

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Djilali Bounaama



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

Génie électrique

Option :

Electrotechnique

Thème :

Simulation de machine supraconductrice

Réalisé par :

Mr. Titaouni brahim

Mr. Ralem ahmed khalil

Encadré par :

Dr. AILAM EL HADJ

Année Universitaire 2016/2017

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu notre seigneur dieu qui nous a donné la force d'achever ce travail.

Nous remercions vivement notre promoteur Monsieur LHADJ AILEM pour l'aide précieuse qu'il nous a offert dans l'élaboration de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des professeurs de l'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Aussi, nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin avec leurs conseil pour l'élaboration de ce projet de fin d'étude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

Mes très chers frères

Ma sœur

Tous les membres de ma grande famille.

A mes amis garçons et à tous les étudiants de la électrotechnique promotion 2012/2017

TITAOUNI Brahim

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

Mes très chers frères

Ma sœur

Tous les membres de ma grande famille.

A mes amis garçons et à tous les étudiants de la électrotechnique promotion 2012/2017

Ralem ahmed khalil

ملخص

في هذه المذكرة سنقوم بدراسة عددية وتجريبية حول محركات التدفق المحوري. كما سنقوم ببحث غني حول الناقلية الفائقة والأجهزة الكهربائية في بداية المذكرة. ثم سنقوم بعرض مختلف البرامج المستعملة في مجال الناقلية الفائقة. كما سنقوم باستعمال برنامج الـ FEMM بمحاكاة الحث المغناطيسي الذي أنشأ من تحريض آلة التدفق المحوري. أجريت تدابير الحث على جهاز الناقلية الفائقة المتوفر على مستوى مختبر الانظمة الذكية بجامعة خميس مليانة

الكلمات المفتاحية: الناقلية الفائقة، التدفق، شعاعي، محوري، تحريض

Résumé

Dans ce mémoire, nous présentons une étude numérique et expérimentale sur les machines à flux axial. Une riche recherche bibliographique sur les supraconducteurs puis sur performances des machines électriques a été menée au début du mémoire. Les différents logiciels utilisés dans le domaine des supraconducteurs ont été présentés par la suite. La simulation de l'induction magnétique créée par l'inducteur d'une machine à flux axial a été présentée en utilisant le logiciel FEMM. Les mesures de l'induction ont été réalisées sur une machine supraconductrice disponible au niveau du laboratoire LESI de l'Université de Khemis Miliana.

Mots clés : supraconducteur, flux, radial, axial, l'induction

Abstract

In this work, we present a numerical and experimental study on axial flux machines. A rich bibliographic search on superconductors and then on performance of electrical machines was carried out at the beginning of the dissertation. The various software used in the field of superconductors were subsequently presented. The simulation of the magnetic induction created by the inductor of an axial machine was presented using the FEMM software. The induction measurements were carried out on a superconducting machine available at the LESI laboratory of the University of Khemis Miliana.

Keywords : superconductor, flux, radial, axial, inductor

Tables des matieres

Introduction générale :	01
--------------------------------------	-----------

Chapitre I : généralités sur les supraconducteurs

Introduction	02
I. 1. Définition de la supraconductivité.	02
I. 2. Historique de la supraconductivité	02
I. 3. Propriétés physiques des supraconducteurs.	05
I. 3.1 Résistivité nulle	05
I. 3.2 Les grandeurs critiques.....	06
I. 3.2.1 Température critique (Tc) :.....	06
I. 3.2 .2 Champ critique Hc.....	06
I. 3.2.3 Densité de courant critique (jc).....	06
I. 3.3 Surface critique.	06
I. 3.4 Effet Meissner et Ochsenfeld ou diamagnétisme parfait.....	07
I.4. Types des supraconducteurs :	07
I.4. 1.Supraconducteurs de type I :	08
I.4.2 Supraconducteurs de type II :	08
I.5. Les familles des supraconducteurs.....	10
I.5.1 Les supraconducteurs HTc et BTc	10
I.5.2.Technologies de fils supraconducteurs.	11
I.6.Applications et utilisation des fils supraconducteurs	12
I.7.Marché des cryo-fluides.....	12
I.8. Ecrans supraconducteurs.....	14
Conclusion :	14

Chapitre II. Les machines électriques supraconductrices

Introduction.	15
II.1.Topologie des machines électriques	15
II.2. Bobinages.	16
II.3. Machines à flux radial.	17
II.3. 1.Machines à flux radial conventionnel.	17
II.3.2. Machines électriques supraconductrices.....	18
II.3.2.1 pourquoi utiliser les supraconducteurs ?	18
II.3.2.2. Machines synchrones supraconductrices à flux radial.	18
II.3.2.2.1 Alternateurs synchrones supraconducteurs à flux radial :.....	19

II.3.2.2.2 Moteurs synchrones à pôles saillants à flux radial.	19
II.3.2.2.2.1.L'induit :	20
II. 3.2.2.2.2.L'inducteur :	20
II.3.3. Comparaison entre une machine conventionnelle et supraconductrice.	21
II.3.4. Avantages et inconvénients des machines à flux radial :	22
II.4. Machines à flux axial (AFM).	22
II.4.1 Machines à flux axial (AFM) conventionnel.	22
II.4.1.1. Machine synchrone à flux axial.....	23
II.4.1.2.les structures d'une machine à flux axial.	23
II.4.1.2.1.Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor.	23
II.4.1.2.2. Machines à flux axial à stator interne ou externe.....	24
II.4.1.2.3 Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques	25
II.4.1.2.4 Machines à flux axial à bobinage sur dents.....	26
II.4.2.Machine synchrone supraconductrice à flux axial.....	27
II.4.2.1.Machines à flux axial avec bobines supraconductrices.....	27
II.4.2.2.Machines à flux axial avec des matériaux supraconducteurs passifs (bulks)	28
II.4.2.3. Avantages/inconvénients.....	29
Conclusion.....	29

Chapitre III : Simulation d'une machine supraconductrice par FEMM

Introduction :	30
III.1.Les logiciels de simulation :	30
III.1.1.Le logiciel COMSOL	30
III.1.2. Les logiciels FLUX 2D/ FLUX 3D :	31
III.1.2.1.FLUX 2D	31
III.1.2.2 .FLUX 3D :	32
III.1.3.MATLAB/SIMULINK.....	32
III.2 Modélisation magnétique d'un inducteur d'une machine à flux axiale.	33
III.3.Etude d'une bobine en cuivre.	33
III.4.Etude d'une machine supraconductrice à flux axial.....	35
III.5.Etude d'inducteur de cette machine.	36
III.6. Prototype des tests de la machine.....	37
III.6.1.Tests statique à chaud (mesure des résistances de l'inducteur).....	37
III.6.2.Champ créée par l'inducteur.	37
III.6.3.Teste à chaud dynamique.	38
III.7. Tests à froid statiques.....	38

III.8. Simulation de la machine étudiée.....	39
III.8.1. Simulation de l'inducteur dans le 1 ^{ier} cas.....	40
III.8.2. Simulation de l'inducteur dans le 2 ^{eme} cas.....	42
III.8.3. Simulation de la machine dans le 1 ^{ier} cas.....	43
III.8.4. Simulation de la machine dans le 2 ^{eme} cas.....	45
Conclusion :.....	46
Conclusion générale :	47

Liste des figures

Figure. (1.1). Aimant lévitant au-dessus d'un supraconducteur	03
Figure (I .2) : Heike Kamerling Onnes – premier liquéfaction de l'hélium (1908) et découvert la supraconductivité (1911).....	04
Figure(I.3) : Evolution de la résistivité électrique en fonction de la température.....	05
Figure(I.4) : Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur en ce qui concerne le champ magnétique, la température et la densité de courant...	06
Figure. (I.5) : Effet Meissner dans une sphère supraconductrice.....	07
Figure (I.6) : caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type I.....	08
Figure(I.7) : caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type II.....	09
Figure (1-8). Réseau de vortex, NbSe, B=1T, T=1.8K.....	10
FigureI-9. Principe du blindage par un supraconducteur massif	14
Figure II.1 : Principe de fonctionnement de la machine de la Machine à flux radial.....	15
Figure II .2: Principe de fonctionnement à flux axial.....	15
Fig. II.3 : Direction du flux radial.....	16
Fig. II.4 : Direction du flux axial.....	16
Fig. II.5 : Direction du flux transverse.....	16
Fig. II.6 : Bobinage réparti pour machine à flux radial.....	16
Fig.II.7 : Bobinage concentré pour machine à flux radial.....	16
Fig. II.8 : Bobinage Gramme pour machine à flux radial.....	16
Fig.II.9 : Bobinage réparti pour machine à flux axial.....	17
Fig.II.10 : Bobinage concentré pour machine à flux axial.....	17
Fig.II.11 : Bobinage Gramme pour machine à flux axial.....	17
Figure II.12 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe.....	17
Figure (II.13) : Comparaison entre une machine conventionnelle (a) et supraconductrice (b).....	18
Figure II.14 : Moteur HTc de propulsion de navire 36,5 MW construit par AMSC.....	20
Figure II.15 : Induit à air de la machine Siemens AG : 400kW-1500 tr/min.....	20
Figure. II.16 : Machine à flux axial ou discoïde.....	23
Figure II.17 : Machine à flux axial 1 stator / 1 rotor.....	23
Fig. II.18 : Descriptif de la machine à flux axial stator interne.....	24

Fig.II.19 : Descriptif de la machine à flux axial stator externe.....	24
Fig.II.20 : Directions du flux d'une machine Torus type NS	25
Fig.II.21 : Directions du flux d'une machine Torus type NN.....	25
Fig.II.22 : Directions du flux d'une machine à stator externe non encoché.....	25
Fig.II.23 : Directions du flux d'une machine à stator externe encoché.....	25
Fig.II.24 : Descriptif de la machine à axial stator interne.....	26
Fig.II.25 : Machine à flux axial multi flux niveaux.....	26
Fig.II.26 : Machine à flux axial 1 stator/1 rotor avec bobinage sur dents.....	26
Fig.II.27 : Machine discoïde 1 stator / 1 rotor à bobinage sur dents et pôles centrés	26
Figure II.28. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5 kW par IHI.....	27
Fig.II.29 : Stator dans son état final.....	28
Fig.II.30 : Inducteur supraconducteur avec des bobines doubles couches dans L'entrefer du moteur	28
Fig.II.31 : Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs, IHI.....	28
Figure(III.1). La distribution de champ magnétique en utilisant COMSOL 2D.....	31
Figure(III.2). Modélisation 3D sous COMSOL.....	31
Figure(III.3) : Induction et lignes de flux dans le stator avec rotor plein.....	32
Figure(III.4). Dégradé de J pour le cas des filaments couplés, $f=50$ Hz.....	32
Figure(III.5) : Diagramme de simulation par des Schémas bloc [22].....	33
Figure III.6 : Circuit électrique un solénoïde en cuivre	34
Figure III.7 : coupe de la Circuit électrique pour la simulation solénoïde en cuivre.....	34
Figure III.8 : maillage du solénoïde.....	34
Figure III.9 : répartition du champ magnétique du solénoïde.....	35
Figure III.10 : l'induction magnétique dans le solénoïde.....	35
Figure (III.11) : Machine synchrone supraconductrice à flux axial.....	36
Figure (III.12) : a) structure réelle de l'inducteur.....	36
Figure (III.13) : le refroidissement manuel de la machine.....	38
Figure (III.14) : le maillage de l'inducteur.....	40

Figure (III.15) : la répartition de champ dans l'inducteur.....	41
Figure (III.16) : l'induction magnétique dans l'inducteur.....	41
Figure (III.17) : le maillage de l'inducteur.....	42
Figure (III.18) : la répartition de champ dans l'inducteur.....	42
Figure (III.19) : l'induction magnétique dans l'inducteur.....	43
Figure (III.20) : le maillage de déférente partie de la machine.....	43
Figure (III.21) : la répartition de champ dans la machine.....	44
Figure (III.22) : l'induction magnétique dans la machine.	44
Figure (III.23) : le maillage de déférente partie de la machine.....	45
Figure (III.24) : la répartition de champ dans la machine.....	45
Figure (III.25) : l'induction magnétique dans la machine.....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : petit hystérique de la supra conductivité.....	05
Tableau. I.2 : Tc, Hc et Bc dans les supraconducteurs de type I, (à 0K).....	08
Tableau I.3 : Classification des supraconducteurs HTc et BTc les plus utilisés.....	10
Tableau I.4 : les fils supraconducteurs et leur performances et prix.....	12
Tableau I.5 : matériaux supraconducteurs pour les applications en électrotechnique.....	12
Tableau I.6 : Tableau des marchés des cryo-fluides.....	13
Tableau II.1 : Comparaison entre une machine conventionnelle et supraconductrice.....	21
Tableau(III.1) : présent les valeurs de tension ou borne de l'inducteur.....	37
Tableau(III.2) : présent les valeurs de champ magnétique devant la pièce supraconducteur.....	37
Tableau(III.3) : présent les valeurs de champ magnétique devant la bobine de l'induit....	37
Tableau (III.4) : le résultat obtenu de champ magnétique dans les 4 quadrants.....	39

Notations et symboles

T_c : température critique.

H_c : champ magnétique critique.

J_c : la densité de courant critique.

BCS : théorie des trois chercheurs (Bardeen, Cooper et Schrieffer).

B : Induction magnétique [Tesla].

H_a : champ magnétique [A*mm].

μ₀ : perméabilité à vide

LHC : (Large Hadron Collides) le grande collisionneur de hadrons

CENR : l'organisation Européenne pour recherche nucléaire.

SMES :(Supraconducting Magnitic Energy storage) le stockage d'énergie magnétique
Supraconductrice.

p.u : per unit.

AMSC : American Supraconductor Corpora.

AFM : (axial flux machine) machine à flux axial.

R_{int} : le rayon interne.

R_{ext} : le rayon externe.

L : la hauteur du solénoïde

J : la densité de courant

I : le courant électrique.

S : la surface de la section de fil

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale :

La supraconductivité est un phénomène qui a été découvert par accident en 1911 où la résistivité de certains matériaux disparaît sous certaines conditions. En effet, en dessous d'une certaine valeur de température, d'un champ magnétique et densité du courant électrique, le matériau ne présente aucune résistance (résistance nulle). Ces paramètres sont appelés les valeurs critiques. Ces matériaux ont poussé les chercheurs et les ingénieurs à concevoir des dispositifs permettant d'exploiter leurs hautes performances en électrotechnique. Dès les années 60 les premières études des machines électriques supraconductrices ont vu le jour. Le concept le plus répondu était la machine entièrement supraconductrice où à la fois l'induit et l'inducteur ont un bobinage supraconducteur. La sensibilité des fils supraconducteurs à la variation du champ magnétique a motivé les concepteurs de machines électriques à se pencher sur des structures à induit en cuivre et inducteur supraconducteur où le matériau sera soumis à un champ presque constant.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons un bref historique des supraconducteurs avec leurs propriétés physiques, les performances des fils supraconducteurs et quelques applications des supraconducteurs en électrotechnique et dans d'autres domaines.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré les principales topologies des machines électriques supraconductrices à savoir la machine à flux radial et celle à flux axial.

Dans le dernier chapitre nous avons réalisé une étude numérique et expérimentale sur l'inducteur supraconducteur à flux axial où nous avons constaté la variation spatiale de l'induction créée dans l'entrefer de la machine étudiée. Les simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel FEMM.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS
SUR LES
SUPRACONDUCTEURS

Introduction

À travers ce chapitre bibliographique, nous présentons un extrait de travaux réalisés à travers le monde sur des supraconducteurs.

La supraconductivité est un phénomène caractérisé par l'absence de résistance électrique et le champ magnétique que va expulser à l'intérieur de certains matériaux supraconducteurs.

Dans un premier temps, nous rappellerons quelques généralités sur les supraconducteurs. Nous présenterons les grandeurs critiques qui délimitent l'état supraconducteur de l'état normal. De plus, nous classerons les supraconducteurs dans plusieurs familles en fonction de leur comportement magnétique, leur composition et leur température d'utilisation.

Un deuxième chapitre sera consacré aux fils supraconducteurs à haute température critique (HTc). Nous présenterons la composition, la fabrication et les performances des types de ruban supraconducteurs disponibles à la vente : le NbTi, BSSCO, l'YBCO et le MgB₂ et leur température critique et leur prix, nous allons aussi parler sur les fluides cryogéniques, leur température et leur marché.

I. 1. Définition de la supraconductivité.

La supraconductivité est la propriété que possèdent certains matériaux de conduire le courant électrique sans résistance à condition que leur température soit inférieure à une certaine valeur appelée température critique (T_c). Ces matériaux supraconducteurs s'opposent également à tout champ magnétique externe. [02]

I. 2. Historique de la supraconductivité

En 1908, un physicien néerlandais Heike Kamerling Onnes a réussi à liquéfier l'hélium à des températures inférieures à 4 kelvins. [06]

En 1911, Heike Kamerling Onnes a refroidi le mercure par l'hélium liquide à la température de ($4.2 \text{ K} = -268.8 \text{ }^\circ\text{C}$), il a observé que sa résistance est nulle en dessous de cette température : c'est le premier qui a remarqué la supraconductivité, c'est-à-dire que si on refroidit un matériau à une température inférieure à une certaine valeur appelée température critique (T_c), la résistance de ce matériau doit être nulle.

