraconducteur massif « bulk » YBCO suivant le largueur de l'arbre (**fig. III.10**). On remplace donc les matériaux amagnétiques usuels utilisés par des parties massives supraconductrices. Ce qui permet d'augmenter les ratios entre la perméabilité magnétique suivant les axes longitudinaux et transverses de l'axe moteur et ainsi augmenter la puissance de la machine tournante. Ce qui se traduit par un découplage et une augmentation de la différence entre l'inductance directe et l'inductance transverse.

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



**Figure III.9.** Rotors supraconducteurs « Zèbre » (a) et (b), « Pilz » (c) et « Zelz » (d), moteur à réluctance [31]

Une conception de 150kW à 3000tr/min à l'azote liquide a été réalisée en 2002 dans les laboratoires d'Oswald, dans une collaboration Germanico-Russe, adoptant la topologie de rotor « Zèbre » présentée précédemment (**Fig. III.8**).



**Figure 3.10 :** Moteur à réluctance 150kW 3000tr/min [32]

Comme pour les moteurs présentés dans les paragraphes ci-dessus, la découverte du MgB<sub>2</sub> implique de nouvelle idée de conception pour des applications particulières. Ici encore l'application de pompe immergée dans le transport d'hydrogène liquide à 20K consitue un challenge intéressant. Les structures « Zèbres » sont encore adoptées, le passage de 77K à 20K permet de doubler la puissance de la machine.

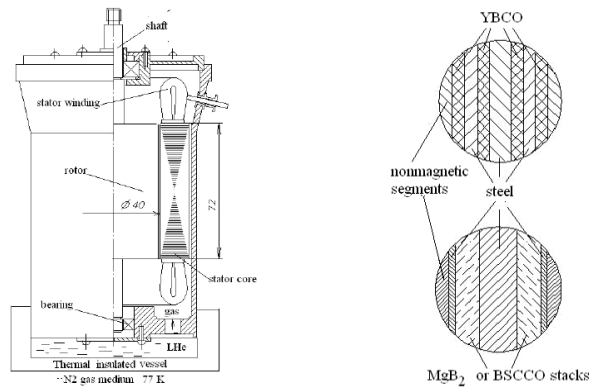


Figure III.11 : Pompe immergée pour le transport d'hydrogène liquide [33]

### III.3.f. Moteur synchrone à flux piégé

Les moteurs synchrones supraconducteurs à flux piégé utilisent des supraconducteurs massifs fonctionnant en aimants. Plusieurs structures de machines ont été envisagées : des machines à flux axial, à flux radial (vue précédemment), ou encore des machines à réductance variable. Ces topologies sont semblables à celles des machines synchrones à inducteur à aimants permanents.

Pour l'utilisation d'aimants supraconducteurs, un système de magnétisation des « bulks » doit être prévu dans le cryostat, la plupart des réalisations résultent du choix d'un processus dit « pulsed field », où un champ magnétique intense est appliqué grâce à des bobines supraconductrices en un temps relativement restreint.

Ces réalisations se trouvent en nombre relativement peu important, les connaissances dans le domaine des aimants supraconducteurs n'étant pas suffisant, essentiellement en termes de stabilité et de durée d'aimantation des supraconducteurs massifs. Cela explique les petites puissances (<4kW) des moteurs réalisés.

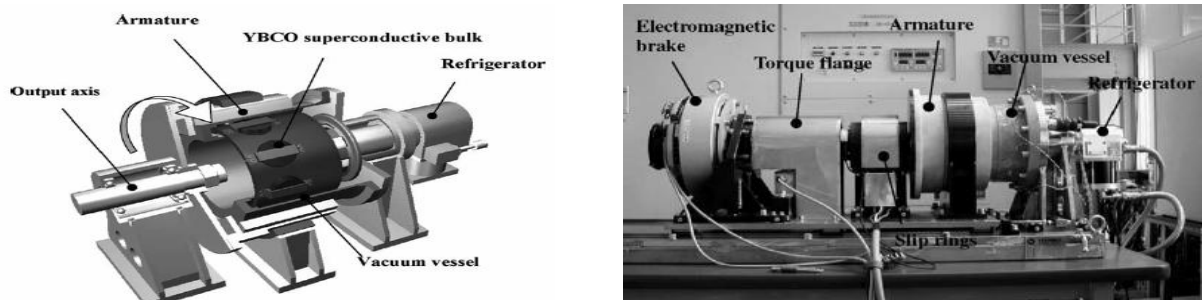
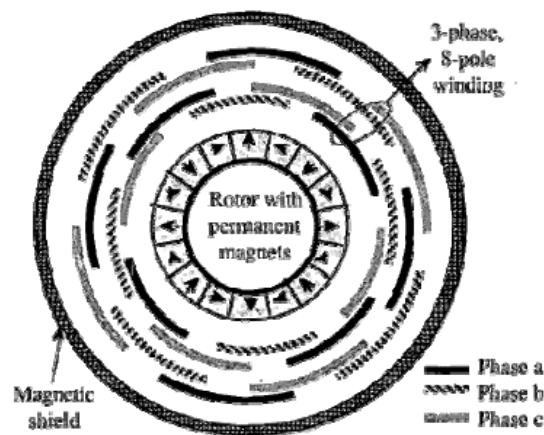


Figure III.13 : Moteur synchrone à flux piégé, maquette d'illustration et prototype réalisé [34]

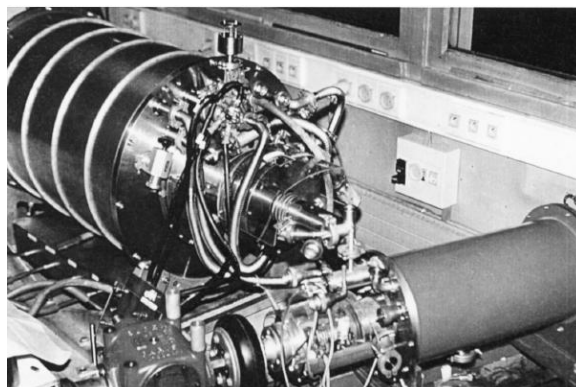
### III.3.g Moteur synchrone à aimants permanents

Les premiers moteurs synchrones supraconducteurs à aimants permanents ont été réalisés par le G2Elab (anciennement LEG) sous la direction de Pascal Tixador. Ces machines proposaient une structure à inducteur tournant composé d'aimant en Néodyme Fer Bore, et un induit fixe supraconducteur en Niobium Titane élaboré de bobines supraconductrices sur plusieurs diamètres (Fig III.14). L'induit ainsi façonné permet, grâce à une alimentation adéquate, de créer un champ magnétique tournant.

A la fin des années 90, deux réalisations ont été testées dans les locaux de l'institut Néel (CRTBT) à Grenoble, une première maquette de 15kW a apporté des résultats intéressants. Ainsi un second moteur a été conçu, avec des aimants permanents refroidis à 150K. Une puissance de 150kW a été atteinte avec cette machine en 1999.



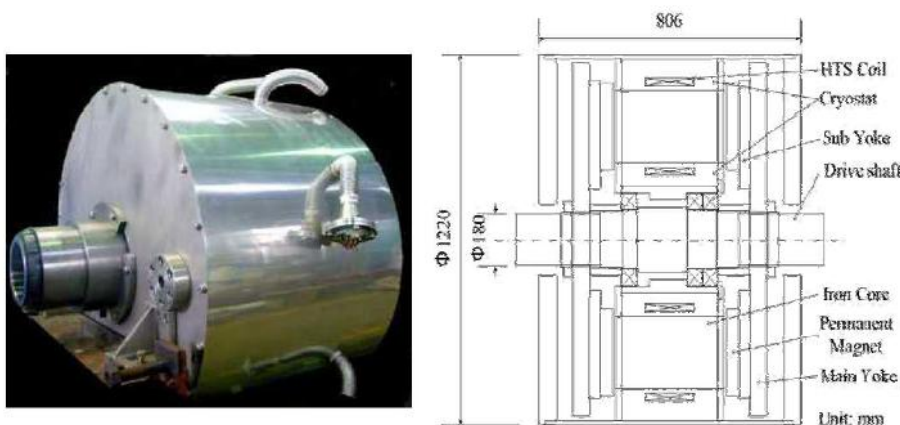
**Figure III.14 :** Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, principe [35]



**Figure 3.15 :** Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, 15kW 750tr/min et 150kW 400tr/min [36]



Les activités de recherches sur ce type de machines ont peu à peu été délaissées pour celles sur les moteurs à flux piégé, permettant d'envisager des puissances plus élevées, intéressantes dans le domaine de la propulsion marine. Cependant en 2008, un moteur synchrone à aimant permanent à flux axial de 400kW- 250tr/min a été réalisé et testé, proposant une solution supraconductrice fixe à l'azote liquide. Les bobines en BSCCO sont alimentées en basse fréquence, ce qui permet de créer le champ magnétique tournant tout en limitant les pertes en courant alternatif. Comme pour une structure classique, les bobines supraconductrices composant le stator sont insérées dans un corps ferromagnétique laminé, afin de réduire les courants de Foucault, de minimiser les pertes de flux magnétique et de maintenir les efforts appliqués sur les « pancakes ». Ce démonstrateur (**Fig III.16**) offre des résultats attrayants, avec notamment un couple volumique important de 14.8kN.m/m<sup>3</sup>. Les perspectives d'avenir s'orientent vers des applications pour la propulsion marine.



**Figure III.16** : Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents et flux axial, 400kW-250tr/min [37]

### II.3.3 Machine homopolaire

Le Naval Surface Wave Center a proposé un moteur synchrone supraconducteur homopolaire, réalisé dans un premier temps en NbTi en 1995, les bobines furent modifiées en 1997 avec du BSCCO. Une conception simple des bobines supraconductrices (solénoïdes), permet de créer deux champs magnétiques opposés élevés, ce qui s'ajoute de façon importante au champ magnétique radial générant le couple moteur (**Fig. III.17**).

Cette machine électrique a été réalisée dans un premier temps en NbTi à l'hélium liquide, avant d'être envisagée en fils HTS pour des gaz cryogéniques à différentes températures (4.2K, 28K). Les bobines en BSCCO reprenaient les mêmes

dimensions que le fil LTS, le moteur restant identique. La première configuration en NbTi à 4.2K permet d'atteindre une puissance de 125kW, alors que la seconde en BSCCO offre 91kW à 28K.

Cette machine a été développée pour des applications mettant en oeuvre des machines rapides comme les turbines, elle permet de travailler à haute vitesse, ici 11700tr/min. Afin de ne pas perturber l'environnement l'ensemble du moteur est confiné dans un tube en cuivre qui sert d'écran magnétique. De plus, afin d'avoir de bonnes connexions électriques, les contacts du stator sont alimentés en courant continu et transmis grâce à un contact fluide composé de potassium et de sodium.

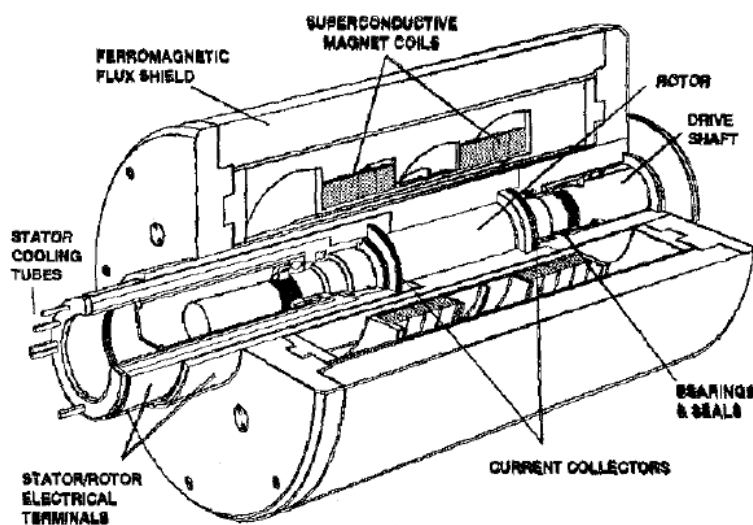


Figure III.17. Moteur synchrone supraconducteur homopolaire, 91-125kW-11700tr/min [38]

### III.3.4 Moteur Asynchrone

Plusieurs solutions de moteurs asynchrones à cage à supraconducteurs ont été envisagées, la structure imaginée proposant une cage d'écureuil HTS. Korea Electric Power Research Institute a conçu le premier rotor type de machine asynchrone supraconductrice, en assemblant deux couronnes d'un alliage aluminium cuivre par des barres en BSCCO, ils ont ainsi développé un moteur de 750W à 1710tr/min. Les moteurs asynchrones fonctionnant grâce aux pertes rotoriques, dues à sa résistance, au démarrage les barres supraconductrices transitent à l'état normal, ce qui crée un fort couple (grande variation de résistance du BSCCO). Une fois l'état supraconducteur recouvré, l'avantage principal de ce moteur est de permettre de fort courant induit dans les barres supraconductrices.

L'université de Fukui a également proposé un moteur asynchrone supraconducteur avec une cage entièrement supraconductrice. Deux structures ont été

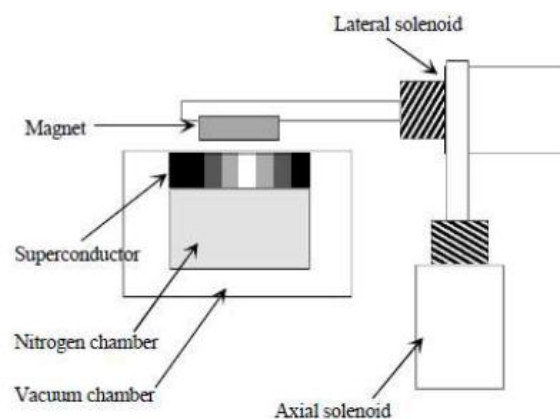
réalisées: une cage d'écureuil entièrement en BSCCO, puis un second rotor à barres massives en YBCO et deux solénoïdes en BSCCO dans le rôle des couronnes de court circuit (**Fig. III.19**). Ces deux prototypes sont utilisés dans un environnement entre 65K et 77K, à l'azote liquide et offre des caractéristiques respectives de 1.5kW-1720tr/min et 1.3kW-1800tr/min. Contrairement aux machines synchrones supraconductrices, ces moteurs ont un facteur de puissance relativement faible.