En 1933, Walter Meissner et Robert Ochsenfeld ont découvert que si on refroidit un matériau supraconducteur à cette température critique T_c , il doit expulser le champ magnétique ; ce phénomène est mentionné comme « l'effet Meissner ».



Figure. (I.1). Aimant lévitant au-dessus d'un supraconducteur [09].

En 1957, les trois chercheurs ' John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer' ont découvert une nouvelle théorie (théorie de BCS) (tous les trois prix Nobel de physique, en 1972 [12]) Cette théorie décrit la supraconductivité comme un phénomène quantique (qui peut être mesuré et chiffré) [03].

En 1962, un physicien britannique Brian Josephson affirma que le courant électrique pouvait circuler entre deux supraconducteurs, même s'il n'est pas relié par des matériaux non supraconducteurs ou un isolant [09], ce qu'on appelle (l'Effet Josephson).

En 1986, Berdnoz et Muller découvrent que certaines céramiques à base comme d'oxyde de cuivre dois t'être supraconducteurs à une certaine température et elles sont utilisées comme l'azote liquide (77 K).

La recherche sur les matériaux céramiques n'a cessé de progresser et des matériaux tels que le BSCCO (Bi-Sr-Ca-Cu-O) et l'YBaCuO ont des températures critiques pouvant approcher les 115K. L'azote liquide coûte dix fois moins cher que l'hélium liquide et ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche.

En 2001, un nouveau supraconducteur est découvert, le diborure de magnésium (MgB_2) ; ce supraconducteur permet la fabrication facile de fil supraconducteur grâce à sa structure et à son processus de fabrication PIT (Powder In Tube).

En 2008, le professeur Hosono, à Tokyo, a montré qu'il existe une nouvelle classe de matériaux supraconducteurs « les pnictures » (les pnictures, de type R-OFéAs ; où R est une terre rare) à base de fluor, d'oxygène et d'arsenic ; leur température critique maximale est de 28 K.

La théorie BCS ne s'applique pas aux supraconducteurs à haute température et le phénomène reste encore incompris sur le plan théorique. [03].

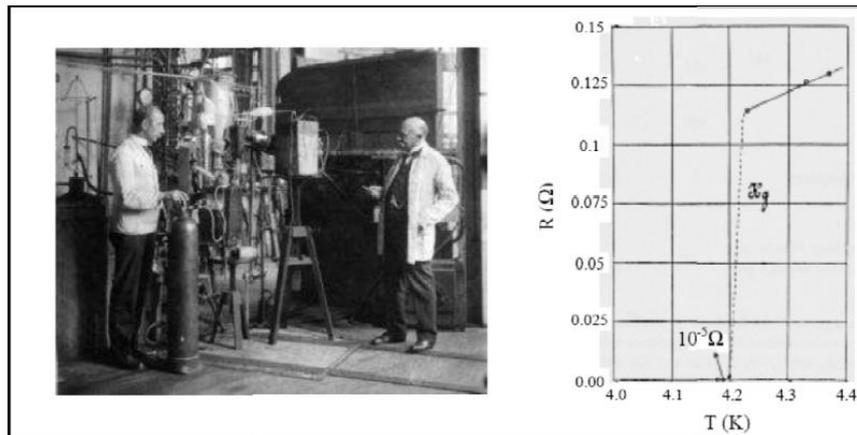


Figure (I.2) : Heike Kemerling Onnes – première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la Supraconductivité (1911) [4]

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

année	Faits ayant marqué la recherche autour de la supraconductivité
1908	Liquéfaction de l'hélium par k.onnes.
1911	Découverte de la supraconductivité par k.onnes et G. Holst sur un échantillon du mercure dans un bain d'hélium liquide.
1913	Échec du premier aimant supraconducteur.
1933	Mise en évidence du diamagnétisme du supraconducteur par Meissner et Ochsenfeld (effet Meissner).
1954	Premier aimant supraconducteur (Nb).
1957	Théorie microscopique de la supraconductivité par Bardeen, Cooper, Schrieffer (théorie de BCS).
1958	Mise au point de conducteur Nb Zr et Nb ₃ Sn.
1960	Découverte des fortes densités de courant sur induction élevée.
1962	B. Josephson prédit les effets quantiques qui portent son nom (effet Josephson).
1964	Première application significative des supraconducteurs à l'Argonne.
1965	Premier cryoalternateur.
1968	Définition de brin multi filamentaire par le laboratoire Rutherford.
1974	Mise en service de la chambre à bulles BEBC au CERN.
1982	Première image IRM, et première application industrielle et commerciale des supraconducteurs.

1983	Mise au point des câbles multi-filamentaires supraconducteurs alternatifs par Alcatel Alsthom ; recherche en GEC Alsthom ,premier accélérateur supraconducteur (TEVA TRON).
1986	Berdnoz et Muller découvrent la supraconductivité à haute température critique de céramique à base d'oxyde.
1987	Envolée de température critique (YbaCuO ,93k) ; démarrage de TORE SUPRA à Cadarache.
1988	Mise en fonctionnement de 15T (Nb3 Sn ,6.4 T, 4.5 k).
1989	Mise en fonctionnement du champ toroïdal de TOR SUPRA.
1999	Test de premier RMN à 900 MHz.
1999	Test de première bobine modèle d'ITER.
1999	Début de construction du LHC.
2001	Découverte des propriétés supraconductrices composées Mgb2.

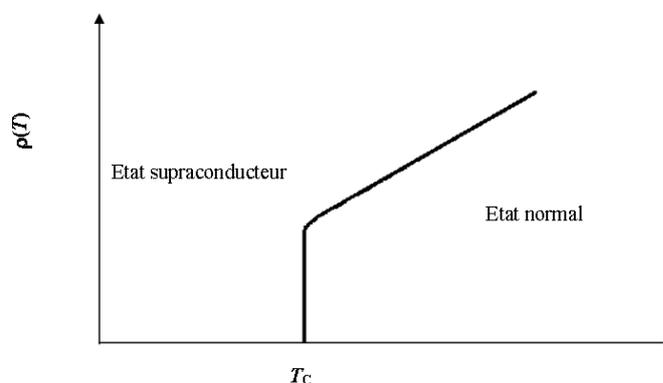
Tableau I.1 : petit hystérique de la supra conductivité [04].

I. 3. Propriétés physiques des supraconducteurs.

Les matériaux supraconducteurs : ils ont des propriétés spécifiques surtout dans le transport d'énergie à cause de l'absence de résistivité «Effet joule ».

I. 3.1 Résistivité nulle :

Premier caractère des matériaux supraconducteurs si la résistivité est nulle (figure I.3).avec une certaine température appelée température critique T_c , séparant le comportement de l'état normal des matériaux de l'état supraconducteur, la résistivité changera dans un intervalle de température brusque, très étroite et inférieure à 10^{-5} k dans le gallium très pur[01] : cela indique que l'état supraconducteur est un nouvel état de la matière .



Figure(I.3) : Évolution de la résistivité électrique en fonction de la température. [01].

I. 3.2 Les grandeurs critiques.

I. 3.2.1 Température critique (T_c) :

C'est à l'intervalle de température que le matériau va changer sa résistivité entre l'état normal et l'état supraconducteur ; cette température est déférent pour chaque matériau et dépend de la densité du courant et de champ magnétique.

I. 3.2 .2 Champ critique H_c .

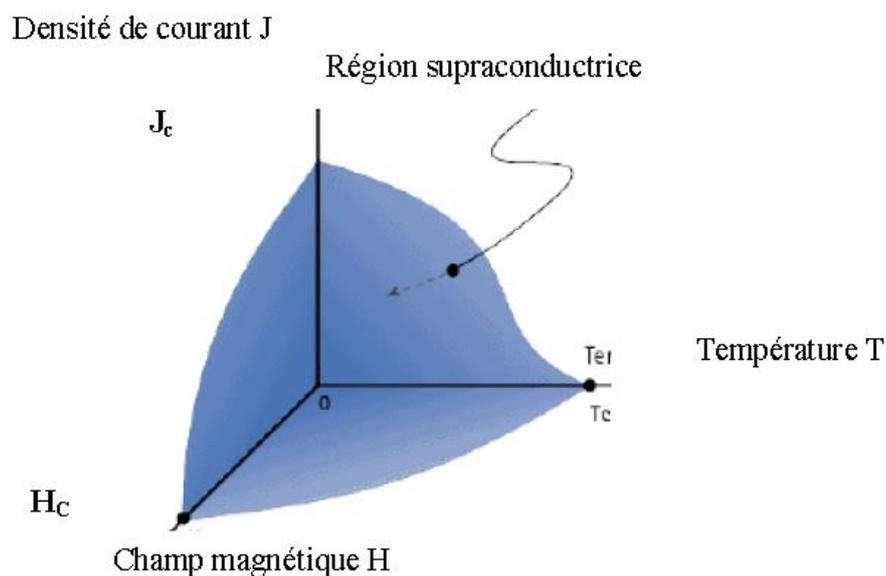
C'est la valeur du champ magnétique externe dans l'état supraconducteur ; ils sont déparés dans certaine intensité, qui dépend de l'intervalle de température critique T_c .

I. 3.2.3 Densité de courant critique (j_c).

Elle correspond à une valeur maximale à partir de laquelle une résistivité apparaît ; elle rassemble aux propriétés magnétiques. [05]

I. 3.3 Surface critique.

Elle se compose de trois grandeurs essentielles (la température critique T_c , champ magnétique critique H_c et densité de courant critique J_c), ces trios paramètres doivent définir une région supraconductrice appelée « surface critique », c'est -à dire ce qu'on retrouve dans cette région est devenu un matériau supraconducteur, la figure (I.4) représente les trois paramètres critiques qui forment la surface critique (T_c, H_c, J_c).



Figure(I.4) : Illustration de la dépendance fonctionnelle de l'état supraconducteur en ce qui concerne le champ magnétique, la température et la densité de courant [02].

I. 3.4 Effet Meissner et Ochsensfeld ou diamagnétisme parfait.

En 1933, Walter Meissner et Robert Ochsenfeld ont découvert une nouvelle propriété très importante, ils ont affirmé que si la température de matériaux est supérieure à la température critique, les matériaux transforment en matériaux amagnétiques, et si elle est inverse (inférieure à la température critique, il devient un matériau supraconducteur et les lignes de flux sont expulsées de la sphère (figure I.5).

On peut dire donc qu'un matériau supraconducteur est à la fois conducteur parfait et un diamagnétique parfait. [06]

Meissner et Ochsenfeld vont expliquer cette propriété des supraconducteurs par l'apparition de supracourants à la surface du matériau créant un flux magnétique \vec{B}_s qui s'oppose exactement au champ magnétique extérieur. [02]

$$\vec{B} = 0 = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_s \quad \text{avec} \quad \vec{B}_s = \mu_0 \vec{M} \quad \text{et} \quad \vec{M} = \chi \vec{H}$$

Donc

$$\mu_0 \vec{H} (1 + \chi) = 0 \quad \text{et} \quad \chi = -1 \quad (\text{I. 01})$$

B : Induction magnétique [T].

H : Champ magnétique [$A \cdot m^{-1}$].

μ_0 : Perméabilité magnétique à vide [$H \cdot m^{-1}$].

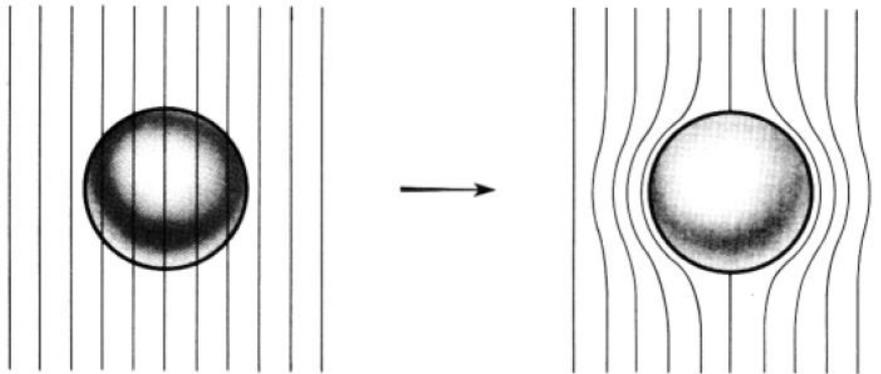


Figure. (I.5) : Effet Meissner dans une sphère supraconductrice [02].

I.4. Types des supraconducteurs :

les matériaux supraconducteurs n'ont pas les mêmes caractéristiques dans la surface critique (T_c, H_c, j_c) si trois grandeurs sont différentes entre un matériau et un autre ; donc, les matériaux supraconducteurs sont classés en deux types (type I et type II) selon le champ magnétique de ces matériaux.

I.4. 1.Supraconducteurs de type I :

Les matériaux supraconducteurs de type I sont simples en général parce qu'il existe deux états (l'état supraconducteur et l'état normal). L'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme parfait avec une résistance nulle et l'état normal correspond à une grande résistance, la figure I.5 présente la caractéristique $B(H)$ d'un matériau supraconducteur.

Les supraconducteurs de type I n'ont aucune application industrielle à l'heure actuelle. [08]

Les champs magnétiques critiques des supraconducteurs de type I sont relativement faibles puisqu'ils ne dépassent pas 0.2 T. Quelques valeurs de T_c et de H_c sont données [09] dans le Tableau.1.2.

Matériau	$T_c(K)$	$H_c (A/m)$	$B_c(Tesla)$
Titanium (Ti)	0.4	$0.42 \cdot 10^4$	0.0056
Aluminium (Al)	1.2	$0.79 \cdot 10^4$	0.0105
Tin (Sn)	3.7	$2.40 \cdot 10^4$	0.0305
Mercure (Hg)	4.2	$3.30 \cdot 10^4$	0.0411
Plombe (Pb)	7.2	$6.40 \cdot 10^4$	0.0803

Tableau. I.2 : T_c , H_c et B_c dans les supraconducteurs de type I, (à 0K). [10]

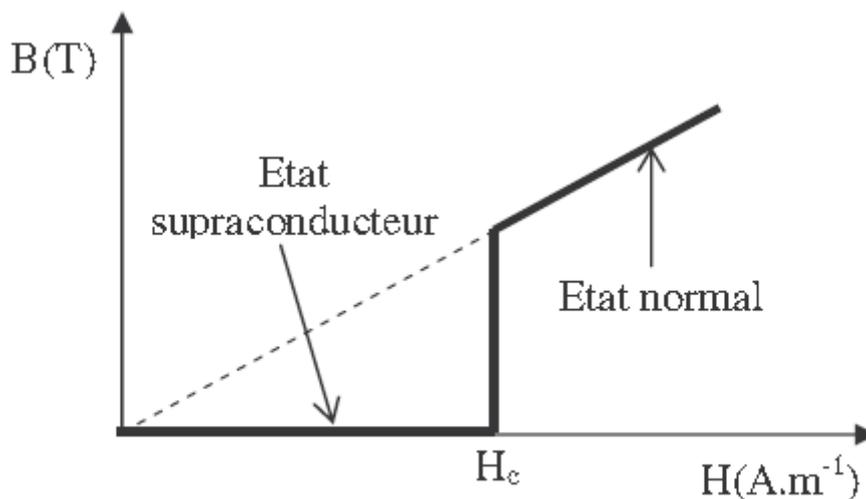


Figure (I.6) : caractéristiques $B(H)$ d'un supraconducteur de type I [08]

I.4.2 Supraconducteurs de type II :

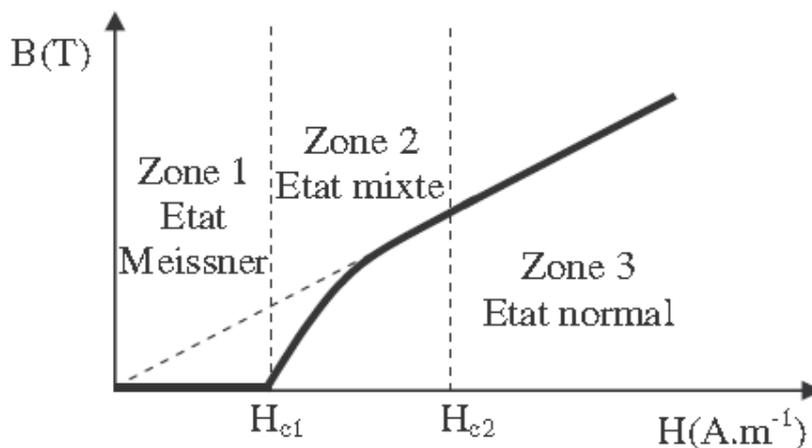
Les matériaux supraconducteurs type II possèdent deux seuils de champs magnétiques à la différence de ceux du type I qui en possèdent qu'un seul magnétique critique H_c , premier s'agissant du champ critique H_{c1} : si le champ magnétique ne dépasse pas cette valeur (H_{c1})

le matériau est dans l'état supraconducteur parfait ($H < H_{c1}$) ; si le champ dépasse cette valeur, il est aussi dans l'état supraconducteur ; mais il est dans l'état mixte jusqu'à H_{c2} et si le champ dépasse la valeur H_{c2} , le flux magnétique est grand et le matériau revient à l'état normal.

H_{c2} est nettement plus élevé H_{c1} . [06]

Le comportement d'un supraconducteur de type II, en présence d'un champ magnétique est décrit sur la figure I.6. On distingue trois zones différentes :

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



Figure(I.7) : caractéristiques $B(H)$ d'un supraconducteur de type II [08].

Lorsqu'on applique un champ magnétique H sur un matériau supraconducteur type II, le champ d'induit B s'oppose à ce champ magnétique appliqué, le matériau bascule sur l'état supraconducteur à l'état mixte et revient à l'état normal.

Dans l'état mixte (entre H_{c1} et H_{c2}) le champ magnétique extérieur pénètre dans le matériau supraconducteur, il coexiste avec deux zones, une zone normale et une zone supraconductrice, les zones normales sont des vortex, ils sont caractérisés par exactement le même flux magnétique. Le quantum de flux ou fluxoïde, est noté Φ_0 est de $2,07 \cdot 10^{-15}$ Wb [08].

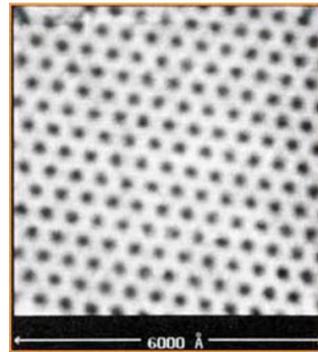


Figure (1-8). Réseau de vortex, NbSe, B=1T, T=1.8K [03]

Le supraconducteur de type II le plus utilisé est le NbTi. Ce fil a été utilisé récemment pour réaliser les aimants du LHC au CERN, dont les densités de courant peuvent dépasser 2000 A.mm², refroidis à 1,9 K, sous des inductions de 9 T. [08]

I.5. Les familles de supraconducteurs.

I.5.1 Les supraconducteurs HTc et BTc

On peut regrouper les matériaux supraconducteurs dans des familles, en tenant compte de leur température critique et de leur forme de fil ; Les supraconducteurs sont regroupés en deux familles :

BTc (basse température critique) et HTc (haute température critique).

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

- Pour les HTc : le BSCCO à 110, l'YBCO à 93 K et MgB₂ à 39 K
- Pour les BTc : le niobium étain à 10 K (NbTi) et le niobium titane à 18,3 K (NbSn)[01]

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

Catégorie	Matériau	Composition	T _c (K)	μ ₀ H _{c2} (Bc T)	J _c (A/mm ²)
HTc	BSCCO	Oxydes de bismuth, strontium, calcium et cuivre	110	≈100T (20K)	500 (77k)
	YBCO	Oxydes d'yttrium, baryum et cuivre	93	>100T (20K)	30000(77k)
	MgB ₂	Diboride de magnésium	39	15T (4.2k)	1000(5T .4.2)
BTc	NbSn	Niobium et étain	18.3	27T (4.2k)	1000(5T, 4.2k)
	NbTi	Niobium et titane	10	12T (4.2 k)	400(5T, 4.2k)

Tableau I.3 : Classification des supraconducteurs HTc et BTc les plus utilisés. [01]. [09]

I.5.2. Technologies de fils supraconducteurs.

Dans cette partie, nous présentons les technologies de fils supraconducteurs. Nous allons, dans un premier temps, classer dans un tableau, leurs méthodes de fabrication et leurs avantages. Puis, nous comparerons leurs performances et la température de refroidissement et des coûts de fabrication.

Par la suite nous dresserons un tableau sur les performances de ces fils et leur prix :

Fils	Performance	Prix ou couts)
<i>NbTi</i>	<ul style="list-style-type: none"> Le fil NbTi est le doyen des fils supraconducteurs. Sa maturité industrielle est indéniable. C'est un produit industriel standard et bon marché, avec des longueurs unitaires supérieures à 10 kilomètres. Ses performances sont excellentes sous champ magnétique pour réaliser un moteur. Par contre, il ne fonctionne qu'à très basse température : 4,2 K.[11] 	1€/kA/m à 3T Ou 7€/1kA/m à 9T à 4.2 K
<i>BSCCO</i>	<ul style="list-style-type: none"> Les fils BSCCO, existent pour des applications en courants alternatifs et continus. Ces fils sont industriellement mûrs et produits en longueurs kilométriques. Ils sont prévus pour fonctionner entre 20 K et 50 K pour avoir une densité de courant suffisante. Le fil est aisé à mettre en œuvre [11]. Son principal défaut si qu'il doit être composée en grande partie d'argent. Cela induit de fortes répercussions sur les coûts de fabrication [02] ; son coût est élevé 	220€/kA/m à 77 K
<i>YBCO</i>	<p>Le fil YBCO est un fil supraconducteur à haute température. Il est probablement le plus prometteur en termes de densité de courant.</p> <p>Par contre, il n'est pas mûr industriellement. Il est produit en centaines mètres seulement. Le bobinage est particulièrement complexe à réaliser en raison de la fragilité du fil. Par ailleurs, ce fil ne supporte pas d'imprégnation [11].</p>	220€/kA/m à 77 K
<i>MgB2</i>	<ul style="list-style-type: none"> Le dernier fil découvert est le MgB₂ ; ce sont des fils utilisables aussi bien en alternatif qu'en continu. Ce fil est actuellement produit en grandes longueurs et ne pose aucun problème de bobinage. Sa température de fonctionnement se situe entre 10K et 20K ce qui est faible. Malgré cela, ce fil est 	10€/kA/m sous 2T à 20K.

	extrêmement prometteur pour des applications en électrotechnique.[11]	
--	---	--

Tableau I.4 : Fils supraconducteurs, leur performance et prix [01]. [03]

I.6.Applications et utilisation des fils supraconducteurs

Il existe plusieurs domaines concernant les applications des supraconducteurs vu que ces matériaux sont très intéressants malgré la nécessité de les maintenir à de très basses températures ; de nombreux chercheurs ont utilisé ces matériaux dans plusieurs domaines électriques de fortes puissances.

La disparition des pertes Joule et l’augmentation des densités de courant permettent l’amélioration des rendements et l’augmentation des puissances volumiques des dispositifs électriques. [05].

Nous présentons, dans ce tableau, les applications essentielles des supraconducteurs dans le domaine de l’électrotechnique.

Applications	Anciennement	0	Nb Ti	Nb Sn	BSCCO	YBCO	MgB2
	Actuellement	×					
Médical			×				×
Aimant for champ			×	×		×	
Limiteur de courant					0	×	
SMES			×		×		
Lévitacion magnétique					×		
Câble de transport					×	×	
Transformateur			0		×	×	×
Volants inertiels					×	×	×
Moteurs électriques			0		×	×	×

Tableau I.5 : matériaux supraconducteurs pour des applications en électrotechnique [12]

I.7.Marché des cryo-fluides

Les fluides	dans l’aire	Tc(k)	performance
Hélium	5,3.10⁻⁶	4.2 k	<ul style="list-style-type: none"> •Très utilisé dans les domaines de mesures physiques à basse température, des supraconducteurs. •Coût de plus en plus élevé (de 3.3€ à 10€/litre selon la quantité)

			•Provient des puits de gaz naturel (USA, Algérie, Pologne...)
Azote	0,78	77 k	<ul style="list-style-type: none"> • bon marché (environ 0,1 €/litre) • distribué industriellement par camion-citerne calorifugé en tout point de stockage. • bonne chaleur latente de vaporisation (210 kJ.kg-1) utilisation facile et peu contraignante (son transfert peut s'effectuer avec un minimum de calorifugeage, boîte en polystyrène...)
oxygène	0,21	90.2 k	<ul style="list-style-type: none"> • peu utilisé en cryogénie • risques liés à sa forte réactivité
Argonne	9,6.10⁻³	87.3 k	Utilisé dans les calorimètres de détecteur Coût assez élevé (≈ 8 €/litre)
néon	1,8 .10⁻⁵	27.1k	utilise dans la lumière. Dix fois plus cher que l'hélium
hydrogène	5.10⁻⁷	20.3 k	<ul style="list-style-type: none"> • très largement employé dans les années 60, moins utilisées actuellement. • l'hydrogène existe sous 3 variétés : isotopiques ; hydrogène (H2), deutérium (HD et D2 :1 neutron en plus par noyau), tritium (2 neutrons par noyau).
Crypton	1,1.10⁻⁸	119.9k	Utilisé dans les calorimètres de détecteur

Tableau I.6 : Marchés des cryo-fluides [13]

Les domaines d'utilisation de ces fluides cryogéniques peuvent être résumés de manière simple :

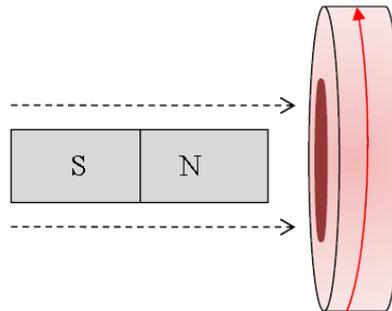
- pour les températures les plus basses ; inférieur à 0.1 k on utilise l'hélium 3
- pour les températures comprises entre 1.8 et 4.2 k qui conviennent essentiellement pour l'utilisation de matériaux supraconducteurs à basse température, l'hélium 4 est le seul fluide utilisé
- pour les basses températures entre 65k (températures de congélation de l'azote) et 20 k l'hélium est le gaz le plus utilisé à l'heure actuelle ; l'azote est surtout utilisé pour les applications dont les températures varient entre 65 et 77k [14].

I.8. Écrans supraconducteurs

Lorsqu'on a refroidi un matériau supraconducteur hors d'un champ magnétique, ce matériau est repoussé les lignes de champs magnétiques, c'est-à-dire que le matériau est bloqué les

lignes de champs magnétiques (jusqu'à une certaine valeur de champ) cela c'est la forme de blindage.

La figure (I.9) présente une bague conductrice et un aimant permanent, lorsque l'aimant se déplace le courant se développe dans la bague pour obtenir une variation de flux qui génère une force qui se pose au mouvement de l'aimant.



FigureI-9. Principe du blindage par un supraconducteur massif [03]

Si la bague conductrice est remplacée par un matériau supraconducteur, des courants sont également produits et des forces sont également opposées au mouvement de l'aimant.

Dans les supraconducteurs, les courants induits ne s'amortissent pas. En conséquence, le supraconducteur refroidi dans un champ magnétique nul tend à garder un champ nul dans son volume et donc, tout champ imposé est alors repoussé et les lignes d'induction contournent le matériau et cela constitue le principe du blindage ou de l'écrantage. [03]

CONCLUSION

La supraconductivité est la propriété que possèdent certains matériaux de conduire le courant électrique sans résistance à des conditions et des grandeurs limitées, ce qu'on appelle la surface critique qui se compose de la température critique T_c , champ critique H_c et de densité de courant critique J_c . il y a 2 types de matériaux supraconducteurs : le type I et le type II ; les supraconducteurs ont des propriétés physiques comme la résistivité est nulle, le champ magnétique \vec{B} intérieur est nul si on refroidit à la température T_c (l'effet MESSNER) et la surface critique (T_c, H_c, J_c),

Les supraconducteurs se composent aussi de deux familles (basse température BT_c et haute température HT_c) et on parle aussi sur fil de HT_c de supraconducteur ($BSCCO$, $YBCO$, MgB_2) et leur performance, ces matériaux supraconducteurs sont refroidis par des liquides cryogéniques (Hélium, Azote, Hydrogène, ...).

CHAPITRE II :

LES MACHINES

ÉLECTRIQUES

SUPRACONDUCTEURS

Introduction.

Les machines électriques jouent un très important rôle dans la conversion d'énergie dans plusieurs applications et plusieurs domaines. Il existe trois types principaux classés en fonction de la direction de flux : machines à flux radial, machines à flux axial et machines à flux transversal. Les machines à synchrones à flux radial ne présentent pas de difficultés à les fabriquer ; on peut utiliser deux structures à rotor interne ou à rotor externe.

On a aussi la machine à flux axial qui a un flux parallèle à l'axe de rotation ; les machines à flux axial ont une faible longueur et un fort couple massique qui a une importance dans les applications intégrées.

Il existe aussi des machines supraconductrices à un rotor composé d'un enroulement de supraconducteurs dans le rotor et le stator en cuivre classique. Cette machine possède un très bon rendement et une très bonne compacité.

II.1.Topologie des machines électriques

Les topologies des machines électriques potentiellement candidates sont nombreuses et variées. Un premier peut être opéré en fonction de la direction du trajet du flux principal au niveau du stator et de l'entrefer des machines [15]. Pour les machines synchrones à aimants permanents, il existe trois types de structures : structure à flux radial, structure à flux axial et structure à flux transverse [16].

- **Flux radial** : pour lesquelles le flux principal est le flux dans l'entrefer est radial (ou perpendiculaire) à l'axe de rotation de la machine figure (II.1)
- **Flux axial** : le flux dans l'entrefer est axial (ou tangentiel) à l'axe de rotation de la machine figure (II.2).

Ces deux types de machines sont parfois qualifiés de machines longitudinales

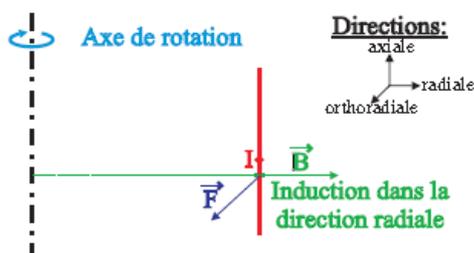


Figure II.1 : Principe de fonctionnement de la machine de la Machine à flux radial [17]

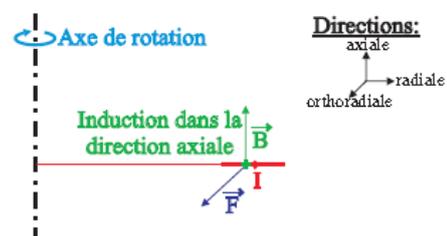


Figure II .2: Principe de fonctionnement à flux axial [17]

- **Flux transverse** pour lequel le trajet du flux est transversal ou perpendiculaire au sens du déplacement [15]

Les machines à flux radial sont les plus répandues et les plus utilisées [16].elles sont couramment employées pour les alterno-démarrateurs des véhicules hybrides comme la Honda Insight [15].

Pour la machine à flux axial, elle a des applications très spécifiques, telles que l'entraînement direct et les vitesses lentes et leur fort couple massique et la faible inertie du rotor en font un candidat potentiel. [15]

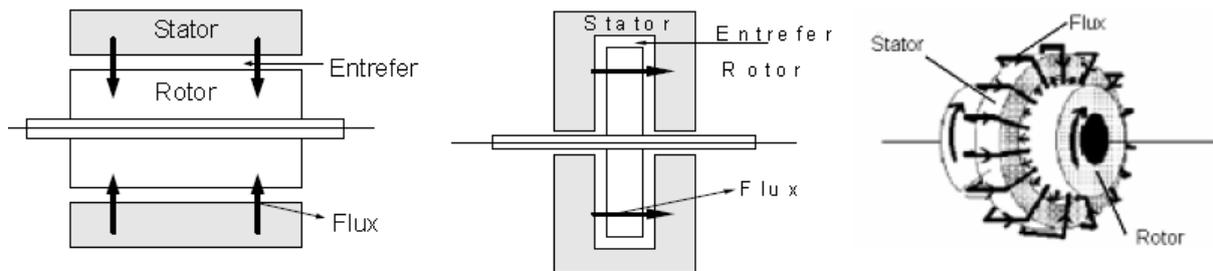


Fig. II.3 : Direction du flux radial **Fig. II.4 :** Direction du flux axial **Fig. II.5 :** Direction du flux transverse [16]

II.2. Bobinages.

Dans la littérature scientifique, il existe trois principales façons de bobiner une machine électrique quelle que soit la direction du flux (radial ou axial) : le bobinage réparti (ou distribue), le bobinage concentre (ou sur dents) et le bobinage en anneau Gramme [16]. Le bobinage réparti (figure II.6 et figure II.9) est le bobinage le plus utilise dans l'industrie, le bobinage concentré (ou sur dents .figure II.7 et figure II.10) et le bobinage en anneau Gramme (figure II.8 et figure II.11), ces trois types de bobinage pour quelle que soit la direction du flux dans la machine.



Fig. II.6 : Bobinage réparti pour machine à flux radial.[16]



Fig.II.7 : Bobinage concentré pour machine à flux radial. [16]

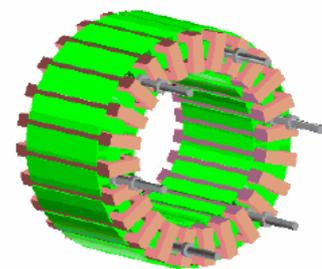


Fig. II.8 : Bobinage Gramme pour machine à flux radial [16]



Fig.II.9 : Bobinage réparti pour machine à flux axial [16].



Fig.II.10 : Bobinage concentré pour machine à flux axial [16].

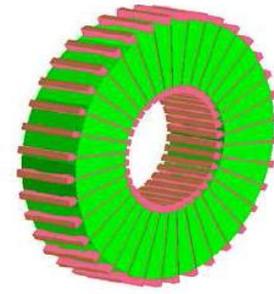


Fig.II.11 : Bobinage Gramme pour machine à flux axial [16].

II.3. Machines à flux radial.

II.3. 1. Machines à flux radial conventionnel.