**Figure III.19.** Moteur asynchrone supraconducteur, 1.3kW-1800tr/min) [39].

### III.3.5 Moteur à courant continu

Une première étude a été menée par IRC Supraconductivity à Cambridge sur la possibilité de concevoir un moteur supraconducteur à courant continu, en utilisant des pastilles en YBCO comme des aimants permanents. Un banc d'essai (**Fig.III.19**) a été réalisé pour étudier l'interaction, dans un plan, entre des bobines supraconductrices et des supraconducteurs massifs ayant un flux piégé. Des résultats intéressants sur les efforts appliqués sur l'aimant supraconducteur ressortent de ces essais, avec un flux piégé de 0.5T sous 77K.

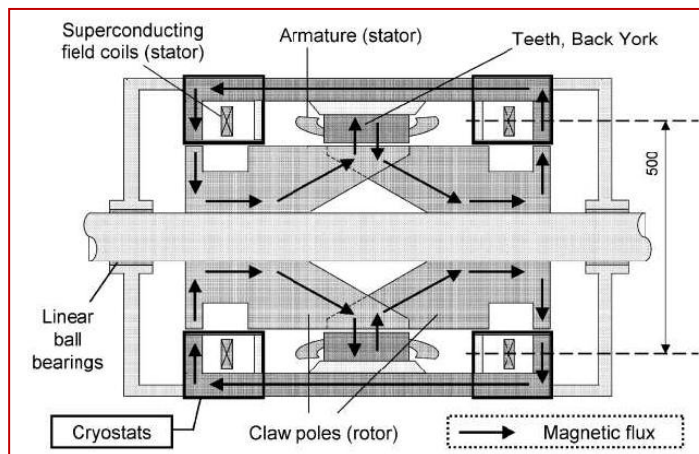


**Figure III.19 :** Tests RIG

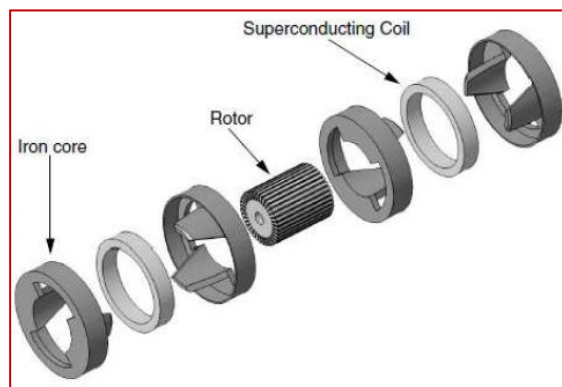
### III.3.6 .Machines spéciales

#### III.3.6.a. Moteur à griffe

Des machines synchrones a griffes ont été réalisées par Central Japan Railway Compagny et Sumitomo, ces structures reposent sur une topologie classique de machine à griffe avec des solénoïdes supraconducteur à l'inducteur. Cette structure permet d'avoir une machine supraconductrice simple, avec des pôles fortement magnétisés (saturés), ce qui promet des solutions séduisantes pour les fortes puissances.



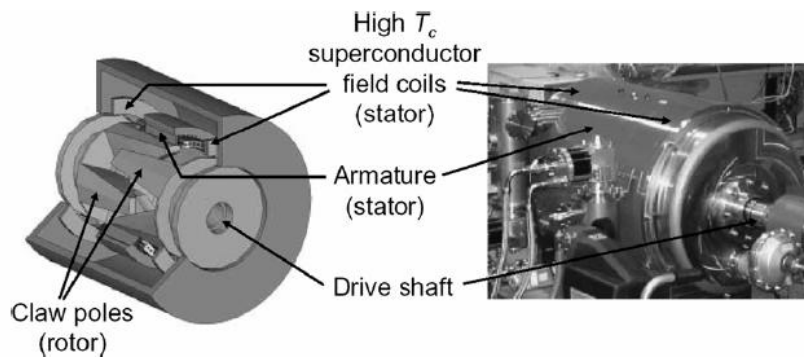
**Figure III.20 :** Coupe du moteur synchrone supraconducteur à griffe de Central Japan Railway Compagny [40]



**Figure III.20 :** Vue éclatée de l'inducteur à griffe, Sumitomo [41]

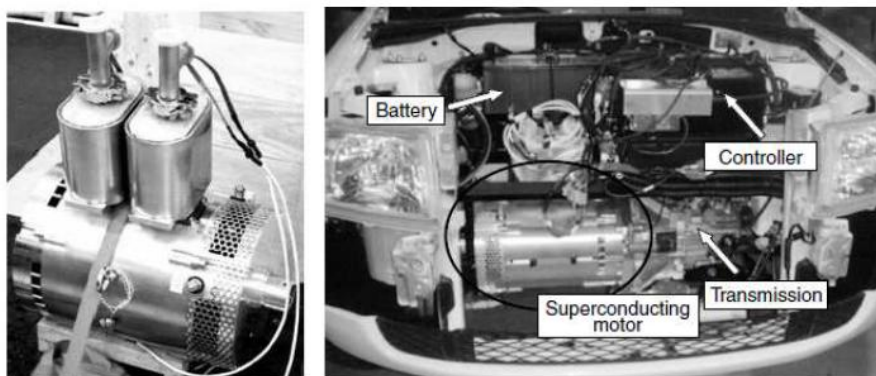
Le premier moteur à griffes, conçu dans un partenariat entre Central Japan Railway Compagny et Musashi Institute of Technology, est envisagé pour des applications en moteur

roue. Les solénoïdes sont réalisés avec du BSCCO utilisés à 40K. Il a été testé à une vitesse réduite de 300tr/min.



**Figure III.21** : Moteur supraconducteur griffe, 13.6kW-500tr/min, Central Japan Railway Company [41]

La machine griffe conçue par Sumitomo a été réalisée dans un projet de voiture électrique supraconductrice (**Fig. III.22**), un condensé de technologie proposant une belle vitrine aux moteurs supraconducteurs. Une utilisation des dernières générations de BSCCO (Di-BSCCO) refroidis à l'azote liquide a permis de dimensionner un moteur de 18kW à 4500tr/min. La voiture « supraconductrice » a roulé 36km à 30km/h (**Fig. III.23**).



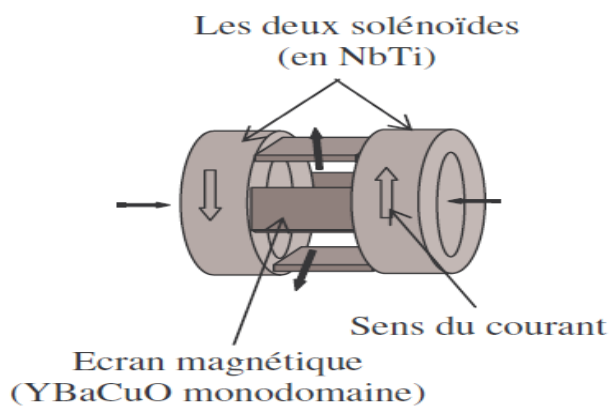
**Figure III.22** : Moteur supraconducteur griffe, 18kW-4500tr/min, Sumitomo [41]



**Figure III.23** : Voiture électrique supraconductrice [41]

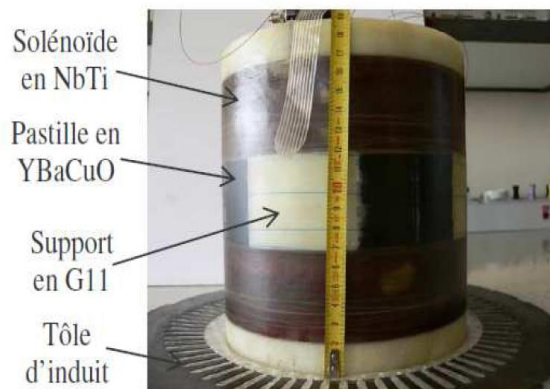
### III.3.7. Moteur à concentration de flux

Une machine supraconductrice de structure originale a été réalisée et testée à l'université de Nancy1. L'inducteur réalisé de structure à 8 pôles est basé sur la concentration du champ magnétique en utilisant des écrans supraconducteurs. En effet, ces supraconducteurs ont la capacité, d'expulser les lignes de champ de leur volume. Pour permettre une variation de champ magnétique grâce à une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction magnétique dans l'entrefer. Pour cela, la conception de l'inducteur permet d'utiliser deux champs magnétiques axiaux convergeant vers le centre du rotor, créés par des solénoïdes supraconducteurs, pour avoir un champ magnétique radial dans l'entrefer de la machine, grâce à des écrans supraconducteurs concentrant le flux entre ces plaques (**Fig.III.24**).



**Figure III.24** : moteur à concentration de flux

Cette disposition permet de générer une induction magnétique variable. Cette variation provient du fait que  $B$  est nul sur la surface extérieure de chaque écran supraconducteur et qu'il en est maximum entre 2 pastilles.



**Figure.III.25** Inducteur supraconducteur à concentration de flux magnétique

### **III.4.Conclusion**

Les progrès obtenus par les différents fabricants de fil HTc permettront dans le futur de renforcer et de faire émerger des moteurs industriels encore plus compacts et plus robustes, même si les matériaux utilisés restent encore chers. Une utilisation optimale de ces fils est souhaitable, les matériaux HTc sont intrinsèquement anisotropes, et leur sensibilité au champ magnétique dépend de la direction du champ magnétique par rapport à la surface du ruban HTc. Dans ce chapitre nous avons présenté les travaux accompli par les équipes de recherche universitaires et les équipes de développements industriels mondiales et le panel des réalisations très varié.

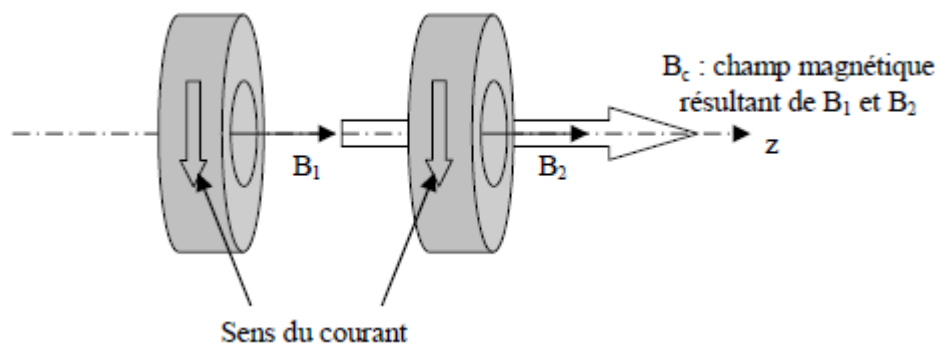
## IV .1 Introduction :

L'étude bibliographique, présentée au premier chapitre, montre que parmi les différentes topologies de machines supraconductrices, le moteur synchrone à inducteur supraconducteur HTc et à induit à air (bobinages statoriques dans l'entrefer) est bien adapté aux applications nécessitant des forts couples à basses vitesses. Cet usage spécifique est dû à ses performances en termes de compacité.

Une volonté de rupture technologique avec les inducteurs actuels a été un point déterminant pour le dimensionnement de ce modèle magnétique par le laboratoire du Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique (GREEN) de Nancy. Fort d'une expérience de trois moteurs supraconducteurs, de topologies différentes, et à l'origine de l'utilisation de matériaux massifs pour une application originale à concentration de flux, il propose ainsi une nouvelle structure de moteur supraconducteur dit à pan coupé, objet d'étude de ce chapitre. L'objectif principal est de proposer une topologie adaptée à l'utilisation à fort champ magnétique des supraconducteurs, comme à leur capacité. On entend de ce fait une augmentation du niveau d'induction magnétique présent dans l'entrefer. On envisage ainsi une variation de l'induction de l'ordre de 5T, en comparaison au 2T actuel ( $\pm 1T$ ).

## IV .2. Présentation de la structure de l'inducteur

On propose d'étudier une géométrie composée de deux solénoïdes supraconducteurs, d'axe identique et générant un champ magnétique de même direction. Ces deux solénoïdes, espacés d'une certaine distance, génèrent des champs magnétiques propres  $B_1$  et  $B_2$ , ainsi le champ magnétique résultant de cette association série est porté par l'axe commun les traversant en leurs centres (**Fig. IV.1**).