Historiquement, la machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue dans l'industrie. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la performance des aimants permanents, elle commence à supplanter la machine asynchrone. La première machine synchrone à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est réparti et les aimants placés en surface [16].

Les machines à synchrone à flux radial ne présentent pas de difficulté de fabriquer ; on peut utiliser le bobinage de type concentré pour minimiser les pertes Joule ces ; machines utilisent couramment pour l'entraînement direct.

Structures de la machine synchrone conventionnelle.

La machine synchrone à flux radial est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure II.12). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés ou enterrés. [18]

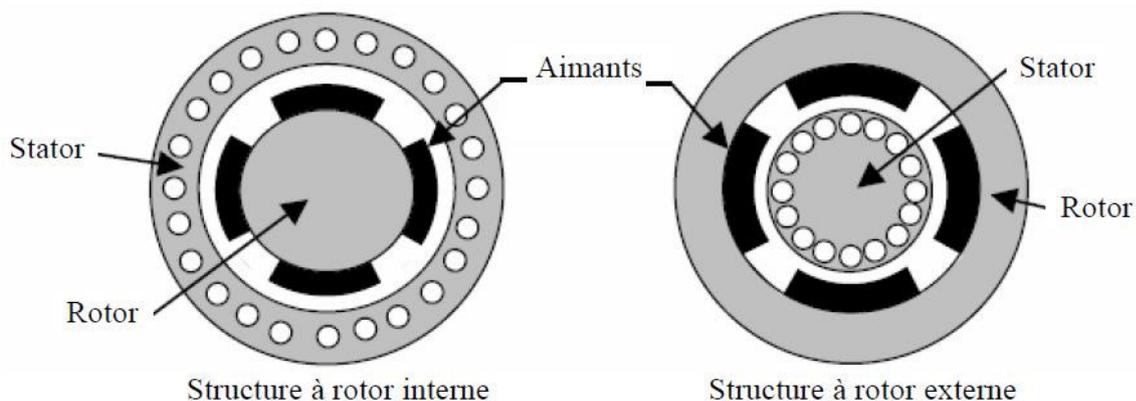


Figure II.12 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe. [18]

II.3.2. Machines électriques supraconductrices.

II.3.2.1 pourquoi utiliser les supraconducteurs ?

Les machines électriques conventionnelles utilisent ce composé de cuivre, de fer et d'aimant permanent, elle possède un très bon rendement et une très bonne compacité ; ces machines sont utilisées de manière optimale afin de fournir les meilleures performances possible.

Cependant, aujourd'hui il existe des nouvelles applications embarquées, telles que la propulsion marine ou l'éolien, exigeant un gain en compacité et en rendement supplémentaire qu'il est impossible à obtenir avec les limitations technologiques que l'on connaît sur les machines conventionnelles. [01]

Donc, il est nécessaire de trouver une nouvelle machine ou une nouvelle variable de conception issue d'un saut technologique qui utilise des matériaux supraconducteurs dans les machines électriques, ces matériaux permettent d'augmenter la densité de courant ; dans la machine, et diminuent les pertes Joule. La différence entre la machine conventionnelle et la machine supraconductrice si l'utilisation des matériaux supraconducteur dans le rotor de la machine. Figure(II.13).

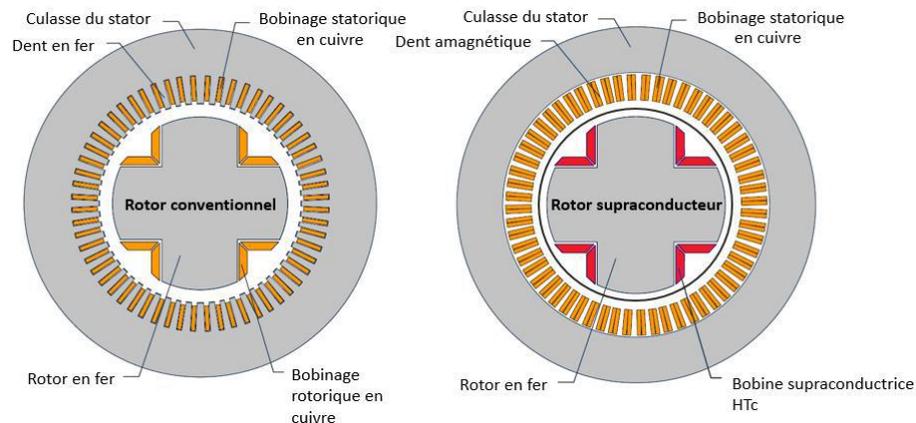


Figure (II.13) : Comparaison entre une machine conventionnelle (a) et supraconductrice (b).[01]

II.3.2.2. Machines synchrones supraconductrices à flux radial.

La plupart des réalisations industrielles des machines électriques supraconductrices sont des moteurs synchrones à flux radial. Ces machines supraconductrices sont basées sur une conception similaire aux machines synchrones classiques à pôles saillants [03].

Le rotor de ces machines est composé par un enroulement d'excitation supraconducteur et l'induit se réalise en général par le cuivre classique. La fabrication d'une machine supraconductrice se développe de moteur avec un champ dans l'entrefer de plus de 2 T et un rendement proche à la machine conventionnelle classique.

II.3.2.2.1 Alternateurs synchrones supraconducteurs à flux radial :

Les générateurs électriques à bobinages supraconducteurs ont un rendement beaucoup plus élevé, proche de 99 % contre un rendement de 50 % pour un alternateur conventionnel .de plus sa taille est diminuée de moitié par rapport à un générateur conventionnel. [12]

Le circuit magnétique conventionnel a deux limites principales :

- ne supporte pas une induction magnétique de plus de 2 T dans l'entrefer (saturation de fer)
- leur poids et l'enroulement sont plutôt contraignants.

Donc, on utilise les câbles supraconducteurs à l'inducteur bobiné pour avoir un champ magnétique très important dans l'entrefer de la machine.

Toutes les structures proposées se trouvent dans les topologies classiques à l'inducteur supraconducteur tournant, donc à cryostat tournant en fluide cryogénique par l'axe de rotation.

II.3.2.2.2 Moteurs synchrones 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. [19]

La machine supraconductrice a une conception similaire comme la machine synchrone classique conventionnelle à pôles saillants à flux radial. Le rotor est composé d'un enroulement de supraconducteur et l'induit du stator est formé en cuivre classique.

L'avantage principal des moteurs supraconducteurs, c'est les champs magnétiques qui peuvent créer dans l'entrefer sans aucune perte. Mais il faut calculer le cout de la réfrigération des câbles supraconducteurs. La seule perte dans ce moteur, ce sont les pertes de chaleur avec l'extérieur du cryostat qui doit être composé par un système de réfrigération.

Le moteur supraconducteur a les caractéristiques suivantes : [12]

- les enroulements supraconducteurs DC doivent créer un grand champ magnétique B_{gmax} .
- une structure « air » par opposition à une structure « fer » comme sur les moteurs conventionnels afin d'éviter la saturation du noyau de fer et limiter les pertes fer dans un grand champ magnétique.
- enroulements statoriques de cuivre pour avoir le courant j_{bmax} similaire au moteur conventionnel.

Les avantages d'un moteur supraconducteur par rapport à un moteur conventionnel si :

- le champ magnétique crée B_{gmax} . Par les bobines supraconductrices sans perte est très fort.
- il a un très bon rendement par rapport à un moteur conventionnel.



Figure II.14 : Moteur HTc de propulsion de navire 36,5 MW construit par AMSC [19]

II.3.2.2.2.1.L'induit :

Deux principes de conception différents existent pour l'enroulement non supraconducteur au stator.

Un bobinage classique en cuivre avec des dents en fer est adopté pour les générateurs HTc avec une induction d'entrefer de l'ordre 1,2 Tesla.

Un autre type de bobinage appelé : « bobinage à air » ou « bobinage dans l'entrefer » est utilisé pour les différentes réalisations de moteur HTc de quelques mégawatts (moteurs fort couple et basse vitesse). L'usage des dents en fer n'est pas justifié à cause des inductions d'entrefer élevées (2 Tesla).

En général, ces stators sont refroidis par une circulation d'air forcé ou d'un liquide : eau déminéralisée/huile. La Figure II.15 montre le stator de la machine supraconductrice de Siemens: 400kW-1500 tr/min. Le refroidissement est assuré par une circulation d'air forcé. [19]

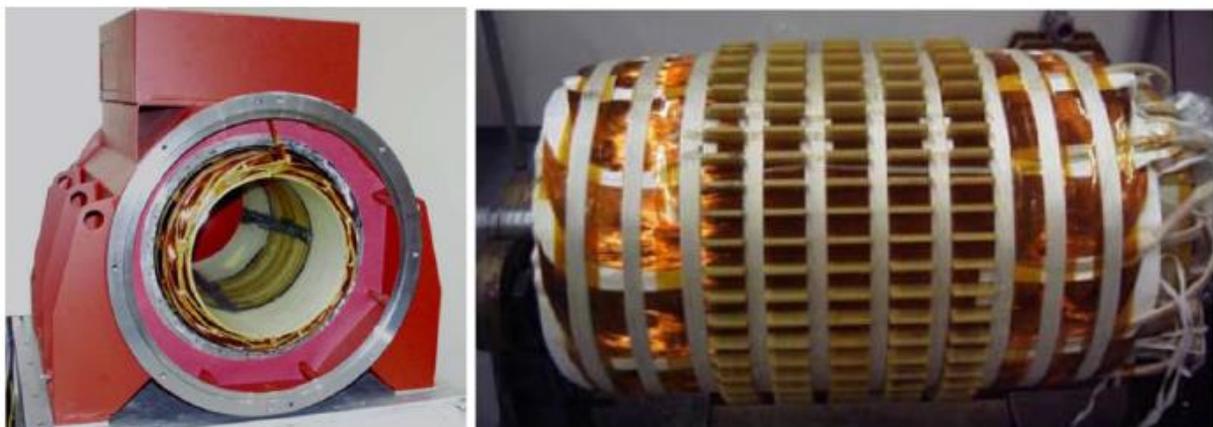


Figure II.15 : Induit à air de la machine Siemens AG : 400kW-1500 tr/min [19].

II. 3.2.2.2.2.L'inducteur :

L'inducteur supraconducteur constitue la partie froide du système, généralement refroidi aux

environs de 25-30K. Afin d'atteindre cette température de fonctionnement, on utilise un Cryoréfrigérateur, couplé à un échangeur thermique et un système de circulation de gaz (Néon ou Hélium gazeux).

La conception du rotor diffère selon le choix d'utiliser ou non du fer dans la partie froide. Les rotors sans noyau ferromagnétique sont appelés rotors à air, « ironless rotor ».

On a distingué deux types d'inducteurs : celui dont le noyau est à température cryogénique et celui où seuls les enroulements sont à basse température tandis que le noyau est à température ambiante. L'utilisation du fer dans l'inducteur, qui sert de circuit magnétique pour canaliser le flux est souvent considérée comme un moyen de réduire la quantité de matériau supraconducteur HTc requise. [19]

II.3.3. Comparaison entre une machine conventionnelle et supraconductrice.

Nous avons noté la différence entre une machine supraconductrice et une machine conventionnelle [1] :

- Le bobinage en cuivre du rotor est remplacé par un bobinage supraconducteur.
- Le champ magnétique dans l'entrefer passe de 1 T à 2 T.
- Les dents statoriques sont amagnétiques.
- L'absence de dent ferromagnétique au stator permet de doubler le volume de cuivre.
- pertes Joule au rotor quasi nulles.
- pertes fer au stator réduit par l'absence des dents ferromagnétiques.
- augmentation des pertes Joules au stator.
- ajout de pertes issues du système cryogénique :

Le tableau suivant offre un récapitulatif en per unit ($p. u$) et montre la différence entre les deux machines [1] :

Type de machine	Conventionnelle	Supraconductrice
Ampère tours stator	1 $p. u$	2 $p. u$
Induction dans l'entrefer	1 T	2 T
Couple / Puissance	1 $p. u$	4 $p. u$
Pertes stator	1 $p. u$	2 $p. u$
Pertes rotor	1 $p. u$ (pertes Joule)	0 $p. u$ (pertes Joule) + Cryogénie
Pertes fer	1 $p. u$	< 1 $p. u$

Tableau II.1: Comparaison entre machine conventionnelle et machine supraconductrice. [01]

II.3.4. Avantages et inconvénients des machines à flux radial :

L'augmentation ces dernières années de la variété des nuances d'aimants permanents nous a conduits à retenir cette approche. Même si elle apparaît de prime abord comme utopique, cette méthode simple dans son principe se prête bien à l'optimisation : il est donc possible de travailler avec un certain nombre choisi de nuances d'aimant puis d'examiner les solutions possibles en s'imposant un nombre donné d'aimants à placer sous un pôle.

Cette solution est adaptée aux machines de très fortes puissances [20].

Le diamètre de rotor est plus grand que les machines conventionnelles donc elles permettant d'avoir un nombre de pôles plus élevé et d'un couple plus grand .La machine radiale de rotor externe est moins utilisée parce qu'elle est difficile à réaliser et nécessite d'un grand volume d'aimant. On a une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible [06]

Autre avantage de la machine radiale supraconductrice

-Diminution de volume et de poids de la machine supraconductrice : c'est à dire diminution du cout de fabrication de ce type de machine .Rendement de ces machines plus élevé que les machines conventionnelles.

Les machines supraconductrices sont beaucoup silencieuses et la faible d'échauffement (pertes joule sont nulle)

II.4. Machines à flux axial (AFM).

II.4.1 Machines à flux axial (AFM) conventionnel.

L'histoire des machines électriques démontre que la première machine électrique inventée par Faraday en 1821 a plus ou moins la forme d'une machine à flux axial. Toutefois, il a fallu attendre la fin des années 1970 pour que les machines axiales donnent lieu à de nouvelles études ou brevets [15].Les machines à flux axial ont une faible longueur et un fort couple massique qui est très important dans les applications intégrées. Les machines à flux axial ont été principalement étudiées pour réduire l'encombrement de la motorisation des éoliennes et des véhicules électriques. Ainsi, les puissances massiques et couples massiques ont pu être avantageusement augmentés [16].elles se composent d'un où plusieurs disques fixes bobinent et d'un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Elle est appelée aussi machine discoïde [06] ; le champ magnétique dans une machine à flux axial circule , se forme parallèle à l'arbre ;elles peuvent présenter une puissance volumique très importante et plus grande compactée par rapport ou autre machine.



Figure II.16 : Machine à flux axial ou discoïde [06].

II.4.1.1. Machine synchrone à flux axial.

La machine synchrone à flux axial est composée de disques fixes maintenant des bobinages et de disques mobiles maintenant des aimants permanents. Ces disques sont en vis-à-vis, le flux provenant des aimants est axial. Plusieurs configurations de machines à flux axial sont présentées: simple face, doubles rotors, doubles stators et multi stators. Les bobinages statoriques peuvent être bobinés en tores ou en pétales. La principale difficulté de ces structures est la contrainte mécanique liée aux fortes forces axiales, d'origine magnétique, exercées entre les rotors et les stators. [03]

II.4.1.2.les structures d'une machine à flux axial.

II.4.1.2.1.Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor.

La première machine à flux axial apparue est une structure comprenant un rotor et un stator (figureII.17).

Le fonctionnement de ce type de machine est basique [16]: le flux créé par un bobinage réparti classique présent au stator va interagir avec le flux des aimants permanents collés en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique ; cette machine a un grand problème d'attraction entre stator et rotor, c'est pour cette raison qu'on impose des ajouts mécaniques lourds et couteux.

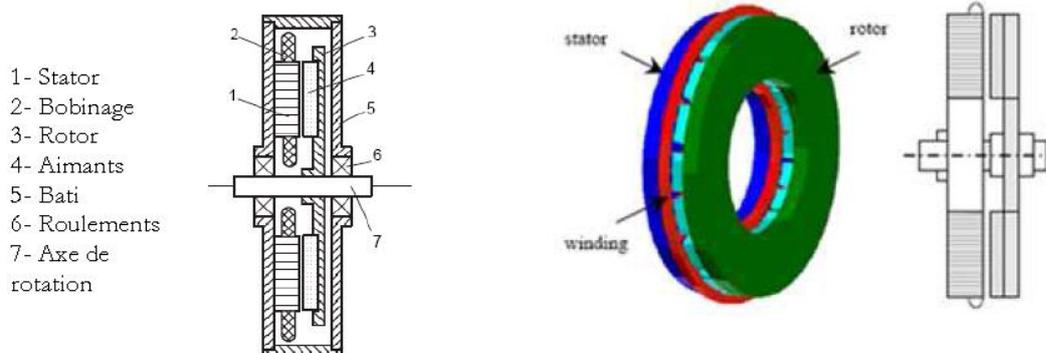


Figure II.17 : Machine à flux axial 1 stator / 1 rotor. [16]

II.4.1.2.2. Machines à flux axial à stator interne ou externe

Pour remédier à ce problème d'attraction axiale, les concepteurs se sont penchés sur des machines équipées de deux entrefers communément appelées à stator interne ou stator externe. La machine à flux axial est bien adaptée à ce genre de concept [16]. Pour rééquilibrer les forces d'attraction entre les pièces actives de la machine, on utilise deux rotors ou de deux stators permettant aussi de diminuer le risque d'attraction entre le stator et le rotor et d'obtenir de bons résultats en termes de couple et de puissance de ces machines.

- 1- Stator
- 2- Bobinage
- 3- Rotor
- 4- Aimants
- 5- Bati
- 6- Roulements
- 7- Axe de rotation

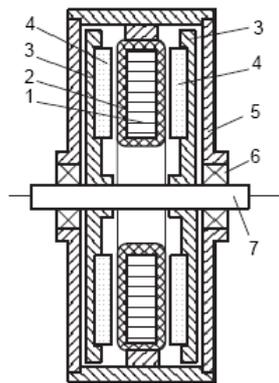


Fig. II.18 : Descriptif de la machine à flux axial stator interne [16].

- 1- Stator
- 2- Bobinage
- 3- Rotor
- 4- Aimants
- 5- Bati
- 6- Roulements
- 7- Axe de rotation

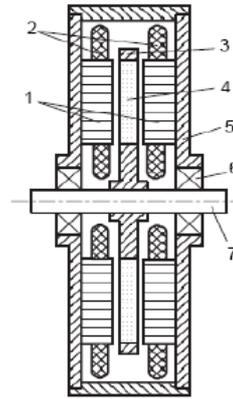


Fig. II.19 : Descriptif de la machine à flux axial stator externe [16].

Pour les machines discoïdes dont le stator est interne, le fonctionnement de cette machine dépend de l'emplacement des aimants permanents. Ces machines parfois appelées machines Torus [16]

On peut distinguer deux types des machines discoïdes : le type NS (Figure II.20), c'est-à-dire que les aimants placés face à face sont de polarité différente, la machine Torus de type NS, de par l'emplacement de ces aimants et du bobinage repartit utilise, permet au flux de seulement traverser la culasse du stator et de réduire les pertes fer de la machine. En revanche, les têtes de bobines de ce bobinage engendrent une augmentation des pertes Joule., les concepteurs de ce type de machines vantent leur rendement et leur puissance massique [16].

Le type NN (Figure II.21), c'est-à-dire que les aimants placés face à face sont de même polarité. Pour correspondre avec le flux créé par les aimants, la machine Torus type NN est munie d'un bobinage de type Gramme encoche ou non. Par conséquent la culasse du stator doit être importante, car c'est à cet endroit que le flux va se reboucler. Les pertes fer sont donc importantes dans ce type de machine. Pour réduire ces pertes fer, il est possible de réduire la culasse du stator.[16]

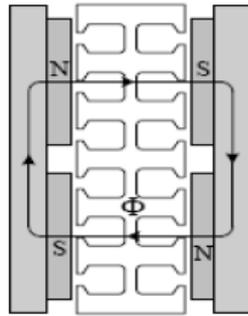


Fig.II.20 : Directions du flux d'une machine Torus type NS [16]

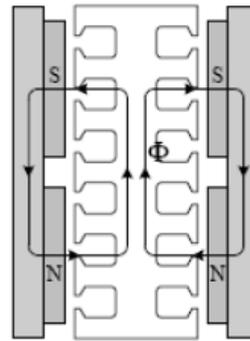


Fig.II.21 : Directions du flux d'une machine Torus type NN [16]

Avec des performances similaires, il existe aussi une machine composée de deux stators et d'un rotor central ou machine discoïde à stator externe. ; le rotor, central, voit le flux créé par le bobinage du stator, le traverser [12].

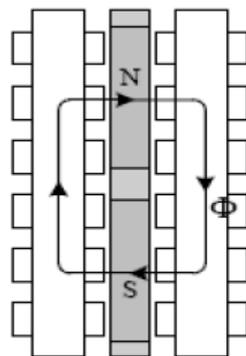


Fig.II.22 : Directions du flux d'une machine à stator externe non encoché [16]

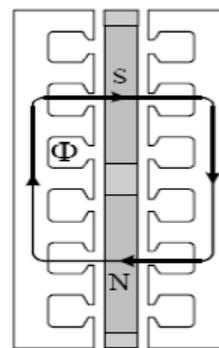


Fig.II.23 : Directions du flux d'une machine à stator externe encoché [16]

II.4.1.2.3 Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques

Ces machines s'appellent des machines multiniveaux (Figure II.25) ; pour augmenter la puissance ou le couple de la machine, il suffit d'ajouter sur le même axe de rotation un nouveau stator et rotor. Le principe global de fonctionnement reste identique aux machines discoïdes à simple ou double entrefers. La plupart du temps les machines à flux axial multi-disques sont à stator interne. Il est donc possible de réduire au minimum la culasse du stator. [16]

Les inconvénients de cette machine sont la nécessité d'ajouter des renforts mécaniques contre l'attraction magnétique stator / rotor et il est difficile de bien aligner sur le même axe les différents étages de la machine. La machine multi-disques est utilisée pour des applications où la puissance demandée est très importante, comme les applications à grandes puissances telles que l'éolien ou pour la traction ferroviaire.

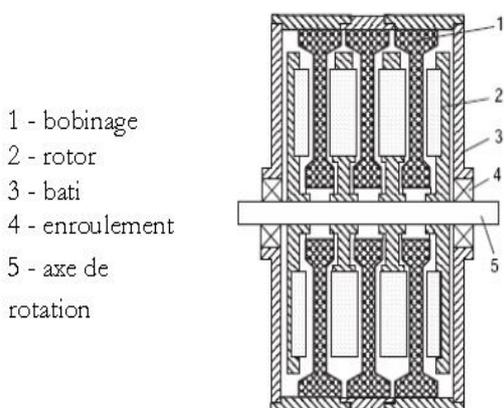


Fig.II.24 : Descriptif de la machine à axial stator interne [16]

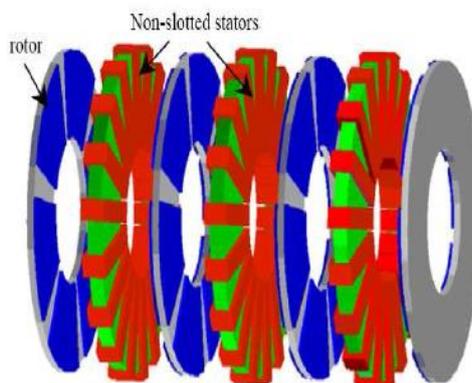


Fig.II.25 : Machine à flux axial multi flux niveaux [16]

II.4.1.2.4 Machines à flux axial à bobinage sur dents

Moteurs avec bobinage sur dents (Figure.II.26) ; en plus de réduire les pertes Joule dues au bobinage, ce dernier permet aussi de gagner en encombrement [16].

Ainsi, ces machines sont utilisées pour obtenir une meilleure puissance massique et aussi un meilleur rendement. Pour obtenir un bon fonctionnement de la machine, l'étude de la façon de bobinage est très importante : elle dépend du nombre de pôles et d'encoches que le concepteur a choisies.

Avec ce type de bobinage, les structures globales restent les mêmes c'est-à-dire qu'il est possible de réaliser des machines discoïdes à bobinages sur dents avec un entrefer ou plusieurs entrefers [16].

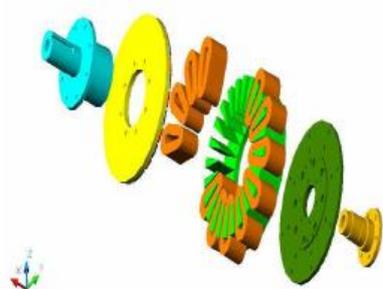


Fig.II.26 : Machine à flux axial 1 stator/1 rotor avec bobinage sur dents [16]

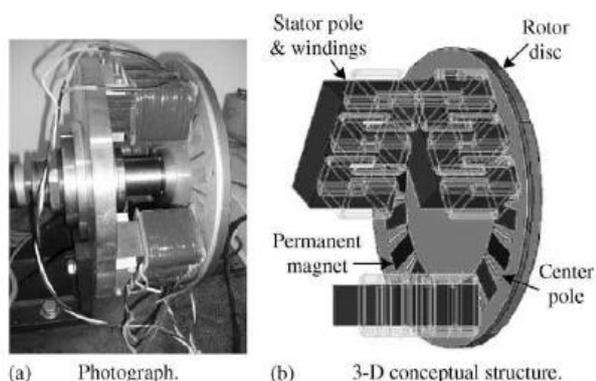


Fig.II.27 : Machine discoïde 1 stator / 1 rotor à bobinage sur dents et pôles centrés [16]

II.4.2.Machine synchrone supraconductrice à flux axial

La topologie d'une machine à flux axial permet d'envisager des machines à plusieurs entrefers .les plus utilisées sont à double entrefer. 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 globale.[12]

Les chercheurs ont proposé plusieurs structures. On distingue deux catégories :

- Les machines à flux axial avec bobines supraconductrices
- Les machines à flux axial avec des matériaux supraconducteurs passifs (bulks)

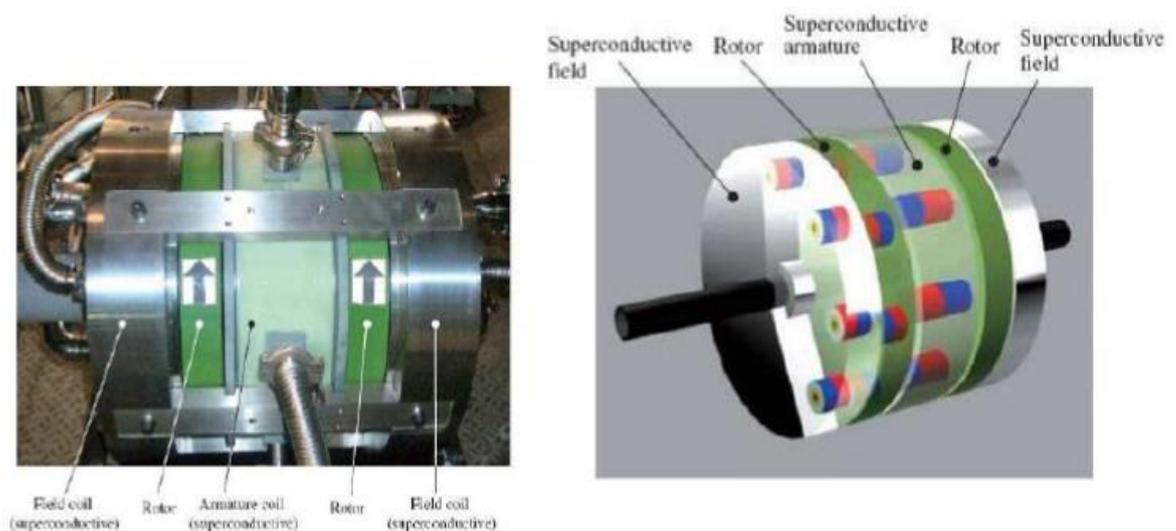
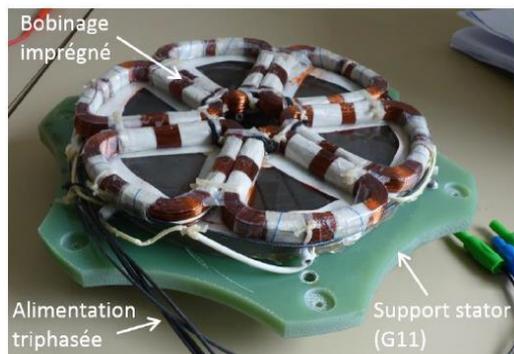


Figure II.28. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5 kW par IHI [03]

II.4.2.1.Machines à flux axial avec bobines supraconductrices.

C'est des machines qui comportent un inducteur supraconducteur fixe et un induit tournant avec bobinages en cuivre. Le système de refroidissement est un système cryogénique simple, utilisé à une température de 77 k avec l'azote liquide.

Le stator est composé de six bobines identiques en cuivre de forme sectorielle (Figure II.29). Quant à l'inducteur supraconducteur il est composé de huit bobines supraconductrices rondes disposées de part et d'autre de la culasse en fer (quatre pôles).figure (II.30) [01].



FigII.329 : Stator dans son état final. [01]

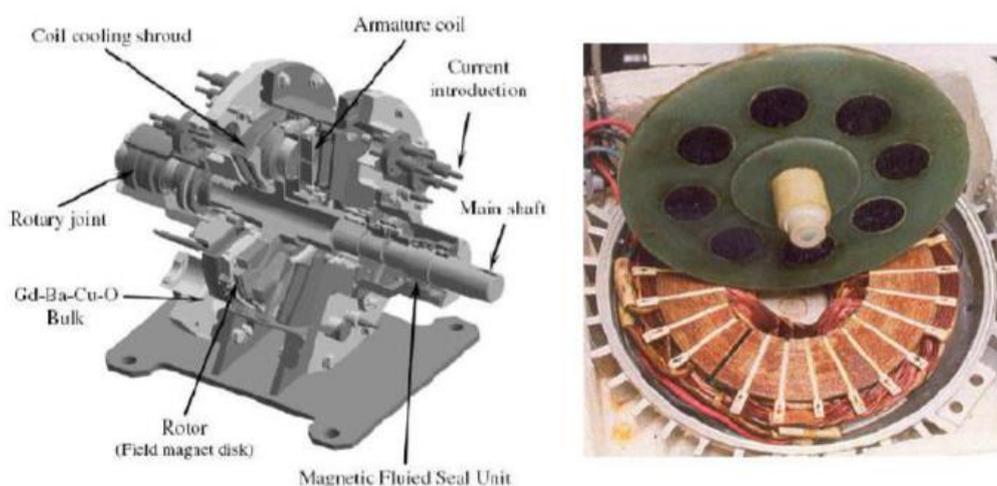


FigII.30 : Inducteur supraconducteur avec des bobines doubles couches dans l'entrefer du moteur [01]

II.4.2.2. Machines à flux axial avec des matériaux supraconducteurs passifs (bulks) .

C'est le prototype d'un moteur à flux axial, dont la partie supraconductrice est un inducteur tournant composé de pastilles en YBCO.

Les bulks sont dans un premier temps magnétisées, 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 la machine électrique .l'inducteur qui contient de huit pastilles d'YBCO refroidi dans un bain d'azote liquide [12]



FigII.31 : Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs, IHI[03].

II.4.2.3. Avantages/inconvénients.

Il est possible de moduler facilement le spectre de la force électromotrice avec cette structure qui est par ailleurs adaptée aux machines de faible puissance. En revanche, les machines à flux axial sont intrinsèquement de nature tridimensionnelle et donc plus difficile à modéliser. Par ailleurs, la réalisation d'un stator de machine à flux axial avec des tôles laminées est délicate surtout si ce stator doit contenir des encoches. La présence de ces dernières est nécessaire afin d'augmenter la valeur des constantes de temps. [20]

Conclusion.

On peut citer plusieurs topologies de machines électriques. Nous avons classé en fonction de la direction du flux (radial, axial et transversal), ces machines à trois types de bobinage (reparti, concentré et gamme).

Les structures de la machine à flux radial que nous avons présentées. Il existe un autre type de machine ce sont les machines supraconductrices à flux radial qui possèdent un très bon rendement et une très bonne compacité ; ces machines sont utilisées de manière optimale afin de fournir les meilleures performances possible.

Nous avons aussi présenté les machines à flux axial qui possèdent plusieurs structures (Machines à flux axial à un stator et un rotor, à flux axial à stator interne ou externe, à flux axial à stators multiples ou multidisques et à flux axial à bobinage sur dents) et il existe aussi des machines supraconductrices à flux axial qui ont un très bon rendement et faible volume qui portent des applications très importantes dans les domaines d'éolienne et de la marine.

CHAPITRE III :
SIMULATION
D'UNE MACHINE
SUPRACONDUCTRICE PAR
FEMM

Introduction :

À travers ce chapitre nous allons présenter Dans ce chapitre on a présenté quelques logiciels de simulation numérique qui sont utilisés en conception assistée par un ordinateur, elles sont très importantes dans plusieurs domaines scientifiques (math, électrotechnique, électronique, automatique.....) Nécessitant des moyens de calcul important,

Aux deuxièmes parties de ce chapitre, nous présentons les différents composants d'une machine supraconductrice à flux axial, ensuite on fait des essais sur cette machine à chaud et à froid

A la fin nous allons faire une simulation de la machine et leur inducteur pour obtenir une variation de flux.

III.1. Les logiciels de simulation :**III.1.1. Le logiciel COMSOL**

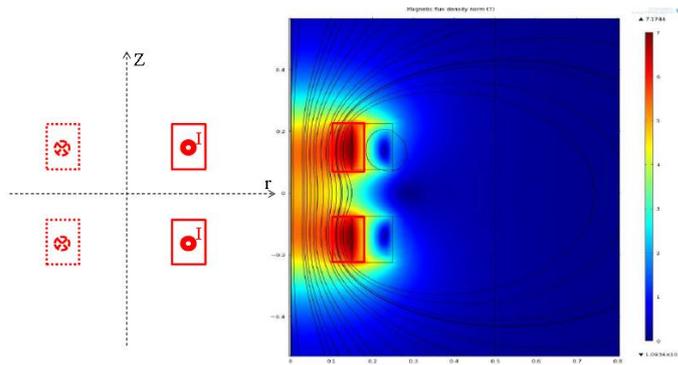
Est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par un ordinateur, basé sur la méthode des éléments finie, ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie [24].

Dans cet exemple [03] va étudier une structure très simple qui est composée de deux solénoïdes seuls sans écran supraconducteur et sans matériau ferromagnétique, ensuite il a effectué des calculs, utilise plusieurs méthodes : analytique et numérique.