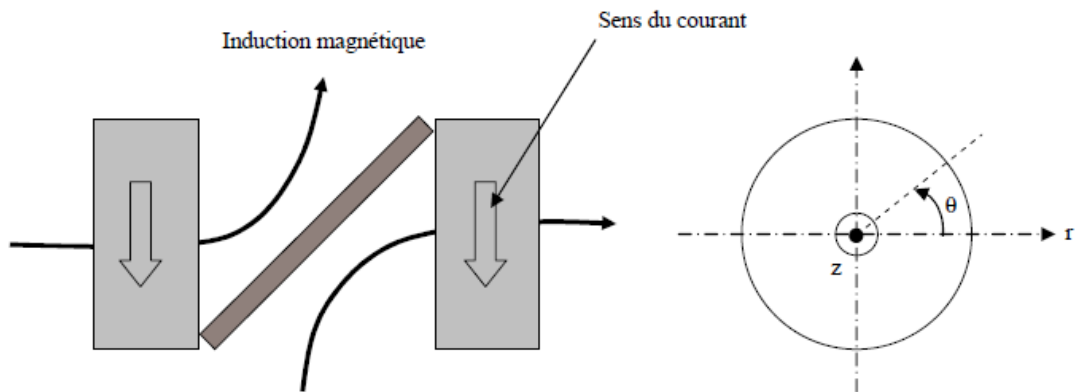
**Figure IV.1.** Champ magnétique créé par deux bobines de même axe et de flux de même direction

Pour obtenir une variation de flux nous devons donc ajouter entre ces bobines un dispositif ayant une influence sur le champ magnétique. Afin de réaliser une variation de



l'induction magnétique radiale selon la circonférence de l'inducteur, on dispose entre ces solénoïdes et incliné suivant la longueur de cet inducteur, un supraconducteur massif, ayant un rôle d'écran magnétique.

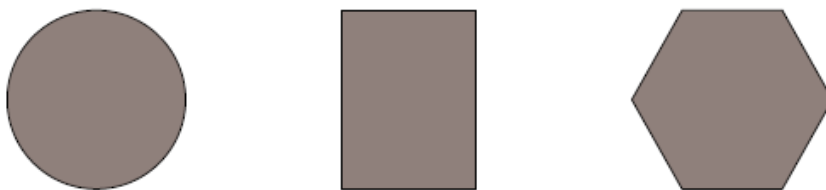
La géométrie ainsi obtenue permet d'obtenir une structure de machine 2 pôles (**Fig. IV.2**), fonctionnant sur le principe des machines synchrone à griffe.



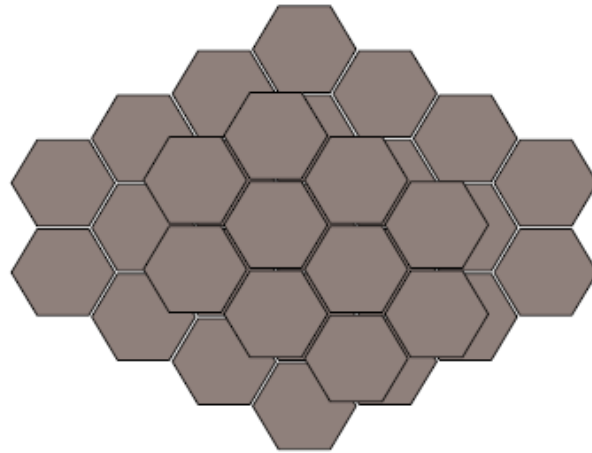
**Figure IV.2.** Structure de l'inducteur supraconducteur à pan coupé

En effet, lors de l'utilisation de plaques supraconductrices massives sous un champ magnétique, des courants surfacique sont créés dans le matériau et lui donne une caractéristique de barrière magnétique. Ainsi, les lignes de flux magnétique se boucleront au travers de la culasse statorique si l'entrefer a une épaisseur raisonnable devant la longueur d'induit. Ce principe ressemble à celui utilisé dans les machines électriques à griffes, ces griffes étant remplacées par un écran supraconducteur à pan coupé qui repousse le champ magnétique. Au regard de cette géométrie, on comprend aisément qu'il s'agisse d'une structure à 2 pôles

En ce qui concerne les pastilles supraconductrices, plusieurs formes sont actuellement disponibles, pour des dimensions maximales de 50mm en largeur comme en longueur, et de 5mm d'épaisseur (**Fig. IV.3**). La Dernière forme créée répond essentiellement au besoin d'assemblage pour réaliser des écrans magnétiques de grandes tailles. Pour cela, nous pouvons juxtaposer et superposer plusieurs éléments (**Fig. IV.4**).



**Figure IV.3.** Différentes formes de supraconducteurs massifs



**Figure IV.4.** Association de pastilles supraconductrices hexagonales sur 2 couches

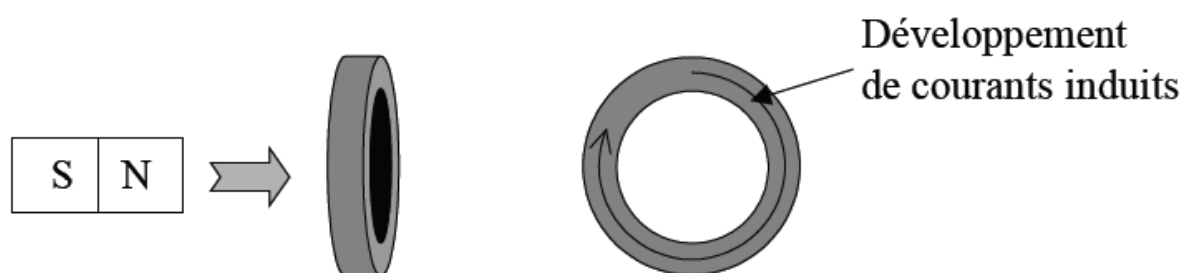
### IV.3 Effet du blindage des supraconducteurs

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.

#### IV.3.1 Principe

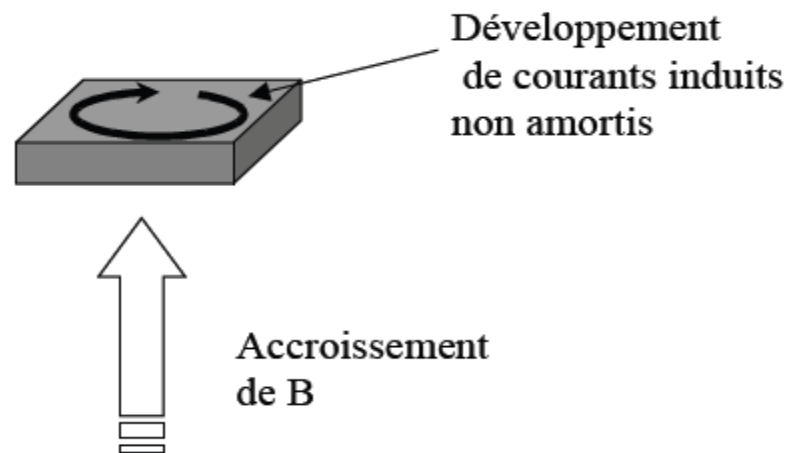
D'après la loi de Lenz, lorsqu'un circuit conducteur est soumis à une variation du flux magnétique à travers sa section, celui-ci développe des courants qui s'opposent à la variation de flux et donc au phénomène qui a créé la variation de flux. Par exemple, la **figure IV.5** présente un anneau conducteur 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 IV.5.** Illustration de la loi de Lenz.

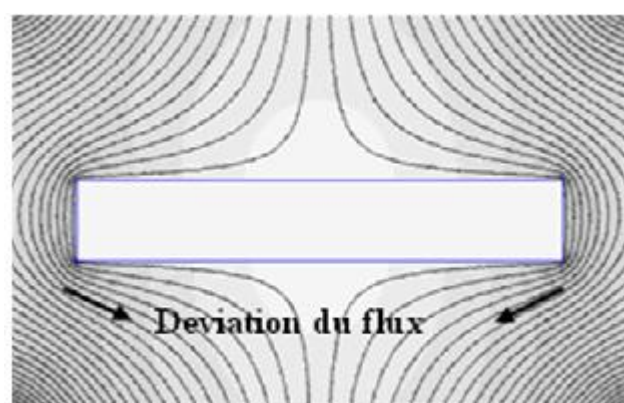
Un élément supraconducteur soumis à une variation de champ magnétique extérieur développe des courants qui s'opposent à la variation du flux magnétique dans le volume de l'élément. Ces courants, non amortis, maintiennent la valeur du flux constante.



**Figure IV.6.** Principe de blindage par supraconducteur massif.

Un supraconducteur ne peut pas voir de variation de flux dans son volume. **Figure IV.6** 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. Ce comportement peut être utilisé pour canaliser le flux. Un exemple est donné **Figure IV.7**



**Figure IV.7 :** Principe de l'écrantage magnétique

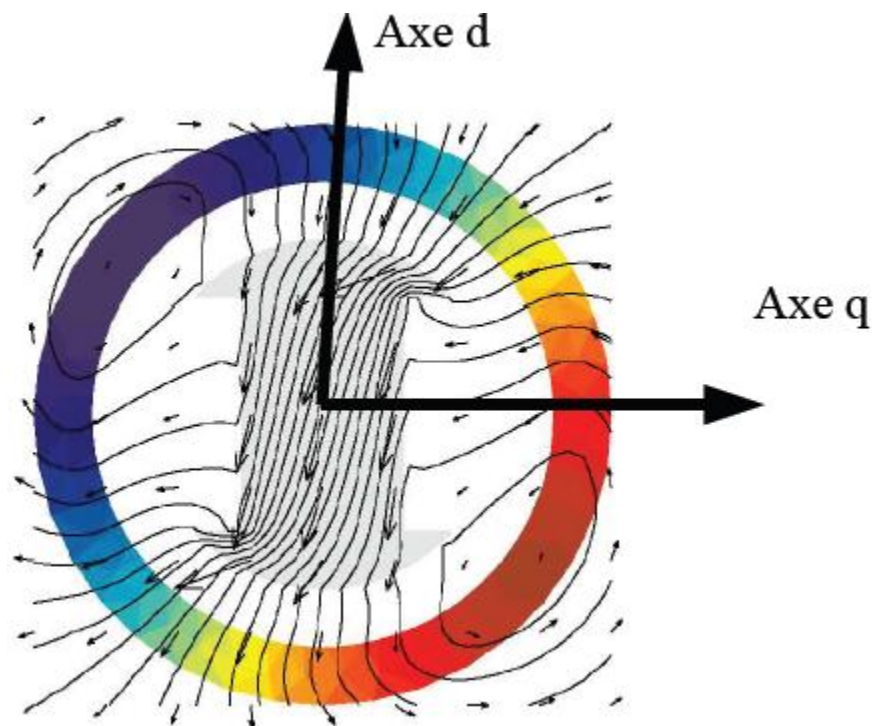
En effet, il n'est pas seulement intéressant de pouvoir utiliser les matériaux supraconducteurs pour générer de fort champ magnétique, encore faut pour l'utiliser au mieux

pour l'induction magnétique radiale, qui aura toute son importance dans la puissance électrique et le couple du moteur.

#### IV.4 Concentration du champ magnétique

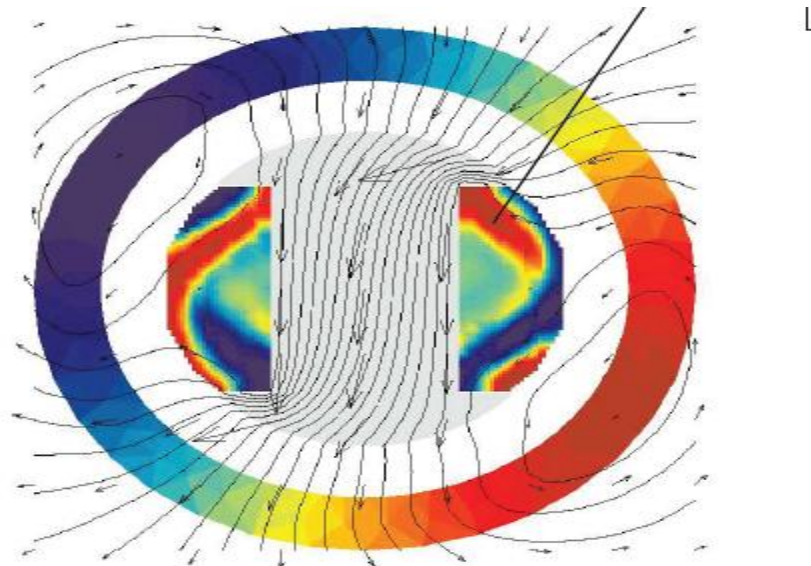
##### IV.4.1 Amélioration des machines à réluctance variable

Dans les machines synchro-réductantes, le rotor se place dans la direction favorisant une valeur de flux maximum. Le couple produit par ces moteurs est proportionnel à la différence des inductances d'axe d et d'axe q. Il est possible d'amplifier cette différence, donc le couple, en plaçant un matériau ferromagnétique dans un axe et un matériau diamagnétique dans l'autre axe. Cette amélioration permet un gain conséquent au niveau du couple électromagnétique. La figure suivante présente un rotor de machine synchro-réductante à deux pôles avec un induit sans fer [42].



**Figure IV.8 :** Lignes de champs dans un rotor de moteur synchro-réductante.

Nous pouvons voir l'existence de lignes de champs indésirables sur les parties où l'entrefer est le plus élevé. Ces lignes qui ne passent pas par le rotor ne créent pas de couple. Afin de pallier ce problème, des écrans supraconducteurs peuvent être insérés entre les pôles afin d'augmenter le nombre de lignes de champ créant du couple, le flux dans le matériau ferromagnétique augmente, comme le montre la figure suivante



**Figure IV.9:** Lignes de champs dans un rotor de moteur synchro-réducteur amélioré par deux écrans supraconducteurs [42].

Les machines supraconductrices ont fait l'objet de nombreux travaux de recherches à l'université de Nancy1 et à l'Institut National Polytechnique de Lorraine INPL. Une étude a été faite sur les cryoalternateurs à trois enroulements dans un premiers temps [REZ1979].

Quelques années plus tard, une machine supraconductrice de structure originale a été réalisée et testée [REZ1984]. Un inducteur de structure à 8 pôles a été conçu et réalisé dans le cadre d'une thèse soutenue par Philippe Masson en 2002 [42]. L'inducteur réalisé dans cette dernière étude est basé sur la concentration du champ magnétique en utilisant des écrans supraconducteurs. En effet, ces supraconducteurs ont la capacité, comme on l'a vu, d'expulser les lignes de champ de leur volume. Les résultats obtenus dans cette dernière étude ont été très satisfaisants, et ont montré la validité du principe utilisé pour réaliser un inducteur pour moteur supraconducteur. C'est ce même principe que nous utiliserons dans notre moteur.