Nous avons basé sur la méthode numérique.

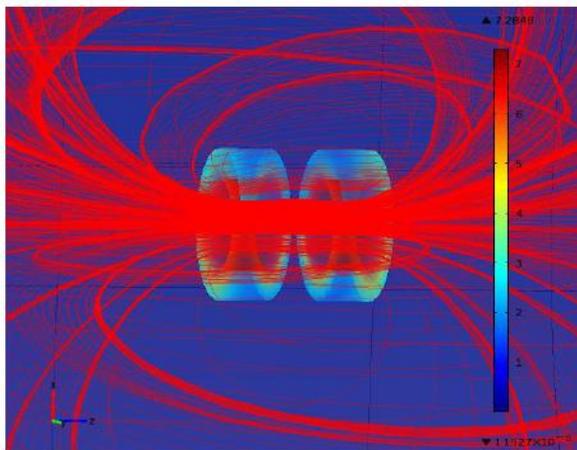
Dans cette méthode il va utiliser le logiciel COMSOL qui sert pour le calcul du champ magnétique.

Il va effectuer les calculs 2D pour paramètres de la structure il a utilisé le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 2D. (Figure II.1). Il va alors choisir un problème 2D axisymétrique stationnaire, ensuite réaliser la géométrie de la structure et déterminer les matériaux utilisés puis le maillage. Enfin lancer le calcul pour avoir les valeurs du champ magnétique.[03].



Figure(III.1). La distribution de champ magnétique en utilisant COMSOL 2D[03]

Pour calculer en 3D il a utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics 3D figure (II.2).



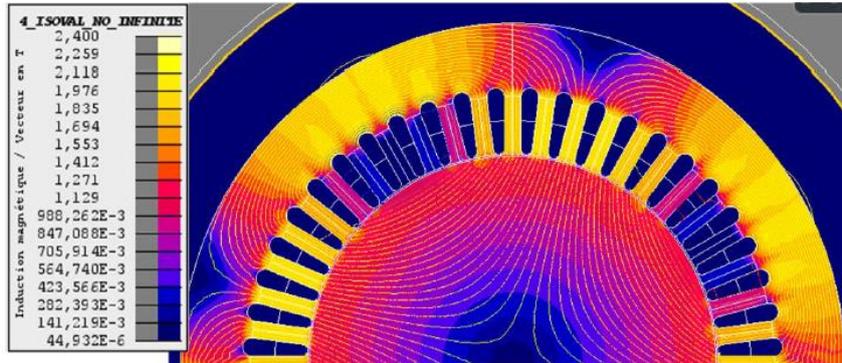
Figure(III.2). Modélisation 3D sous COMSOL[03]

III.1.2. Les logiciels FLUX 2D/ FLUX 3D :

Ce sont des logiciels de simulation numérique utilisée en conception assistée par un ordinateur, il utilise la méthode des éléments finie et permet de calculer des états magnétique, électrique et thermique

III.1.2.1.FLUX 2D

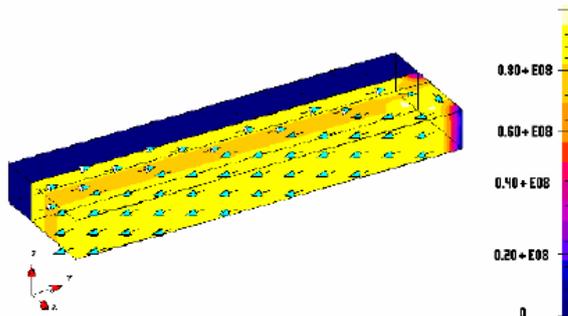
Dans cet exemple dans la thèse [23] pour expliquer les trajectoires des lignes de champs magnétiques dans un moteur, il a fait une simulation par le logiciel FLUX 2D, cette simulation permet de visualiser lignes des flux d'une part et le niveau d'induction d'autre parte. [23]



Figure(III.3) : Induction et lignes de flux dans le stator avec rotor plein [23]

III.1.2.2 .FLUX 3D : Dans cette thèse [25] l'exemple étudié c'est le couplage des filaments supraconducteurs à travers la matrice résistive au sein d'un brin HTC multi filamentaire [25] .Il a utilisé le logiciel FLUX 3D pour la simuler.

La Figure (II.4) montre la réponse de l'ensemble filaments supraconducteurs et matrice à un champ magnétique extérieur H dirigé selon l'axe z . Elle donne la densité de courant (vecteur et dégradé en A/m^2) lorsque le champ extérieur est maximum de fréquence de 50 Hz. Les filaments supraconducteurs sont parcourus par leur courant critique. La longueur critique calculée est de 0,13 mm [25]



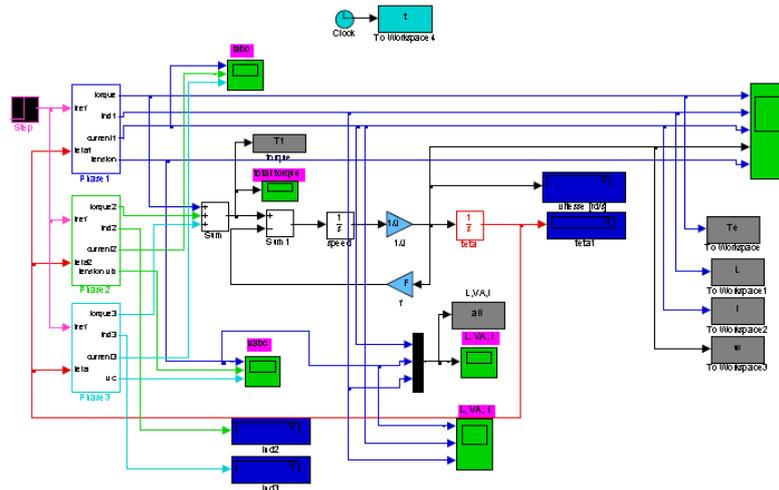
Figure(III.4). Dégradé de J pour le cas des filaments couplés, $f=50$ Hz [25]

III.1.3.MATLAB/SIMULINK

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement de SMULINK permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs [22]. Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (Les "Toolboxes") utilisé pour plusieurs domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants.

Dans ce modèle de simulation, [22] pour simuler une machine à réluctance variable avec sa commande à hystérésis et en tension, il utilise le logiciel MATLAB/SIMILINK pour assembler un bon compromis et trouver bons résultats.

Schémas bloc de simulation



Figure(III.5) : Diagramme de simulation par des Schémas bloc [22]

III.2 Modélisation magnétique d'un inducteur d'une machine à flux axiale.

Pour assurer le bon fonctionnement de cette machine, nous avons simulé cette machine au moyen d'un logiciel qui s'appelle FEMM. Ce logiciel est un ensemble de programmes pour résoudre des problèmes électromagnétiques.

III.3. Etude d'une bobine en cuivre.

Nous avons dans cet exemple une bobine en cuivre à un noyau de l'air avec le logiciel FEMM. (Voir la figure (III.6)).

Les dimensions de ce solénoïde :

$$R_{\text{int}} = 50\text{mm}$$

$$R_{\text{ext}} = 120\text{mm}$$

$$J = 3\text{A/mm}^2$$

$$-J = -3\text{A/mm}^2$$

$$L = 50\text{mm}$$

Ces dimensions de cette bobine sont données

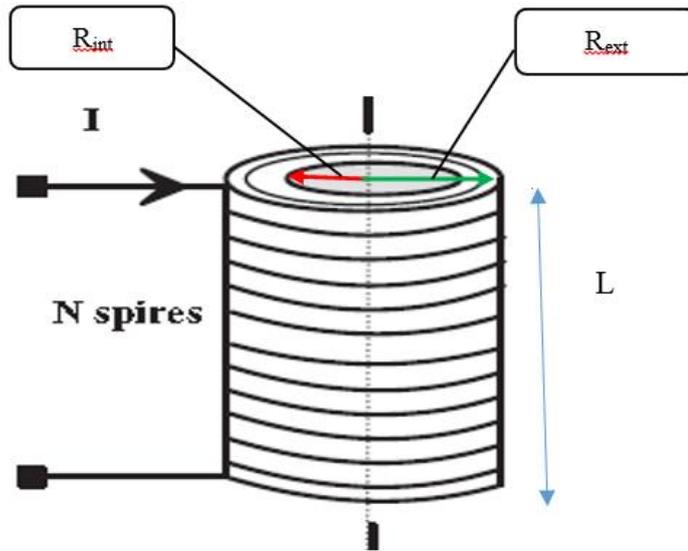
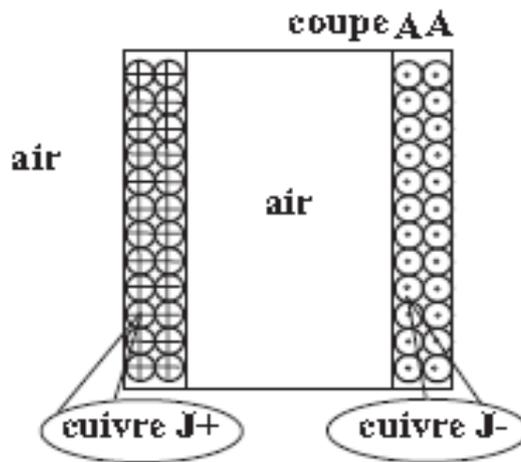


Figure (III.6) : un solénoïde en cuivre [21].



Figure(III.7) : coupe solénoïde en cuivre [21].

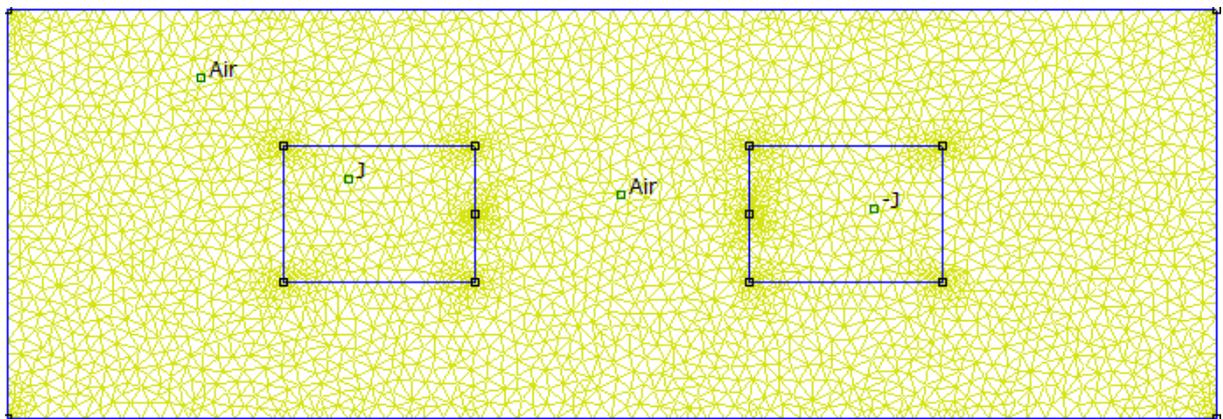


Figure (III.8) : Maillage du solénoïde.

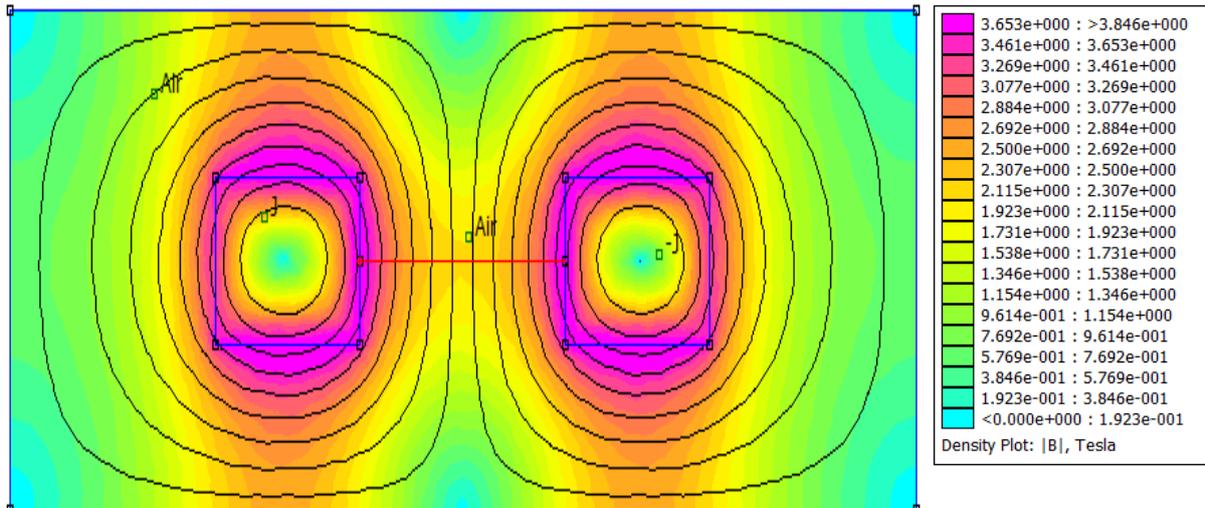


Figure (III.9) : répartition du champ magnétique du solénoïde.

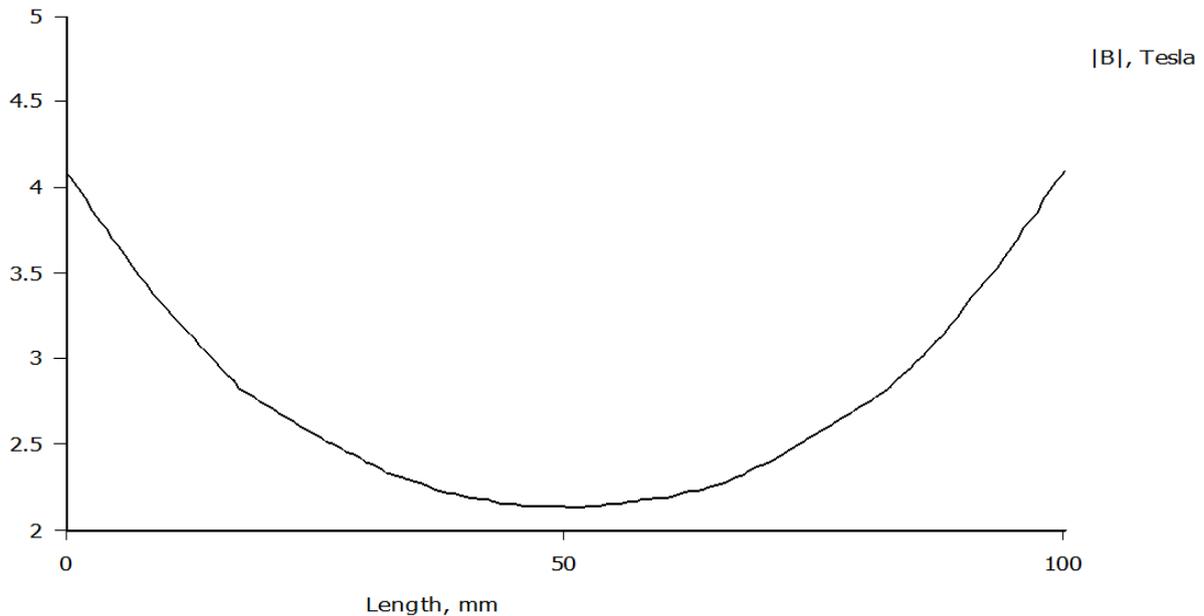


Figure (III.10) : l'induction magnétique dans le solénoïde.

III.4. Etude d'une machine supraconductrice à flux axial.

La machine que nous avons simulée c'est une machine à flux axial à double entrefer avec induit extérieur. Cette machine est entraînée par un moteur asynchrone à travers d'un réducteur de vitesse, la machine possède aussi une pompe d'injection placée dans un réservoir de l'azote liquide pour refroidir les deux pièces massives de supraconducteur de type YBCO.

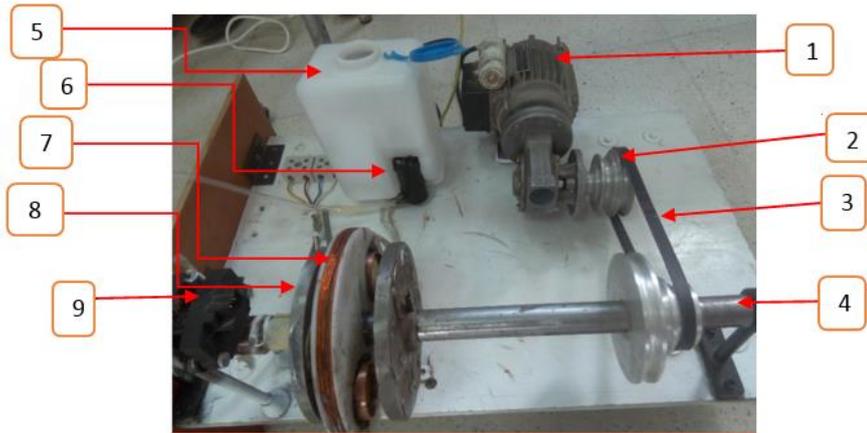


Figure (III.11) : Machine synchrone supraconductrice a flux axial.

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1-Moteur d'entrainement | 6-Pompe d'injection de l'azote liquide |
| 2-Réducteurs de la vitesse | 7-L'inducteur |
| 3- Courroie d'entraînement | 8-L'induit |
| 4-L'axe de rotation | 9-Système bagues- balais |
| 5-Réservoir de l'azote liquide | |

III.5.Etude d'inducteur de cette machine.

L'inducteur de cette machine est situé entre deux disques d'induit. il est composé d'une bobine de cuivre enroulé dans un disque et possède à l'intérieur de disques deux pastilles supraconductrices à type de l'YBCO, on va refroidie les deux pièces par l'azote liquide à traverse d'un système de refroidissement de machine (le réservoir et la pompe d'injection).le rôle des pastilles si de crée une variation de champ magnétique dans l'entrefer de la machine.

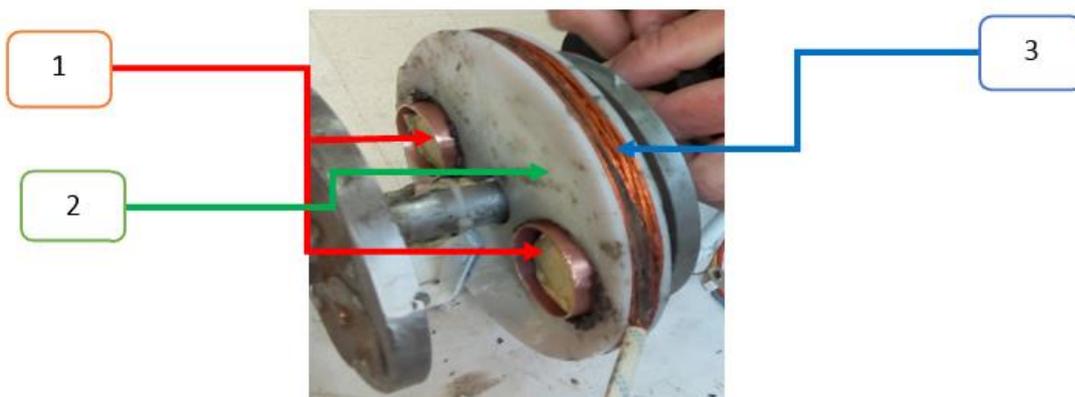


Figure (III.12) : a) structure réelle de l'inducteur.

- 1)- les pièces supraconductrices (les pastilles).

2)- le disque de l'inducteur.

3)-la bobine de l'inducteur.

III.6. Prototype des tests de la machine.

Les tests nécessaires pour valider le fonctionnement de cette machine si des tests statique et dynamique à chaud et à froid.

III.6.1. Tests statique à chaud (mesure des résistances de l'inducteur).

Pour assurer le fonctionnement de la machine, on va tester les résistances de l'inducteur à chaud.

On va mesurer ces résistances par l'alimentation de l'inducteur avec une tension continue, Et nous avons relevé la tension à la borne de l'inducteur, le courant parcouru à partir d'un voltmètre et un ampèremètre. On va mettre aussi une résistance de protection en série avec l'inducteur, le tableau suivant présente les valeurs de tension.

I(A)	0.5	0.7	0.9	1
V(v)	0.44	0.6	0.76	0.85

Tableau(III.1) : présent les valeurs de tension ou borne de l'inducteur

La valeur de la résistance de protection 16Ω .

La valeur de la résistance d'induction 0.8Ω .

III.6.2. Champ crée par l'inducteur.

Pour relever l'induction magnétique crée dans les deux entrefers, nous avons excité l'inducteur par un courant continu, par un tesla mètre nous avons mesuré le champ magnétique au se trouve les pièces de supraconducteur entre deux bobines dans plusieurs profondeurs et en parallèle de la bobine.

La position	1	2	3	4	5	6
B (mT)	0.3	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3

Tableau(III.2) : présent les valeurs de champ magnétique devant la pièce supraconducteur.

La position	1	2	3	4	5	6
B (mT)	0	0.7	0.9	1	0.8	0.6

Tableau(III.3) : présent les valeurs de champ magnétique devant la bobine de l'induit.

III.6.3. Teste à chaud dynamique.

Pour vérifier le comportement mécanique de notre système .il faut mesurer les vitesses dans les différentes parties de la machine, nous avons entraîné cette machine par un moteur d'entraînement contient un réducteur. Nous avons mesuré de ses parties par une taque mètre, et trouver les résultats suivent :

Vitesse de moteur asynchrone 1400tr/min

Vitesse de réducteur de moteur 147tr/min

Vitesse de la machine 219tr/min

III.7. Tests à froid statiques.

Dans ces tests nous avons utilisé l'azote liquide pour refroidir les pièces supraconductrices et pour vérifier aussi l'état supraconducteur de 'YBCO dans l'inducteur.

Le problème qui a trouvé si la pompe d'injection s'est marché pas et impossible de mettre l'azote dans les pièces supraconductrices à cause de la basse température (77k, -196c⁰).

Donc nous avons ajouté l'azote manuellement, on a refroidi les pièces supraconductrices directement, on va mettre l'azote liquide dans les bains de supraconducteur traverse un auto noir



Figure (III.13) : le refroidissement manuel de la machine.

Pour vérifier l'état supraconducteur des pièces de l'YBCO utilisée, nous avons mesuré l'induction magnétique créée par l inducteur dans les quatre quadrants ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) de l'entrefer par un tesla mètre, et nous avons alimenté l'inducteur avec un courant contenu de 1.8 A. les résultats obtenus elle est dans le tableau suivant.

Θ	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
B (m T)	1.9	0.8	1.7	0.6

Tableau (III.4) : le résultat obtenu de champ magnétique dans les 4 quadrants.

Le but de ces tests c'est de trouvé une concentration de champ magnétique dans l'entrefer de la machine .mais à cause des fuites dans les bains les résultats n'est pas validé.

III.8. Simulation de la machine étudiée

Donc on va simuler la machine que nous avons étudiée par logiciel FEMM pour obtenir une concentration de champ magnétique.

1) Les dimensions de l'inducteur de la machine sont :

Le diamètre de fil de l'inducteur =1mmdonc

Le rayon = 0.5mm

$$I=j*s \quad j=I/s$$

$$S=\pi r^2 \quad s= 3.14*(0.5)^2$$

$$S=0.785 \text{ mm}^2 \quad \text{avec}$$

$$I= 1.8 \text{ A}$$

$$J=1.8/0.785$$

$$J=2.3\text{A}/\text{mm}^2$$

2) la densité de courant de i 'induit :

Le diamètre de fil de l'induit = 0.5 mm donc

Le rayon = 0.25mm

$$I_2=j_2*s_2 \quad j_2=I_2/s_2$$

$$S_2=\pi r_2^2s_2= 3.14*(0.25)^2$$

$$S_2=0.785 \text{ mm}^2 \quad \text{avec} \quad I= 1\text{A}$$

$$J=1/0.0625$$

$$J=16\text{A}/\text{mm}^2$$

Nous avons proposé comme suite :

-l'induction magnétique et la répartition du champ magnétique dans l'inducteur de la machine et dans tout la machine dans les deux cas (à chaud et à froid)

Remarque :

Notre simulation est une représentation approximative de la structure de notre machine étudiée.

Dans le 1^{ier} cas (à chaud) les pièces supraconductrices sont comme des matériaux amagnétiques.

Dans le 2^{eme} cas (à froid) les pièces supraconductrices sont des matériaux diamagnétiques repousse le champ magnétique (des écrans supraconducteurs).

III.8.1. Simulation de l'inducteur dans le 1^{ier} cas

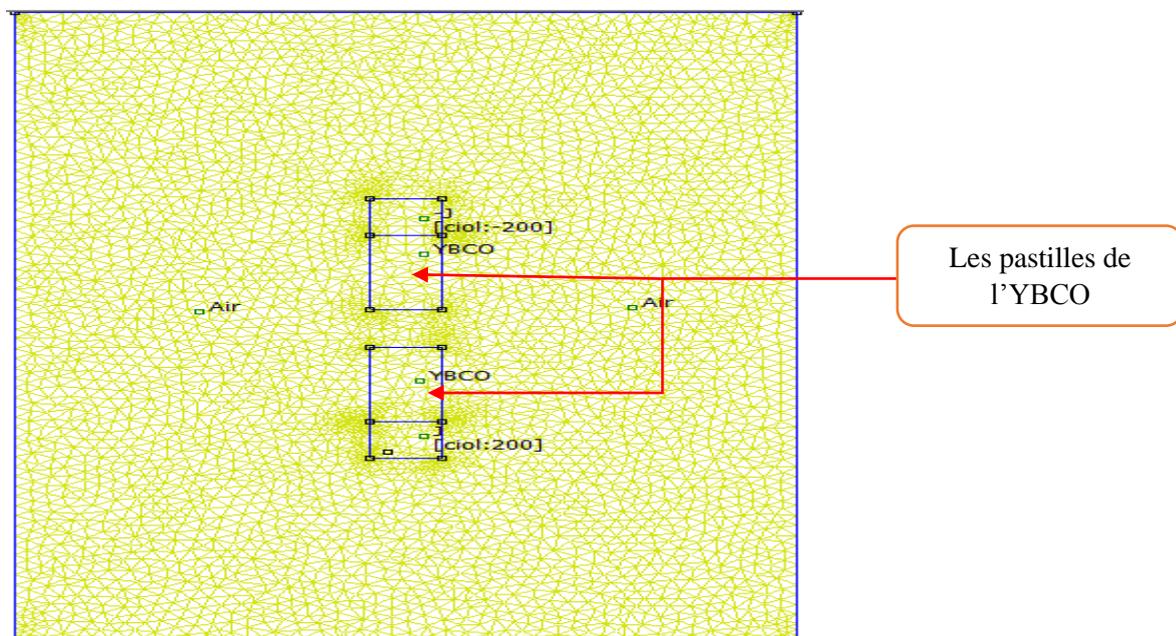


Figure (III.14) : le maillage de l'inducteur.

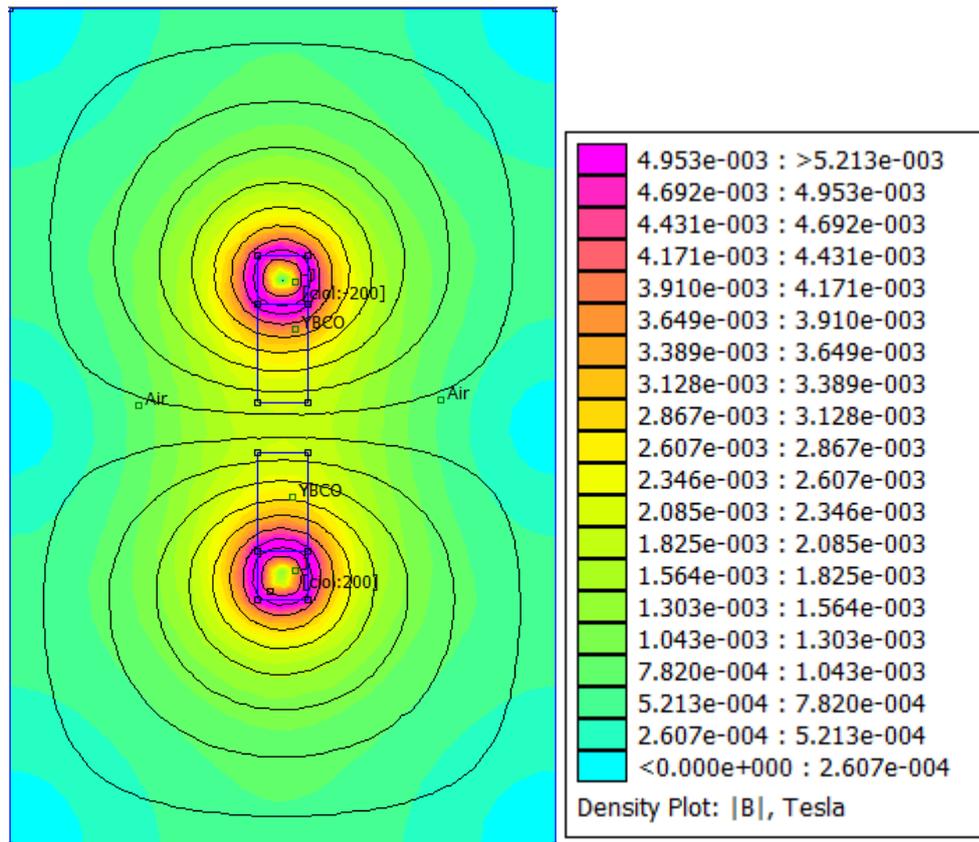


Figure (III.15) : la répartition de champ dans l'inducteur.

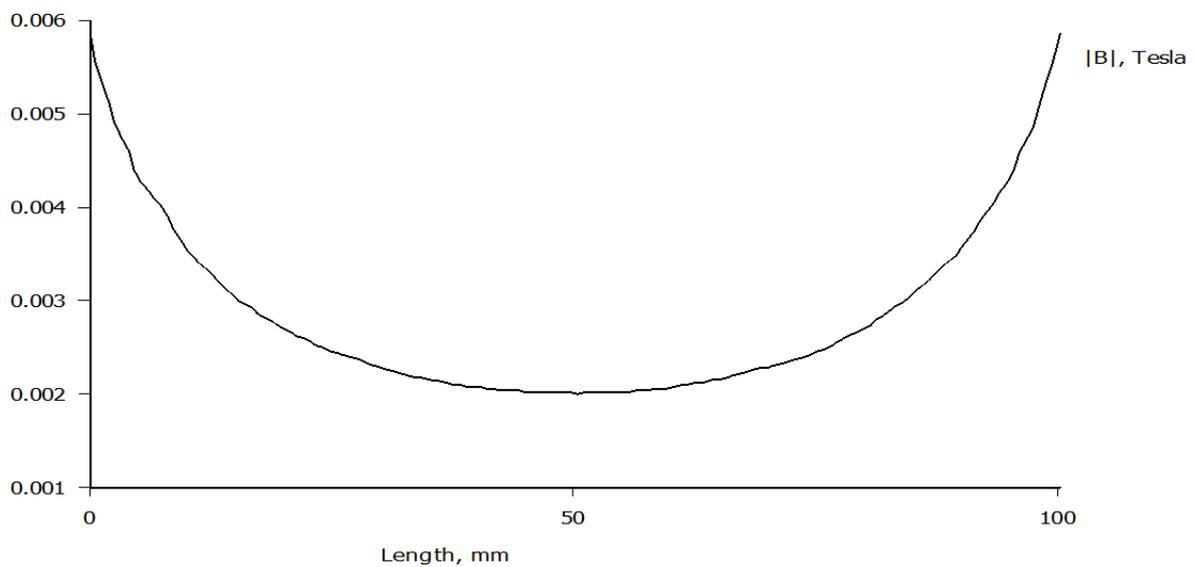


Figure (III.16) : l'induction magnétique dans l'inducteur.

Le champ magnétique est identique à une configuration sans pastilles vue que ces matériaux sont considérés amagnétiques lorsqu'elles ne sont refroidies en dessous de la température

critique. En effet, les pastilles ne repoussent pas le champ magnétique et on ne peut pas obtenir la variation spatiale de champ Figure (III.16).

III.8.2. Simulation de l'inducteur dans le 2^{ème} cas

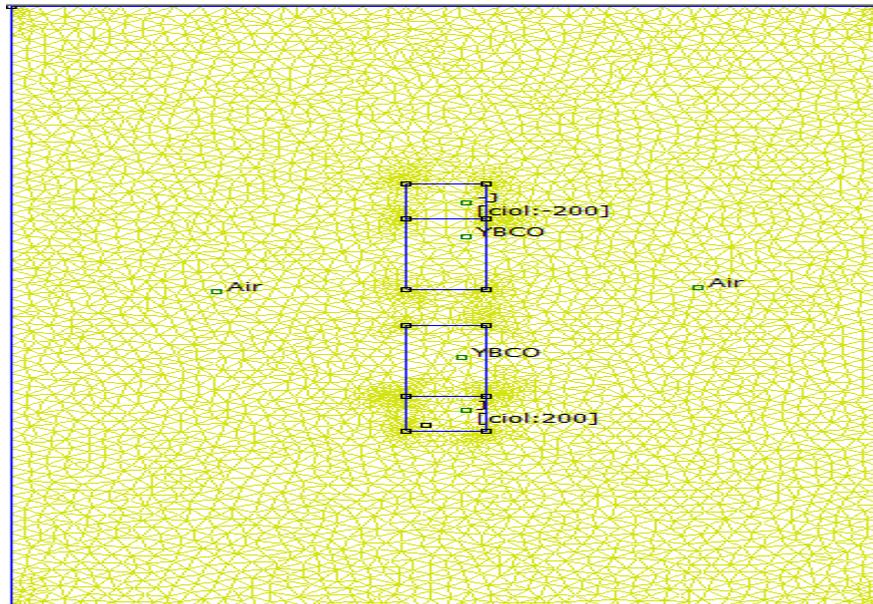


Figure (III.117) : le maillage de l'inducteur.