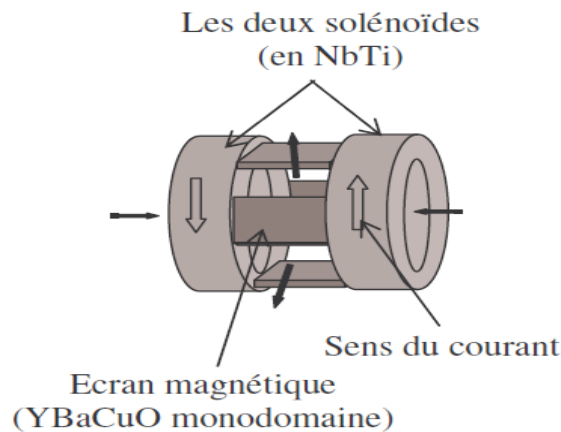
Dans ce paragraphe nous présentons le principe et le prototype de l'inducteur supraconducteur à concentration du flux.

L'inducteur est composé deux solénoïdes en NbTi et des écrans magnétiques en YBaCuO.

Les deux solénoïdes, identiques et de même axe sont parcourus par des courant opposés (**Figure IV.7**).

La conception de l'inducteur permet d'utiliser deux champs magnétiques axiaux convergeant vers le centre du rotor, créés par des solénoïdes supraconducteurs, pour avoir un champ

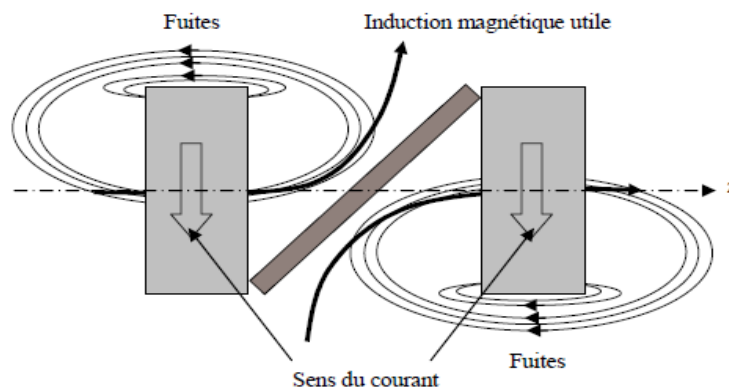
magnétique radial dans l'entrefer de la machine, grâce à des écrans supraconducteurs concentrant le flux entre ces plaques (**Fig. IV.10**). une maquette réduite d'inducteur basée sur le principe de concentration de flux magnétique a été réalisée, ce qui a permis de valider le principe de concentration de flux et d'aboutir trois ans après à un moteur supraconducteur de quelques kilowatts.



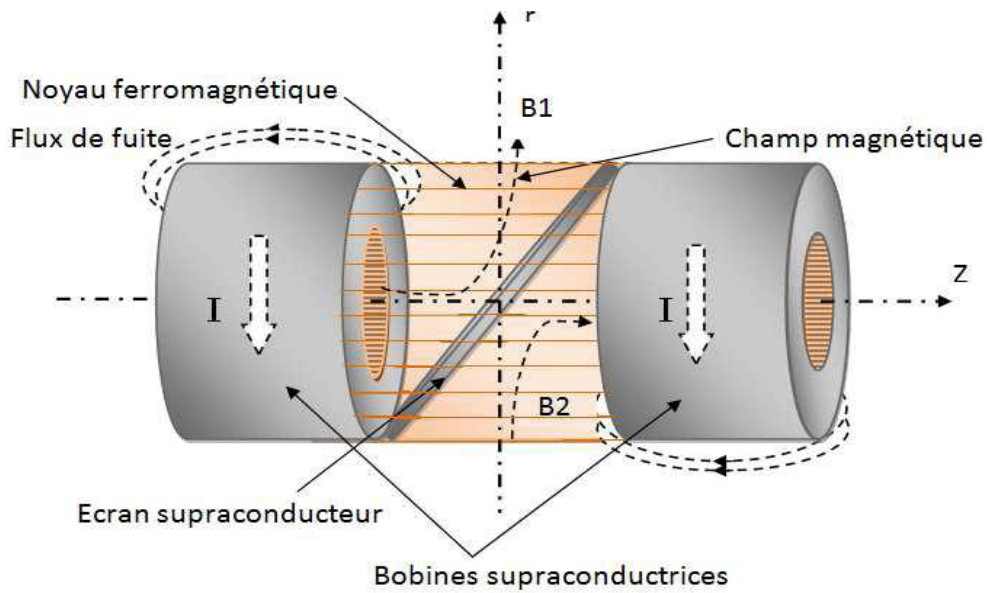
**Figure IV.10.** Structure de l'inducteur supraconducteur

#### IV.4.2 structure de l'inducteur à pan coupé

Dans ce travail, nous étudions une structure originale d'inducteur supraconducteur proposée par le laboratoire du Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique (GREEN) de Nancy. Cette structure d'inducteur entièrement supraconducteur a été proposée, une réflexion analogue à la conception de l'inducteur à concentration de flux. Seulement, dans cette topologie les solénoïdes créent des champs magnétiques de même direction et l'écran supraconducteur sert simplement à guider le flux. Nous constatons donc une forte concentration de fuites magnétiques autour des bobines, diminuant l'impact de l'induction radiale utile (**Fig. IV.11**).



**Figure IV.11.** Principe de la structure de l'inducteur à pan coupé.



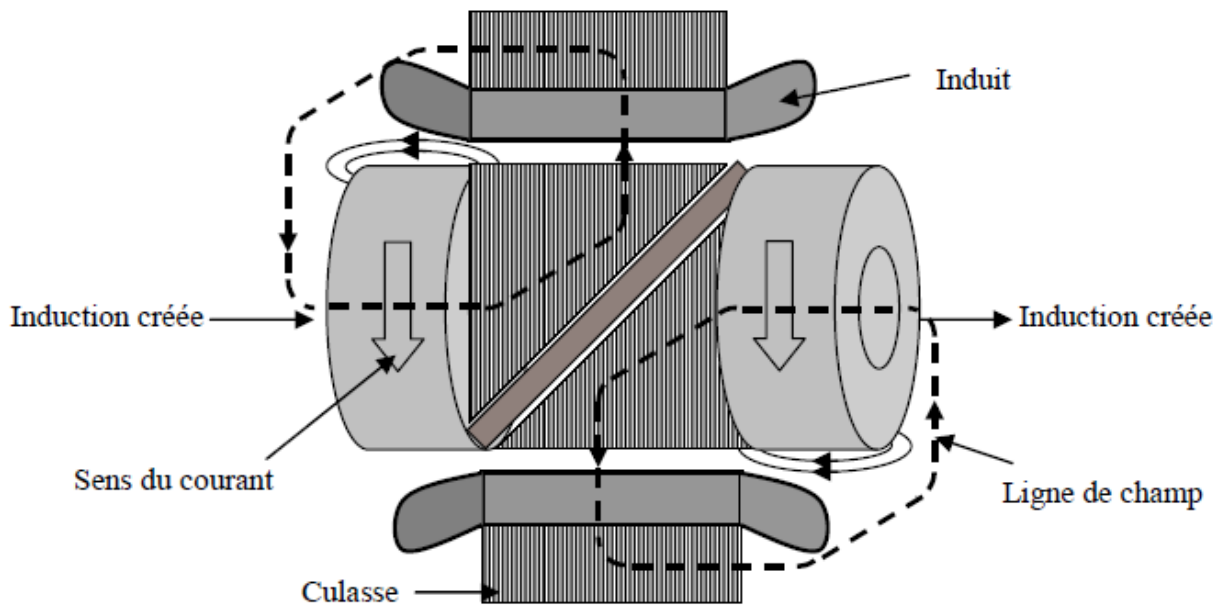
**Figure IV.12:** Structure de l'inducteur

L'inducteur utilise une topologie formée de deux bobines de champ supraconductrice et d'un supraconducteur massif qui joue le rôle d'écran magnétique conduisant à une densité de flux dans l'entrefer élevée. Une analyse du champ magnétique, est faite (en utilisant un logiciel FEMM) pour étudier les performances de l'inducteur proposé.

L'étude de cette structure restera assez générale et on se concentrera sur l'étude des lignes de flux magnétique, une première optimisation des dimensions, pour aboutir finalement à une puissance électrique envisageable avec cet inducteur et un induit cuivre classique.

Afin d'améliorer la distribution de l'induction radiale, on utilise aussi un matériau ferromagnétique entre les deux bobines. Le supraconducteur est inséré entre les pièces ferromagnétiques comme représenté sur la **figure IV.12**. Le fer guidera le champ magnétique vers le centre de l'inducteur et donc réduira le champ de fuite à proximité des bobines.

La structure d'inducteur proposée est en mesure de fournir une machine à deux pôles **figure IV.13** et peut être assimilée aux machines synchrones à griffes. Cette machine dispose d'un couple électromagnétique élevée en raison de l'augmentation de la densité de flux dans l'entrefer.



**Figure IV.13.** Moteur supraconducteur à pan coupé

### IV.4.3 Analyse de la topologie proposée

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

Les paramètres géométriques de la structure proposée sont donnés dans le tableau 4.1. Ces paramètres sont illustrés dans la figure 4.14, ils représentent une solution réaliste. C'est pourquoi la modélisation des bobines supraconductrices sera définie avec une densité de courant de 100 A/mm<sup>2</sup>, ce qui est cohérent avec les fils supraconducteurs à haute température critique.

Rayon extérieur	Rex (m)	0.25
Rayon intérieur	Ri (m)	0.15
Distance entre les solénoïdes	C (m)	0.15
Longueur du solénoïde	L (m)	0.15
Epaisseur de l'écran supraconducteur	E (m)	0.01
Densité de courant	J (A/mm <sup>2</sup> )	100

**Tableau IV.1.** Paramètres géométriques



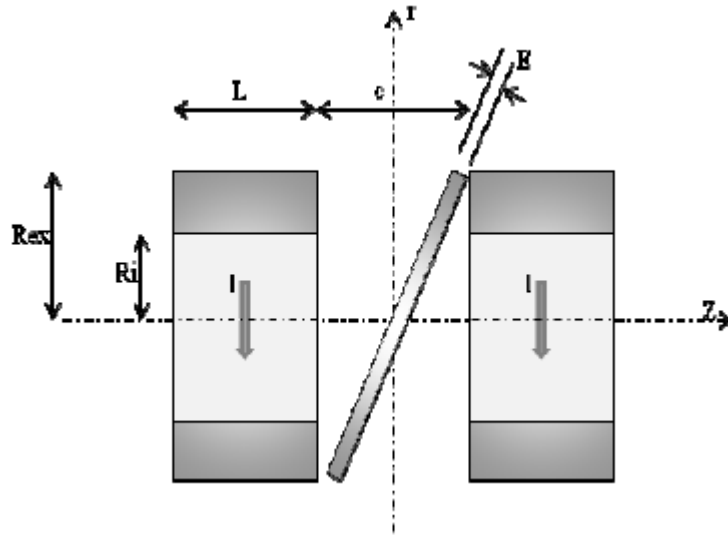


Figure IV.14: Paramètres de l'inducteur

### IV.5.1 Définition de FEMM

FEMM (Finite Element Method magnetics) est une suite de programme pour résoudre les problèmes magnéto-statiques et des faibles fréquences en deux dimensions (2D), planaires et axisymétriques. FEMM est divisé en trois parties :

- Preprocessor (femm.exe) : C'est un programme de CAO pour la définition de la géométrie du problème à résoudre, et définissant les propriétés des matériaux et les conditions aux limites.
- Solver (fkern.exe) : Le solver prend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans le domaine de résolution.
- Postprocesseur (femmview.exe) : C'est un programme graphique qui affiche les résultats sous forme de champs, de contour et densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, et d'évaluer plusieurs différentes intégrales et tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur.

Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux-ci sont :

- Triangle.exe : Triangle découpe la région en un grand nombre de triangle, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.
- Femmplot.exe : Ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D.

## IV.5.2. Analyse d'un problème :

### IV.5.2.1. Définition du type de problème traité :

Il faut d'abord choisir le type de problème traité parmi ceux proposés par le programme, en précisant si la représentation 2D correspond à la simplification d'un problème infiniment long (problème PLANAR) ou axisymétrique (problème AXISYMMETRIC). Sélectionner le mode problème « problème » de la bar d'outils.

### IV.5.2.2. Entrée de la géométrie :

Le pré processeur (femm.exe) est utilisé pour dessiner la géométrie des problèmes, définition des matériels, et les conditions aux limites.

### IV.5.2.3. Maillage :

le module (triangle.exe) permet le maillage de la géométrie qui consiste à découper le domaine en triangles sur lesquels le potentiel  $A$  sera approximé. Sélectionner le menu « Finite Element Mesh » de la bar d'outils.

### IV.5.2.4. Résolution :

Le module Solver (fkern.exe) calcul le potentiel  $A_z$  sur les éléments finis du problème. La durée de résolution varie en fonction de la taille et de la complexité problème. Sélectionner le menu « Finite Element Solver » de la bar d'outils.

### IV.5.2.5. Exploitation des résultats :

Le module (femmview.exe) permet à l'utilisateur d'extraire la solution  $A(x,y)$ , les données intéressantes et réellement utiles.

## IV.6 Résultats

Dans cette partie, nous présenterons d'abord une étude simple de cette géométrie, comprenant seulement les bobines supraconductrices et l'écran supraconducteur. Cela permettra d'obtenir de premiers résultats sur l'induction magnétique radiale, caractérisant la grandeur la plus importante.

Les valeurs de la composante de l'induction magnétique  $B_r(Z)$  sont prises à 2 cm (pour tenir compte de la partie cryogénique) de l'inducteur le long de la distance  $C$  entre les deux bobines. Les points de calculs sont présentés sur la **Figure (IV.15)**. La composante radiale  $B_r(\theta)$  est calculée également à 2 cm de l'inducteur sur le diamètre d'alésage de l'induit de distance pour plusieurs valeurs de  $Z$  entre les deux bobines.

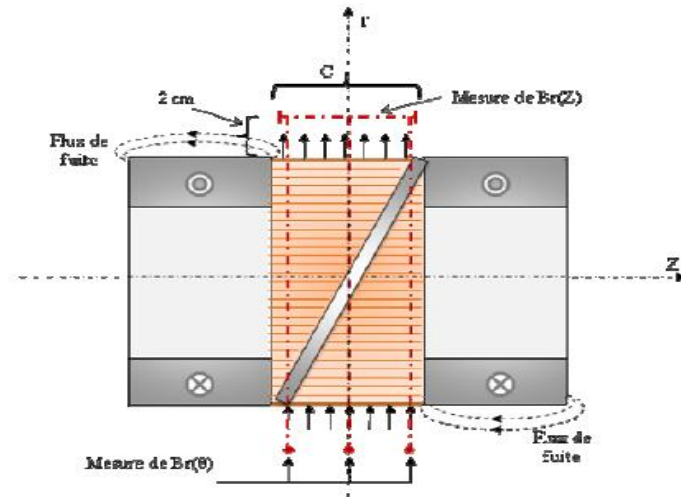


Figure IV.15 Points de calcul de l'induction

#### IV.6.1 Cas de deux bobines supraconductrices sans écran

Dans un premier temps on se propose d'étudier une géométrie composée de deux solénoïdes supraconducteurs, d'axe identique et générant un champ magnétique de même direction sans la présence de la pastille écran magnétiques. Ces deux solénoïdes, espacés d'une certaine distance, génèrent des champs magnétiques propres  $B_1$  et  $B_2$ , ainsi le champ magnétique résultant de cette association série est porté par l'axe commun les traversant en leurs centres (**Fig. IV.1**).

Les deux solénoïdes, identiques et de même axe sont parcourus par des courant de même sens (**Fig.IV.1**). La figure 4.16 montre Lignes du champ produites par les deux solénoïdes, on remarque bien la continuité de ces lignes. En valeur La figure 4.17 présente la composante transversale du champ magnétique avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et c) à  $Z= - 7$  cm.

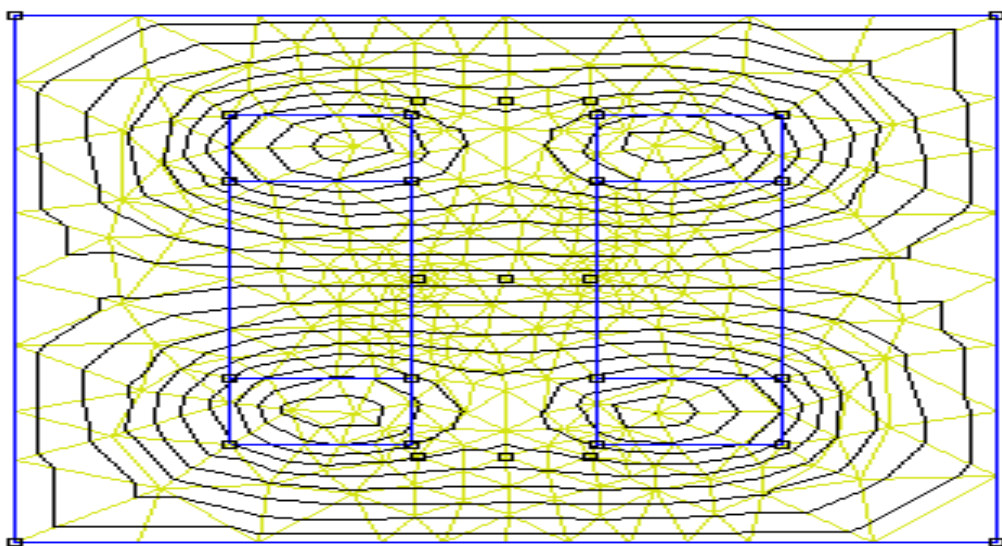
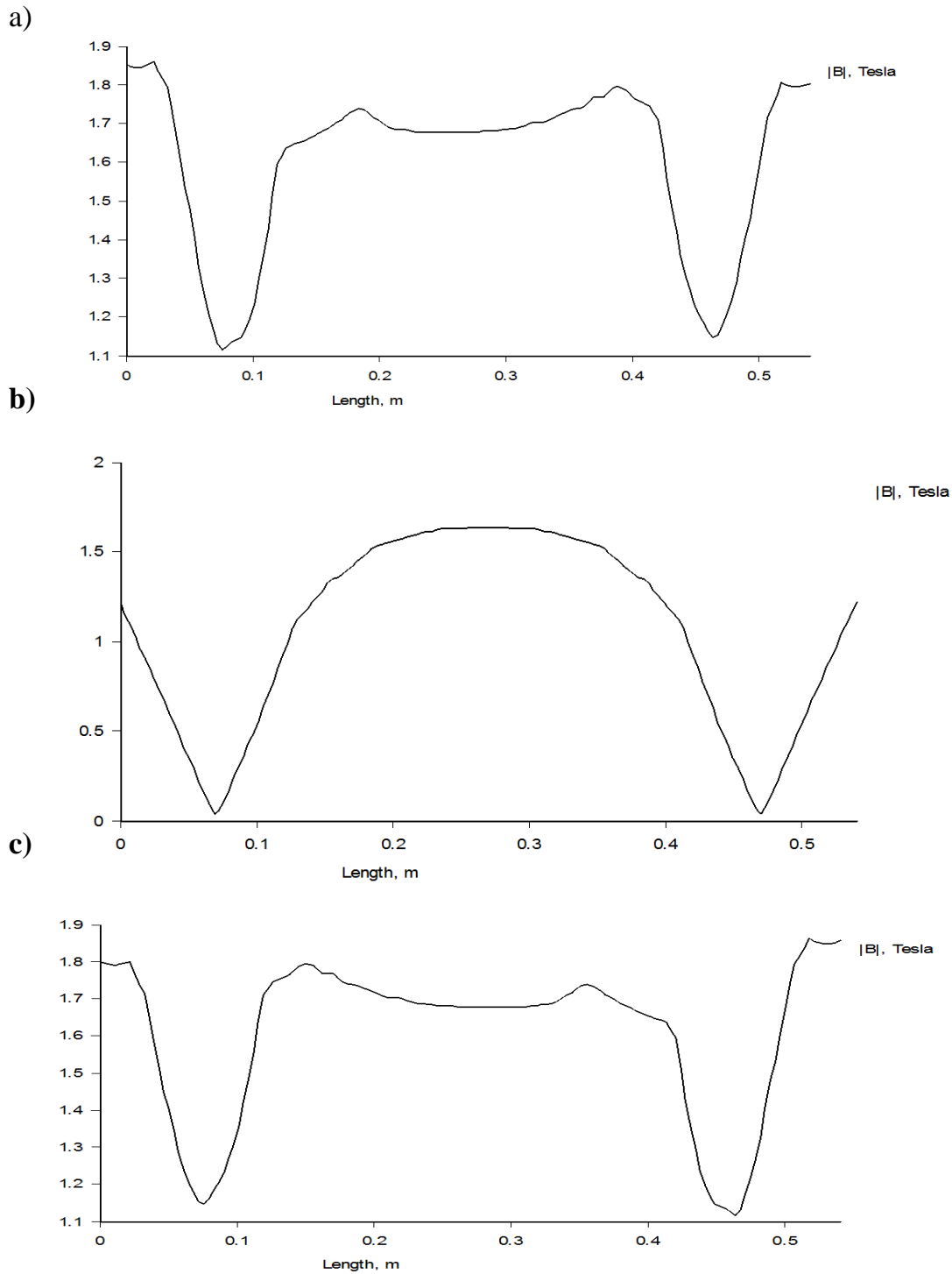


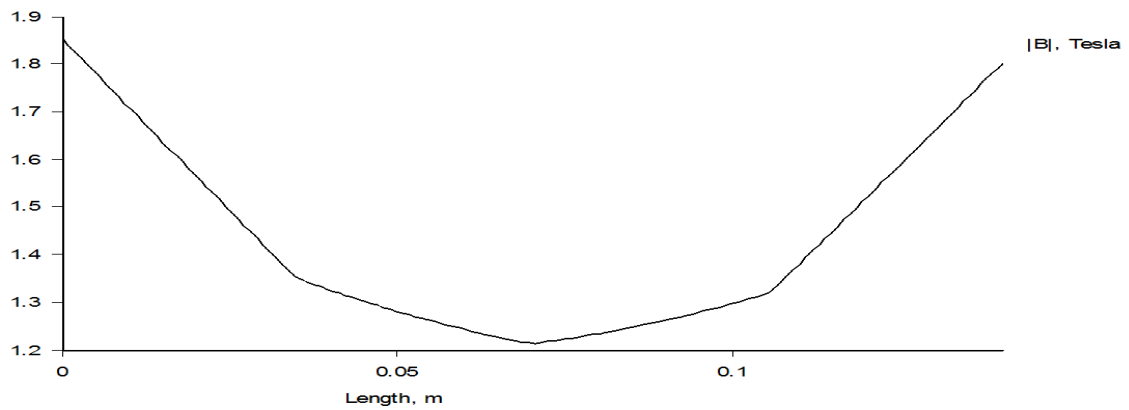
Figure 4.16 Lignes du champ produites par deux solénoïdes.



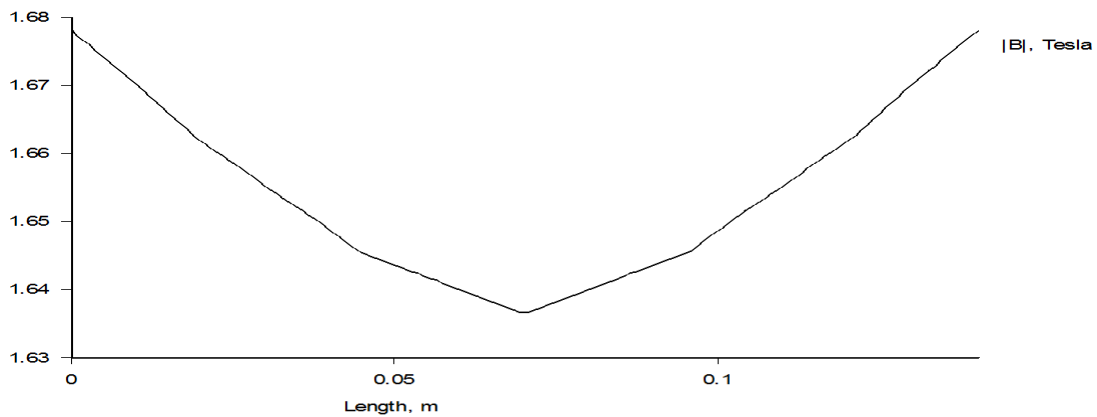
**Figure IV.17:** Composante transversale de l'induction magnétique à 2cm du rayon d'alésage de deux solénoïdes supraconducteurs avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z=+7$  cm et (c) à  $Z=-7$  cm

La **Figure 4.18** présente la composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec (a) à  $Z=+7$  cm, (b) à  $Z=0$  cm et (c) à  $Z=-7$  cm.

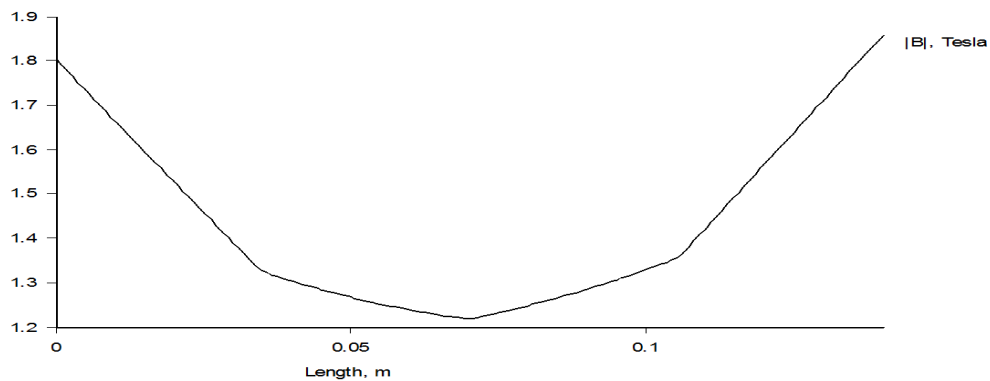
a)



b)



c)



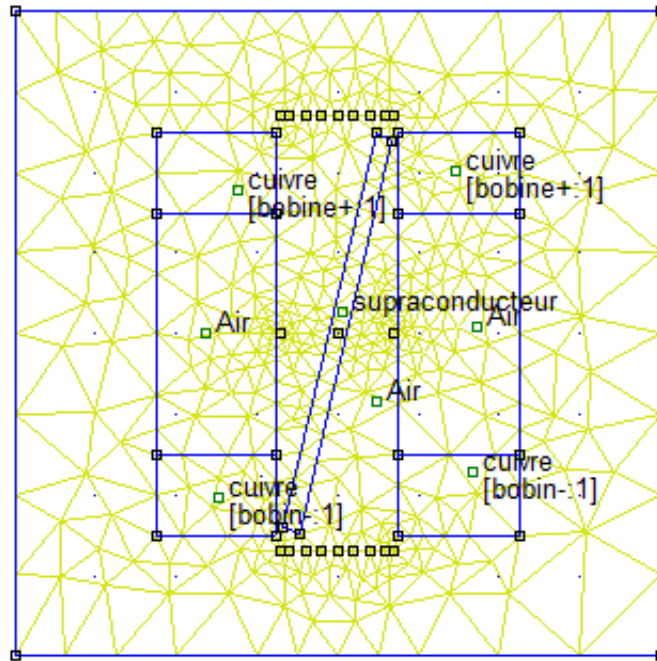
**Figure IV.18** La composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec (a) à  $Z = +7$  cm, (b) à  $Z = 0$  cm et c) à  $Z = -7$  cm.

## VI.6.2 Cas de deux bobines supraconductrices avec écran

Afin de réaliser une variation de l'induction magnétique radiale selon la circonférence de l'inducteur, magnétique radiale selon la circonférence de l'inducteur, un dispositif ayant une

influence sur le champ magnétique est inséré entre ces bobines. C'est un supraconducteur massif, ayant un rôle d'écran magnétique est dispose entre ces solénoïdes et incliné suivant la longueur de cet inducteur,

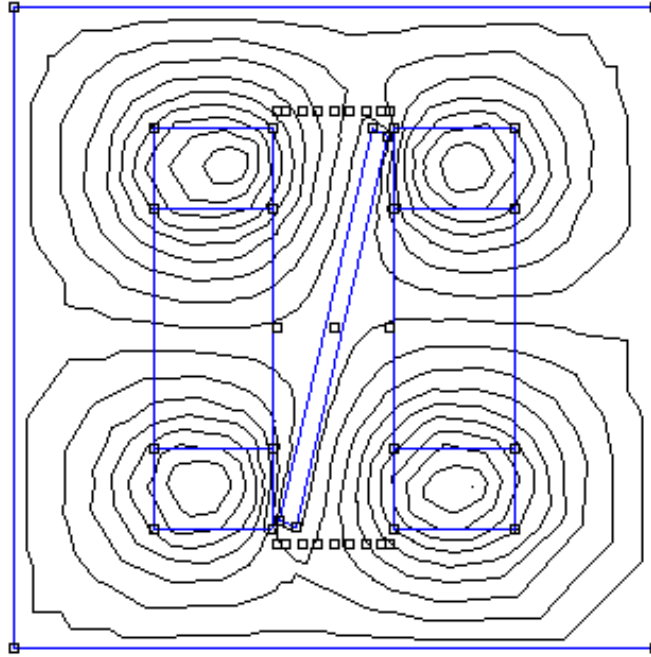
La géométrie ainsi obtenue permet d'obtenir une structure de machine 2 pôles (**Fig. IV.19**), fonctionnant sur le principe des machines synchrone à griffe.



**Figure IV.19** Structure avec l'écran supraconducteur

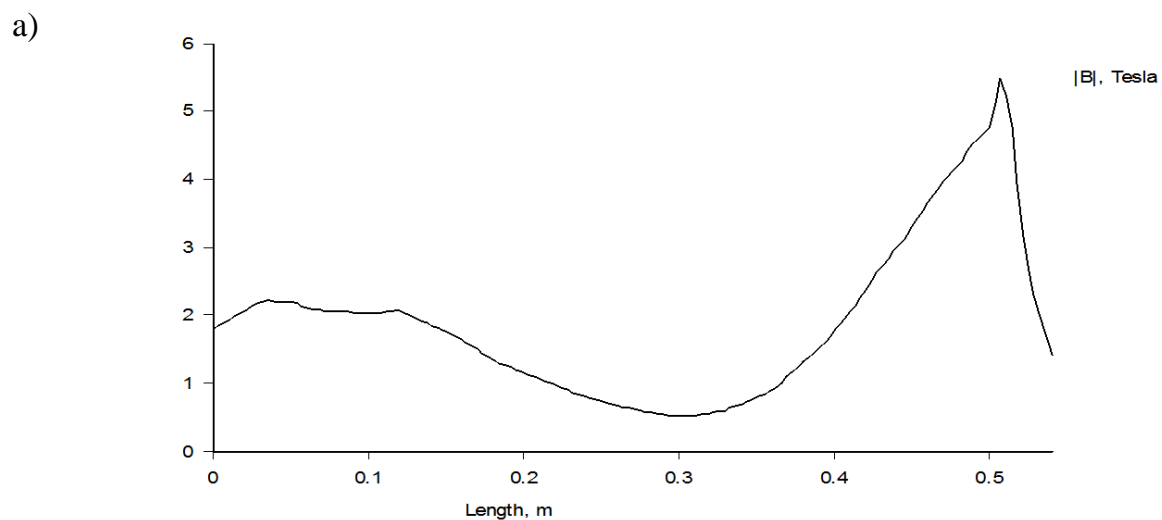
En effet, lors de l'utilisation de plaques supraconductrices massives sous un champ magnétique, des courants surfacique sont créés dans le matériau et lui donne une caractéristique de barrière magnétique. Ainsi, les lignes de flux magnétique se boucleront au travers de la culasse statorique si l'entrefer a une épaisseur raisonnable devant la longueur d'induit. Ce principe ressemble à celui utilisé dans les machines électriques à griffes, ces griffes étant remplacées par un écran supraconducteur à pan coupé qui repousse le champ magnétique. Au regard de cette géométrie, on comprend aisément qu'il s'agisse d'une structure à 2 pôles **Figure IV.14**.

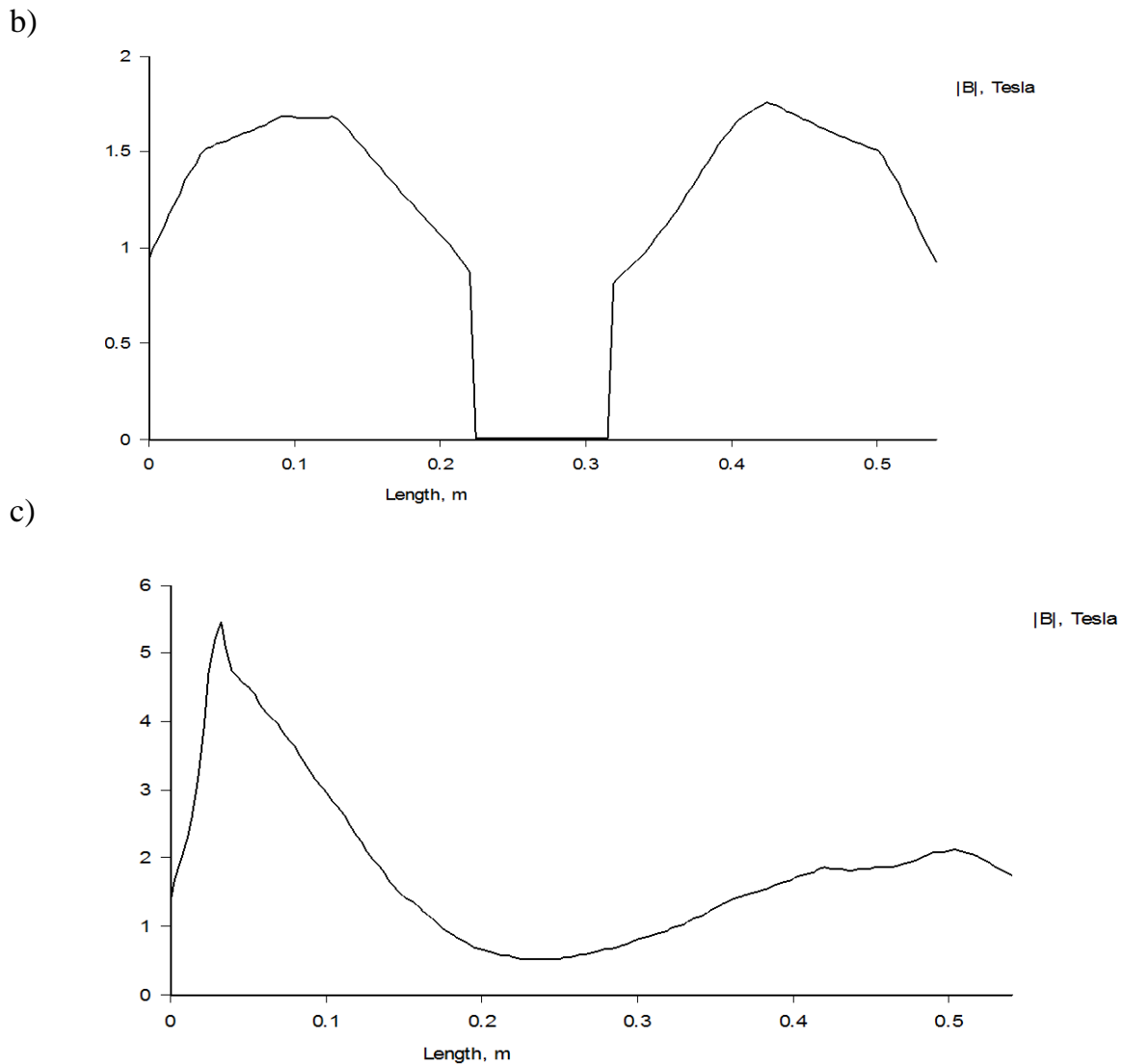
La **figure IV.20** montre Lignes du champ produites par les deux solénoïdes en présence de l'écran supraconducteur. La figure montre bien l'effet du blindage et la déviation des lignes de champs, créant ainsi deux pôles.



**Figure IV.20** Lignes du champ produites par deux solénoïdes en présence de l'écran magnétique.

La **Figure IV.21** présente la composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec (a) à  $Z=+7$  cm, (b) à  $Z=0$  cm et c) à  $Z=-7$  cm. Ces résultats montrent la validité du concept proposé. En effet, une répartition variable de l'induction a été obtenue. D'un point de vue quantitatif, les performances sont très prometteuses.

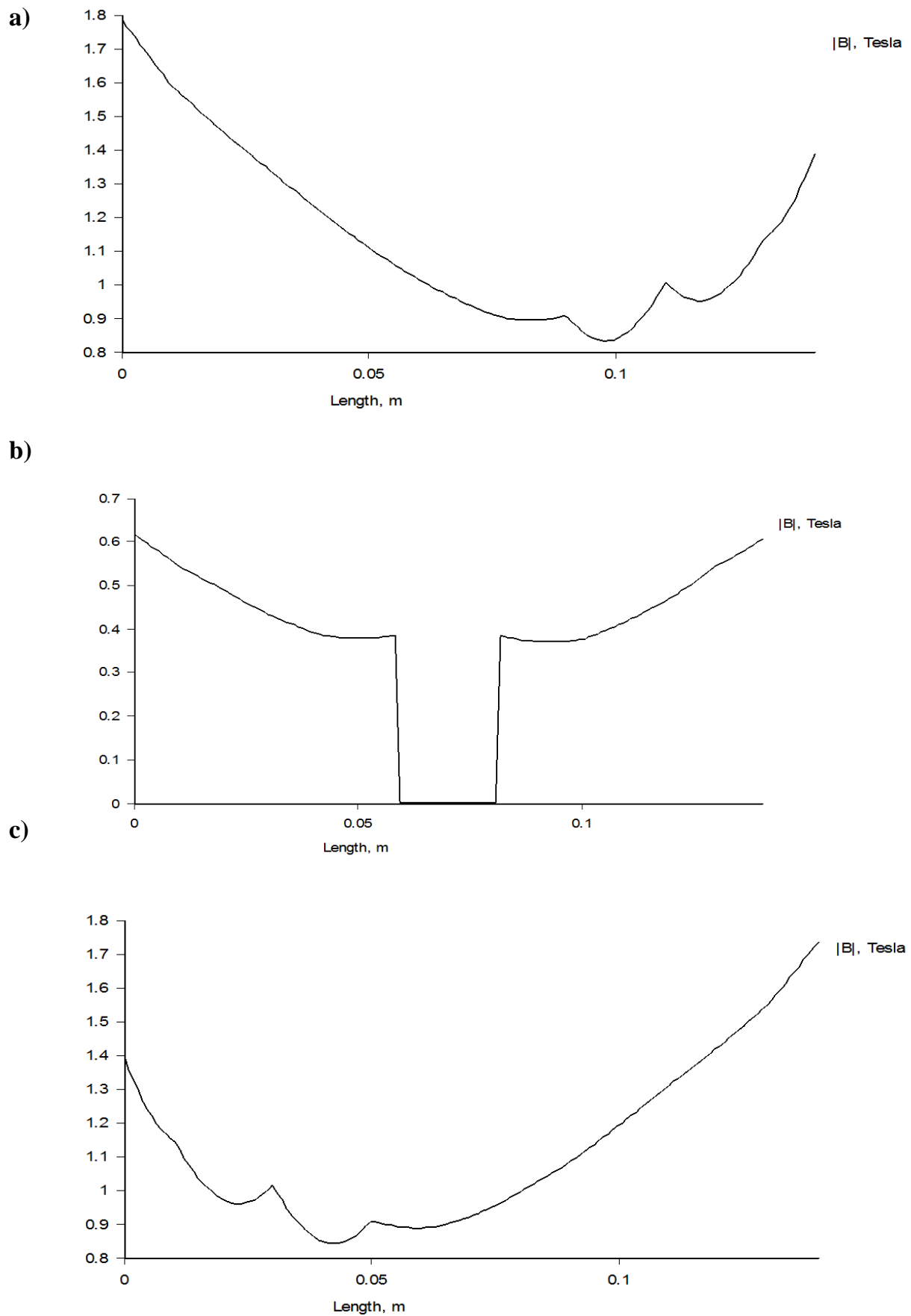




**Figure IV.21 :** Composante transversale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur en présence de l'écran supraconducteur avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm

La courbe **IV.22** correspond à la répartition du champ magnétique créé par un solénoïde et modifié par la présence de l'écran supraconducteur incliné. On constate que la valeur maximale est concentrée à coté de l'écran. La différence entre le champ magnétique relevé à 2 cm et celui généré à coté d'une bobine est importante, avec une diminution de plus de 3T. Cette première structure présente trop de fuite magnétique.



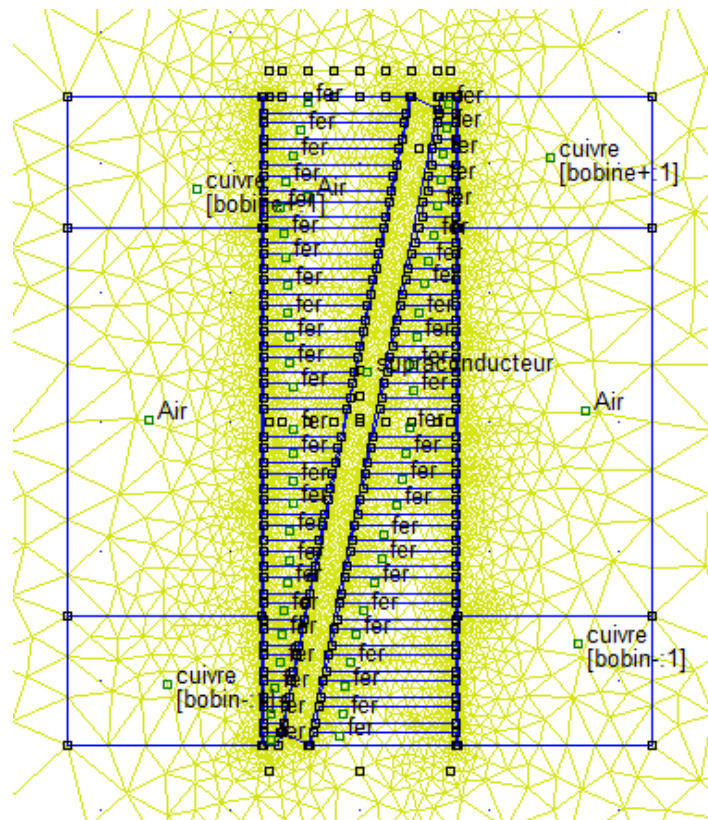


**Figure IV.22 :** Composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur en présence de l'cran supraconducteur avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm

### VI.6.3 Cas de deux bobines supraconductrices avec écran et avec fer

Il n'est pas seulement intéressant de pouvoir utiliser les matériaux supraconducteurs pour générer de fort champ magnétique, encore faut pour l'utiliser au mieux pour l'induction magnétique radiale, qui aura toute son importance dans la puissance électrique et le couple du moteur.

Dans cette topologie les solénoïdes créent des champs magnétiques de même direction et l'écran supraconducteur sert simplement à guider le flux. Nous constatons donc une forte centration de fuites magnétiques autour des bobines, diminuant l'impact de l'induction radiale utile (**Fig. IV.13**). Pour réduire ces fuites magnétiques l'ajout d'un matériau dans la longueur utile de cet inducteur est proposé. Son rôle est de canaliser un maximum de flux magnétique vers le centre du moteur, pour augmenter l'induction magnétique radiale (**Fig. IV.23**).



**Figure IV.23** : Structure de l'inducteur avec fer.

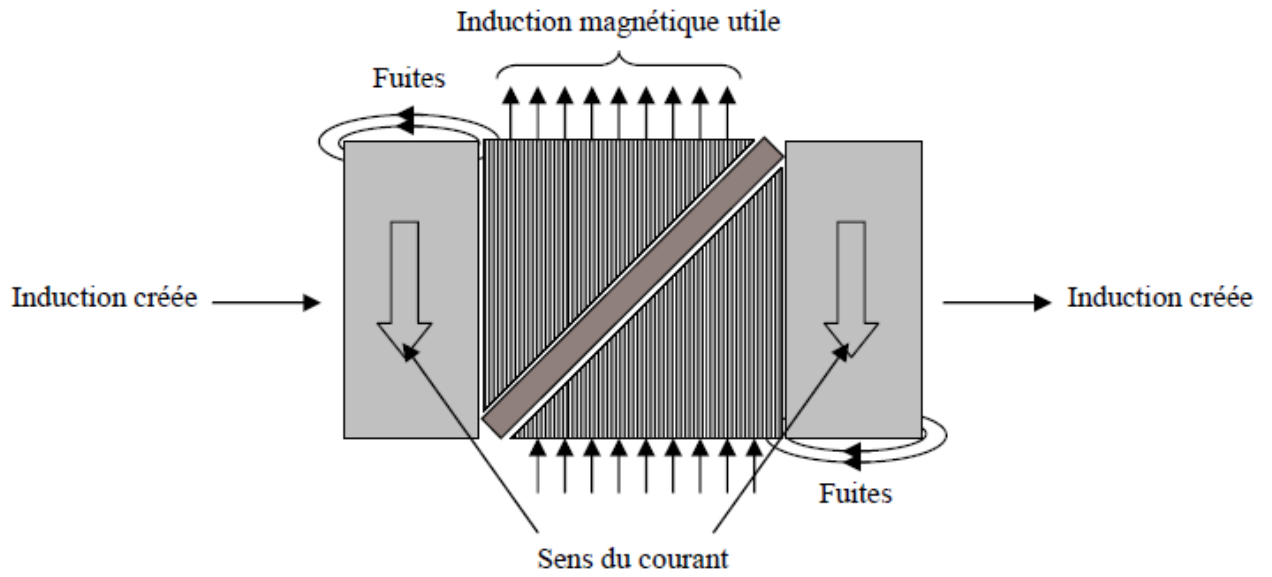
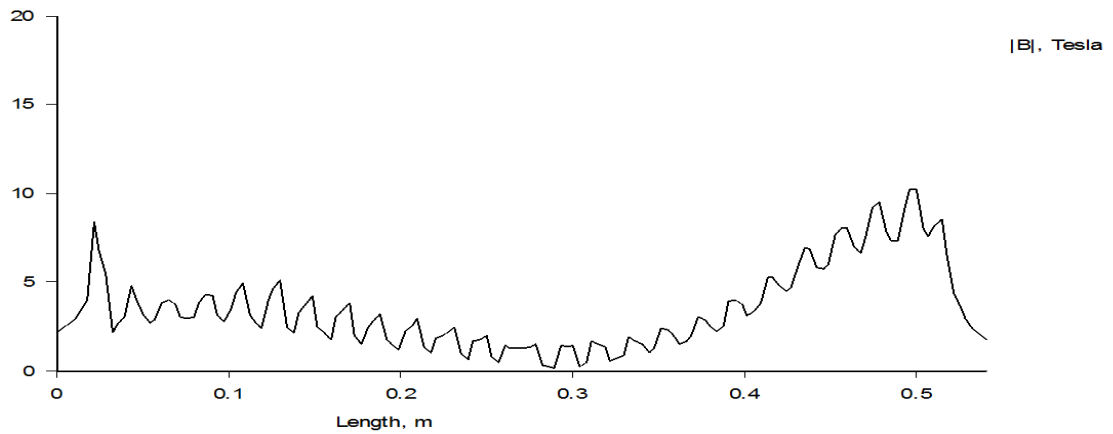
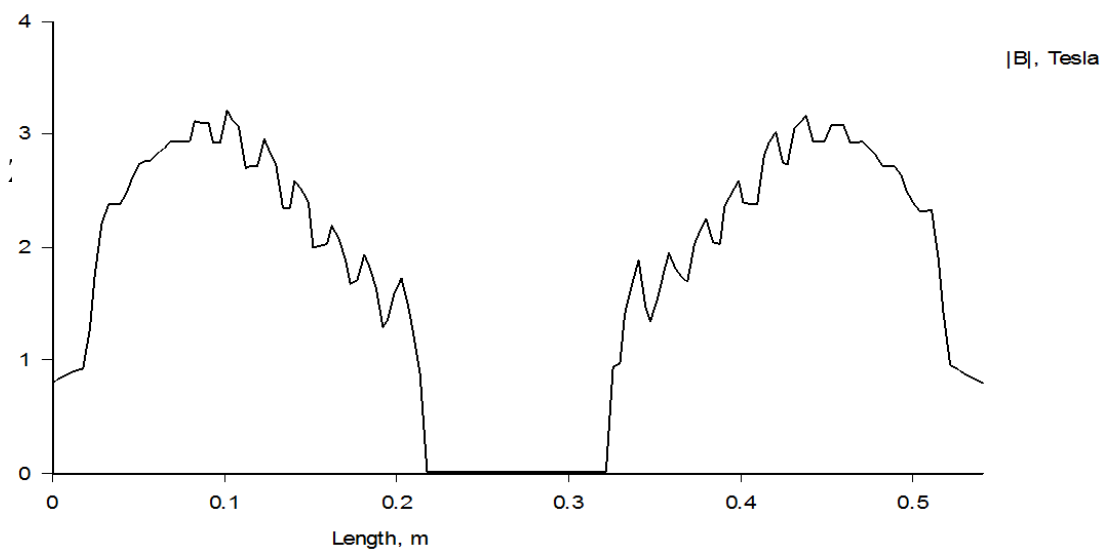


Figure IV.24. Induction magnétique radiale dans l'entrefer

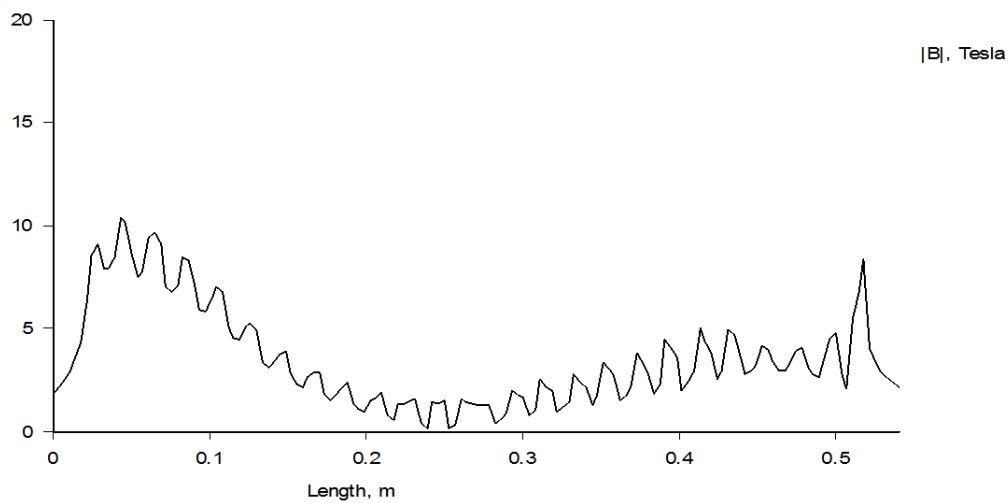
a)



b)

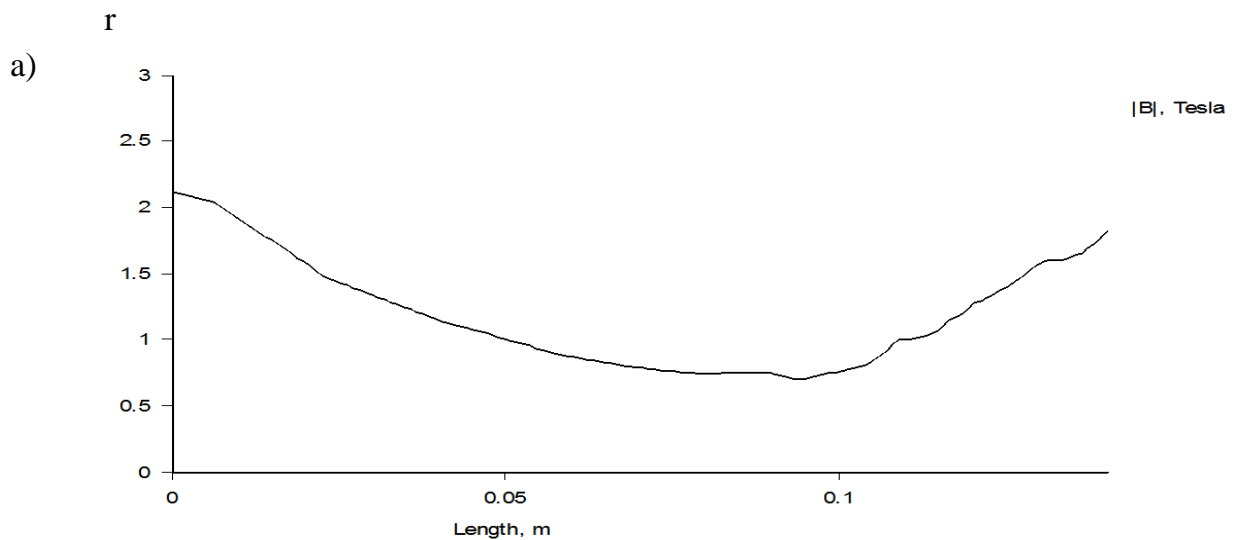


c)

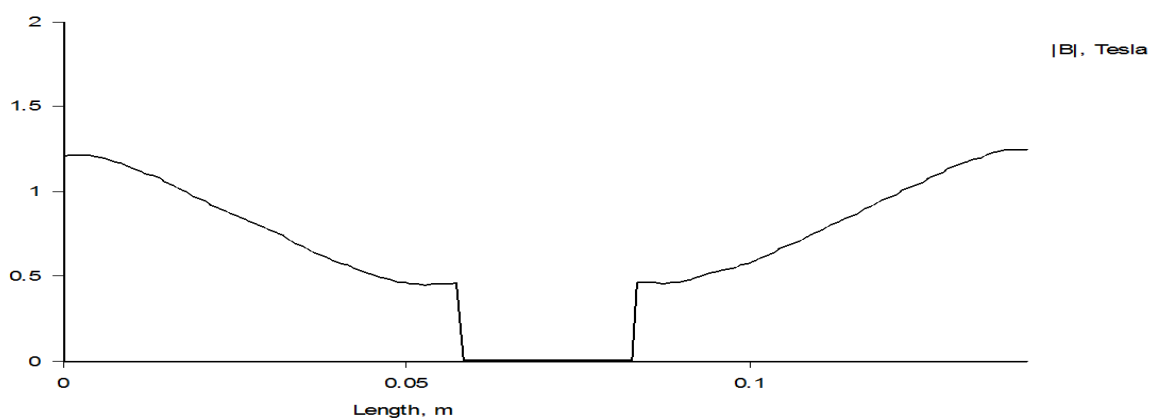


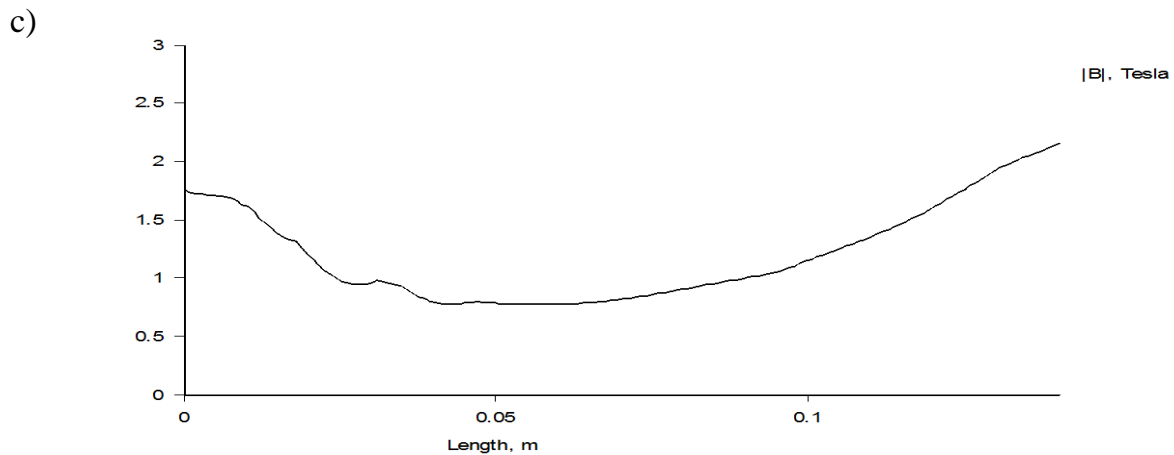
**Figure IV.25:** Composante transversale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec fer avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm  $Z=+7$

Avec le fer ajouté comme « guideur de flux », nous parvenons avec les mêmes dimensions d'écran et de solénoïdes supraconducteurs à une induction magnétique radiale de 2T, à une distance de 2 cm d'entrefer. On double ainsi le flux utile par pôle (**Figure IV.26**).



b)





**Figure IV.26 :** Composante radiale du champ magnétique à 2cm du rayon d'alésage de l'inducteur avec fer avec (a) à  $Z=0$  cm, (b) à  $Z= + 7$  cm et (c) à  $Z= - 7$  cm

## VI.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude d'une nouvelle topologie de moteur supraconducteur qui repose sur un inducteur à pan coupé. Les résultats de simulation obtenus permettent de valider le principe de blindage des matériaux supraconducteurs massif ainsi que les performances de l'inducteur proposé.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'apparition des supraconducteurs à hautes températures 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.

L'objet de ce travail est d'étudier différentes topologies de moteurs électriques supraconducteurs, particulièrement composés de matériaux supraconducteurs à haute température critique. Ce mémoire présente essentiellement une structure de moteur à pan coupé. Cette structure est définie par une géométrie originale utilisant les capacités d'écrantage magnétique des supraconducteurs massifs.

Afin de réaliser des machines à topologies singulières, comme pour la conception d'un moteur supraconducteur plus classique, une étude bibliographique a été menée. Ce travail de référencement, principalement axé sur les machines réalisées après 1990 et sur les structures à supraconducteur à haute température critique, permet d'envisager un maximum de solutions adaptées à cette technologie. Pour des structures originales, l'imagination a un rôle important.

Dans ce travail nous avons analysé indépendamment l'inducteur modèle à topologie originale dit à pan coupé. L'enrichissement d'une telle étude est complété par un travail numérique, qui apporte une assez bonne corrélation sur les performances de ce moteur, par l'observation de la carte de champ magnétique de l'inducteur seul.

Cette structure a été pensée sur le principe des machines synchrones à griffe et admet ainsi des fuites magnétiques importantes. Toutefois, comme perspectives il est intéressant de continuer les travaux sur cette géométrie pour des applications à fort champ magnétique. En premier lieu une optimisation de la forme de l'écran magnétique et de la pièce polaire ferromagnétique, pour canaliser au mieux les lignes de flux vers le centre du moteur. Cette topologie dépendra beaucoup des avancées technologiques dans le domaine des matériaux supraconducteurs massifs, les critères les plus importants étant la dimension, les capacités de blindages magnétiques dans le temps.



# Bibliographiques

- [1] : Renaud MOULIN: Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs l'université Henri Poincaré, Nancy-I .2010
- [2] : Iszabela KLUTSCH: modelisation des supraconducteurs et mesures institut national polytechnique DE GRENOBLE. 2003
- [3] TRIVERY Mélanie, RICO Marjorie, RUBIO Thibaut : La supraconductivité 2005.
- [4] P. Anderson and Y. Kim, *Theory of the motion of Abrikosov Flux Lines*, Rev. Mod. Phys., Hard Superconductivity : 36 30 (1964)
- [5] T. P. Sheahen, *Introduction to High-Temperature Superconductivity*, Plenum Press, New York (1994).
- [6] D. Huse, M. Fisher and D. Fisher, *Are superconductors really superconducting ?*, Nature, vol 358, (August 1992).
- [7] El Hadj AILAM : Machine synchrone à plots supraconducteurs : Etude et réalisation Université Henri Poincaré, Nancy-I. 2006
- [8] P. Tixador, *Les supraconducteurs, traité des nouvelles technologies série matériaux*, Hermès.
- [9] A.C. Rose-Innes and E.H. Rhoderick « Introduction to Superconductivity », Oxford, England: Pergamon Press plc, 1978.
- [10] A. Devred « Supraconducteurs à basse température critique pour électroaimants », Rapport CEA-R-6011, CEA/Saclay, Septembre 2002.
- [11] Thibault LECREVISSE : Contribution à l'Etude des aimants supraconducteurs utilisant des matériaux supraconducteurs à haute température de transition. 2006
- [12] S. Nomura, N. Watanabe, C. Suzuki, H. Ajikawa, M. Uyama, S. Kajita, Y. Ohata, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, et al., "Advanced configuration of superconducting magnetic energy storage," *Energy* **30**(11–12), 2115–2127 (2005) [doi:10.1016/j.energy.2004.08.017].
- [13] Tristan Caroff : Développement de conducteurs à base d'YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> sur des substrats flexibles par MOCVD. 2008.
- [14] Y. Brunet, J.L. Sabrie, *Machines cryoelectriques*, Traite genie électrique Vol. D3111, (1992).
- [15] <http://www.nexans.fr>
- [16] Yannick COINTE LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT CONTINU 2007



- [17] D. Maier, R. Dommerque, S. Elschner, M. Noe, F. Steinmeyer, M. Stemmler, J. Bock, "First commercial medium voltage current limiters based on BSCCO 2212 bulk components", ASC 2008, 4LB01
- [18] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz, M. Noe, « CURL10 : development and field test of a 10 kV / 10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP BSCCO 2212 », IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 1955-60, (2005)
- [19] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K-P. Juengst, M. Kleimaier, H-U. Klein, D. Krischel, M. Noe; R. Steingass, K-H. Weck, "System technology and test of CURL10, a 10 kV, 10 MVA resistive high Tc superconducting fault current limiter", IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 1961-4, (2005)
- [20] KEBBAB Nouredine Les Supraconducteurs, Modèles et Applications Université de Batna 2007
- [21] JOSEPH BAIXIRAS « Les supraconducteurs application à l'électronique et à l'électrotechnique » CNRS EDITIONS France 1998.
- [22] A. Rezzoug, A. Mailfert, P. Manfe « Cryogenic supersaturated synchronous machine optimization and first experimental results », *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 20, No. 5, pp 1795–1797, September 1984
- [23] Z. J. J. Stekly, H. H. Woodson, A. M. Hatch, L. O. Hoppie, and E. Halas, "Study of Alternators with Superconducting Field Windings: II-Experiment," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-85, N°3 March 1966.
- [24] [www.amsc.com](http://www.amsc.com)
- [25] H. Sugimoto, T. Morishita, T. Tsuda, T. Takeda, H. Togawa, T. Oota, K. Ohmatsu, and S. Yoshida, "Development and test of an axial flux type PM synchronous motor with liquid nitrogen cooled HTS armature windings," *Journal of Physics*, Vol 97, 012203, 2008.
- [26] T. Takeda, H. Togawa, and T. Oota, "Development of Liquid Nitrogen-Cooled Full Superconducting Motor," IHI engineering review, Vol 39, n°2, Aout 2006.
- [27] M. Miki, S. Tokura, H. Hayakawa, H. Inami, M. M. Kitano, H. Matsuzaki, Y. Kimura, I. Ohtani, E. Morita, H. Ogata, M. Izumi, H. Sugimoto, and T. Ida, "Development of a synchronous motor with Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 494–499, 2006.
- [28] N. C. Bondrea, and A. L. Rodrigues, "Torque comparison of an eight-pole permanent magnet excited and a high temperature superconductor disc motor," *PASREG conf.*, Jena, 2003.
- [29] X. Granados, J. Lopez, R. Bosch, E. Bartolomé, J. Lloberas, R. Maynou, T. Puig, and X. Obradors, "Low-power superconducting motors," *Supercond. Sci. Technol.*, Vol 21, 034010(6pp), Fevrier 2008.

- [30] D. Inacio, J. Pina, A. Gonçalves, M. Ventim Neves, A. Leão Rodrigues, “Numerical and experimental comparison of electromechanical,” *European Conference on Appl. Supercond.*, Eucas 2007, Fevrier 2008.
- [31] L. K. Kovalev, K. V. Ilushin, V. T. Penkin, K. L. Kovalev, A. E. Larionoff, S. M.-A. Koneev, K. A. Modeston, S. A. Larionoff, V. N. Poltavets, I. I. Akimov, V. V. Alexandrov, W. Gawalek, B. Oswald, and G. Krabbes, “High output power reluctance electric motors with bulk high-temperature superconductor elements,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 817–822, May 2002.
- [32] B. Oswald, M. Krone, T. Straßer, K. J. Best, M. Soell, W. Gawalek, H. J. Gutt, L. Kovalev, L. Fisher, G. Fuchs, G. Krabbes, and H. C. Freyhardt, “Design of HTS reluctance motors up to several hundred kW,” *Physica C*, Vol 372–376, pp. 1513–1516, 2002.
- [33] L. K. Kovalev, K. V. Ilushin, V. T. Penkin, K. L. Kovalev, V. N. Poltavets, S. M.-A. Koneev, K. A. Modestov, W. Gawalek, T. A. Prikhna, and I. I. Akimov, “An experimental investigation of a reluctance electrical drive with bulk superconducting elements in the rotor at temperature below 20 K,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 43, pp. 792-795, 2006.
- [34] M. Hirakawa, S. Inadama, K. Kikukawa, E. Suzuki, and H. Nakasima, “Developments of superconducting motor with YBCO bulk magnets,” *Physica C*, Vol 392-396, pp. 773–776, Fevrier 2003.
- [35] P. Tixador, F. Simon, H. Daffix, and M. Deleglise, “150 kW Experimental superconducting Permanent Magnet Motor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 9, no. 2, pp. 1205–1208, June 1999.
- [36] P. Tixador, “Superconducting electrical motors,” *International Journal of Refrigeration*, 1999.
- [37] H. Sugimoto, Z. N. Wang, T. Morishita, Y. Hondou, T. Takeda, and H. Togawa, “Development of an HTS motor with Ho-123 superconducting field coils at liquid nitrogen temperature,” *European Conference on Appl. Supercond.*, Eucas 2007, Fevrier 2008.
- [38] M. J. Superczynski Jr, and D. J. Waltman, “Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, no. 2, pp. 513–519, June 1997.
- [39] K. Nagao, T. Nakamura, T. Nishimura, Y. Ogama, N. Kashima, S. Nagaya, K. Suzuki, T. Izumi, and Y. Shiohara, “Development and fundamental characteristics of a YBCO superconducting induction/synchronous motor operated in liquid nitrogen,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 21, 015022 (5 pp), 2008.
- [40] E. Wantabe, K. Kikukawa, Y. Satoh, and S. Torii, “Development of a superconducting claw-pole motor,” *Physica C*, Vol 468, pp. 15–20, 2008.

- [41] H. Oyama, T. Shinzato, K. Hayashi, K. Kitajima, T. Ariyoshi, and T. Sawai, “Application of superconductors for automobiles,” *Automotives*, 2008.
- [42] Philippe MASSON : étude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs. Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale Université Henri Poincaré, Nancy I 2002.