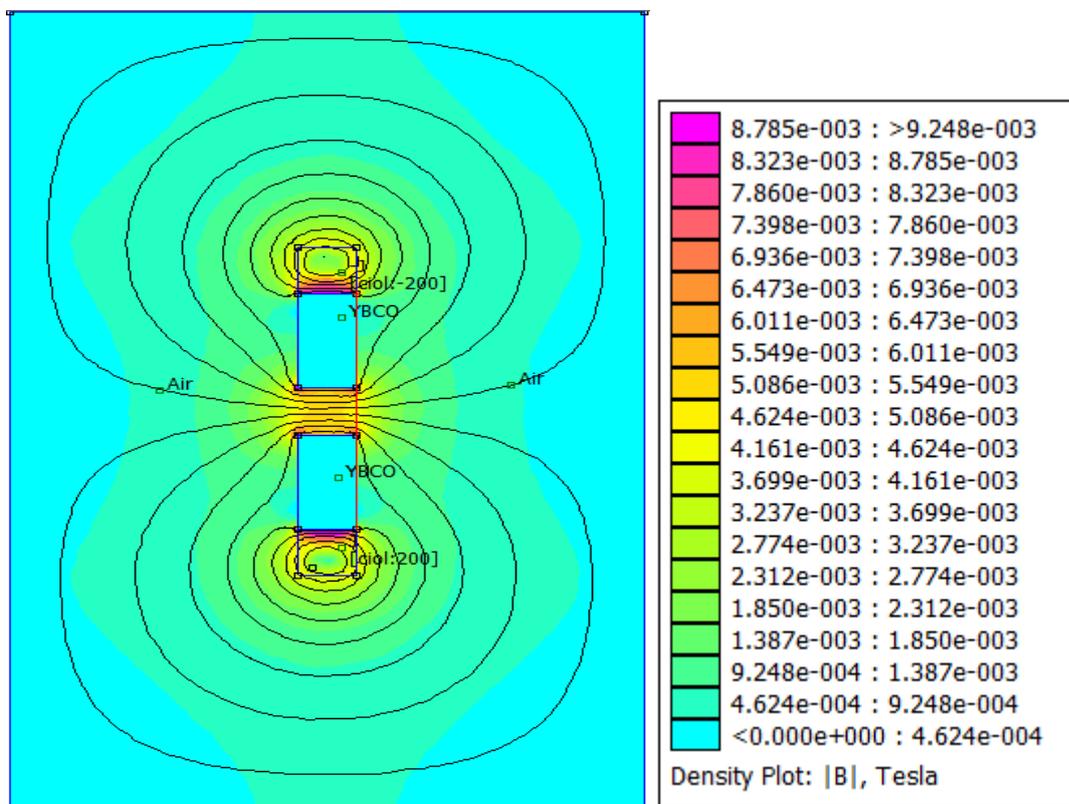


Figure (III.18) : la répartition de champ dans l'inducteur.

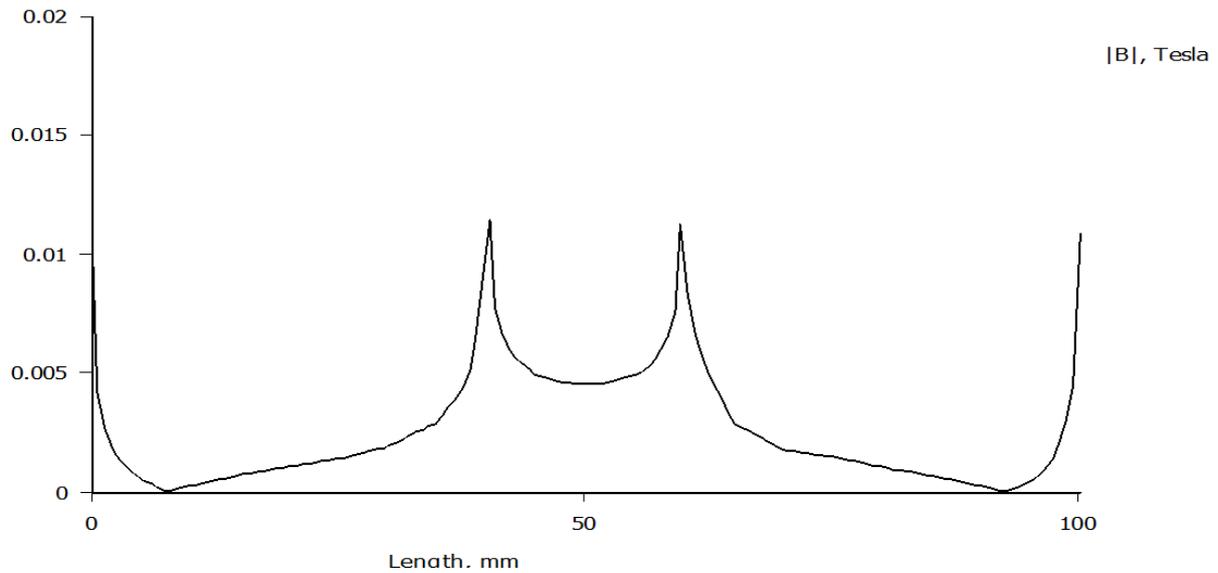


Figure (III.19) : l'induction magnétique dans l'inducteur.

Dans ce cas-là il y a une variation de champ (Figure (III.19)) parce que les pastilles supraconductrices repoussent le champ magnétique quand elle refroidies avec de l'azote liquide.

III.8.3. Simulation de la machine dans le 1^{er} cas

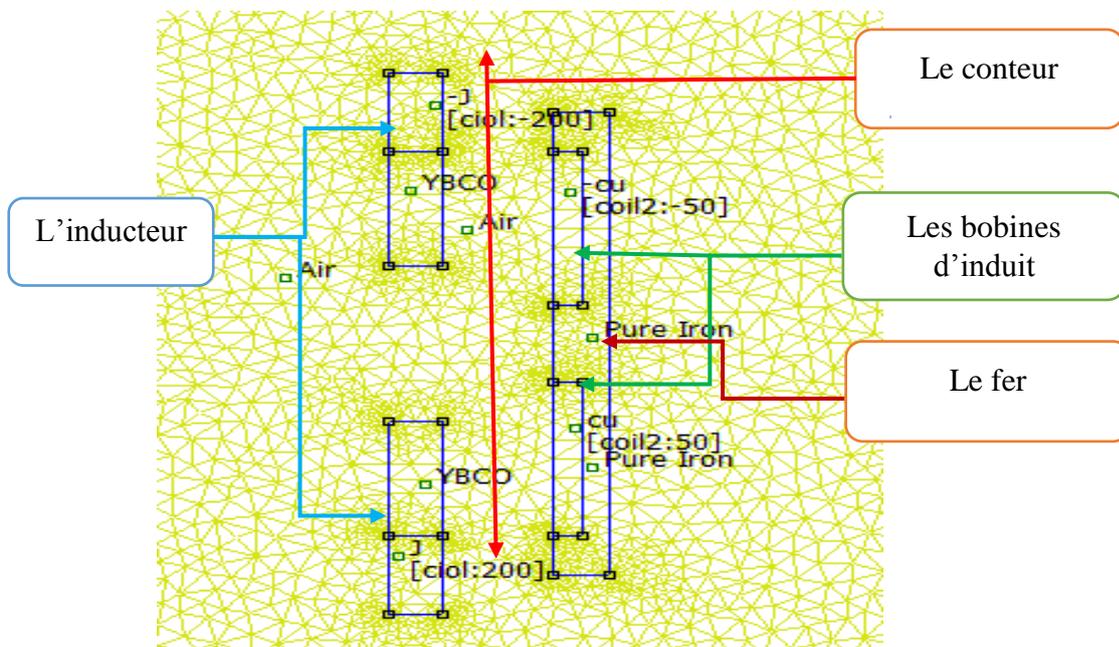


Figure (III.20) : le maillage de déférente partie de la machine.

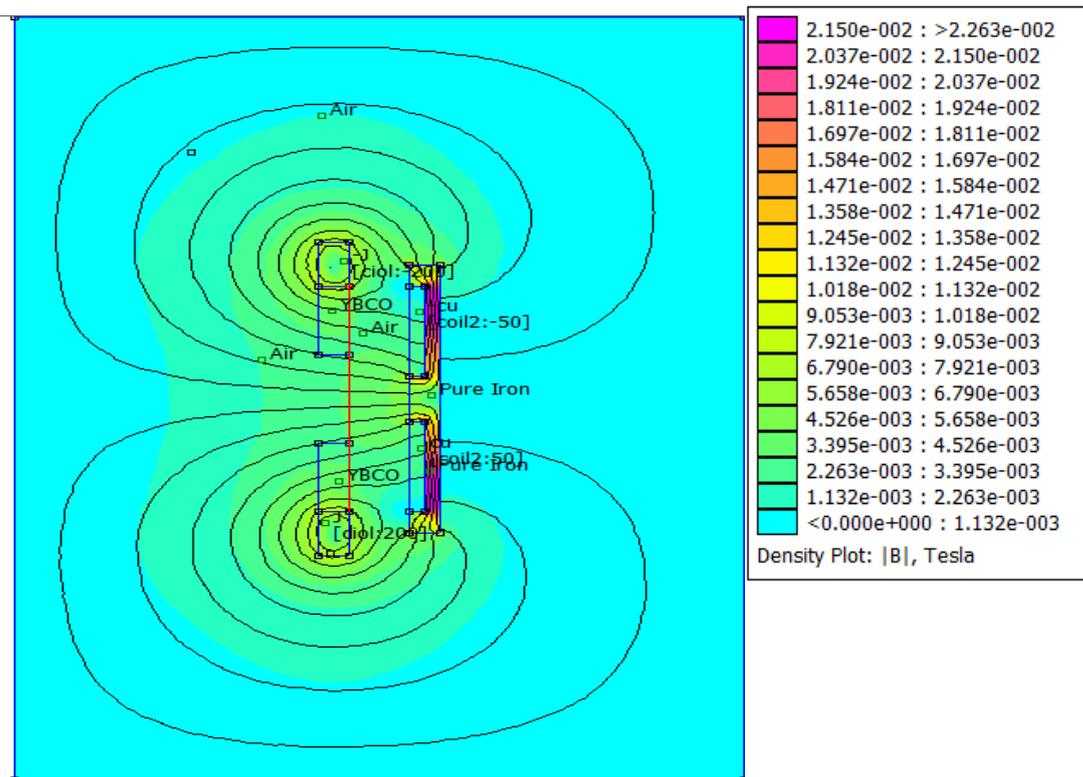


Figure (III.21) : la répartition de champ dans la machine

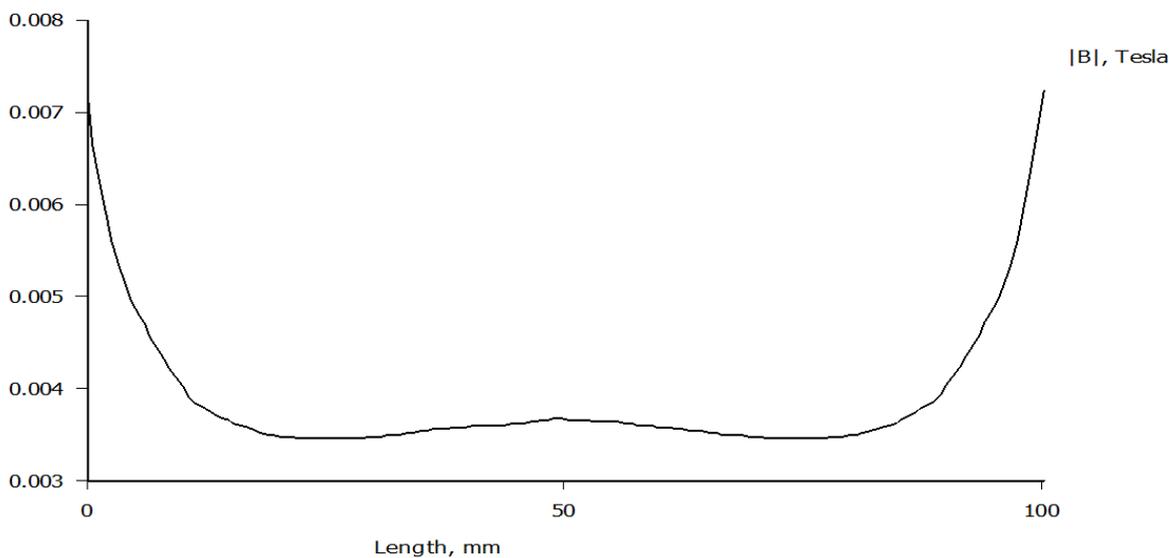


Figure (III.22) : l'induction magnétique dans la machine.

Il y a aucune variation de champ magnétique (Figure (III.22)) parce que dans ce cas (l'état chaud) les pastilles supraconductrices sont amagnétiques et ne repoussent pas le champ. Pour cela il n'y a aucune concentration de champ dans l'entrefer.

III.8.4. Simulation de la machine dans le 2^{eme} cas

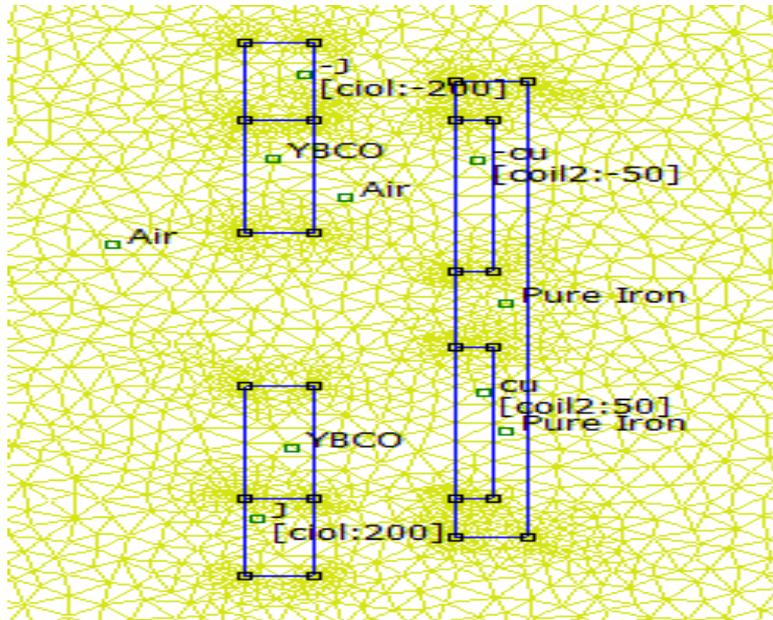


Figure (III.23) : le maillage de déférente partie de la machine.

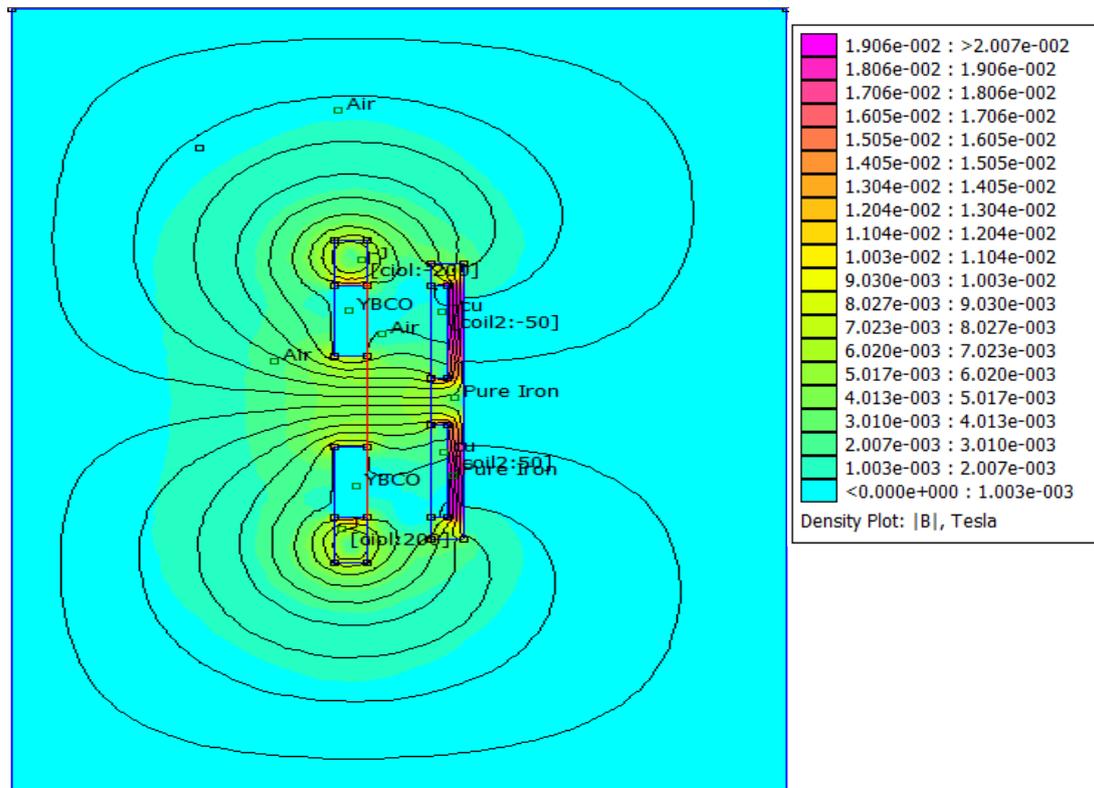


Figure (III.24) : la répartition de champ dans la machine.

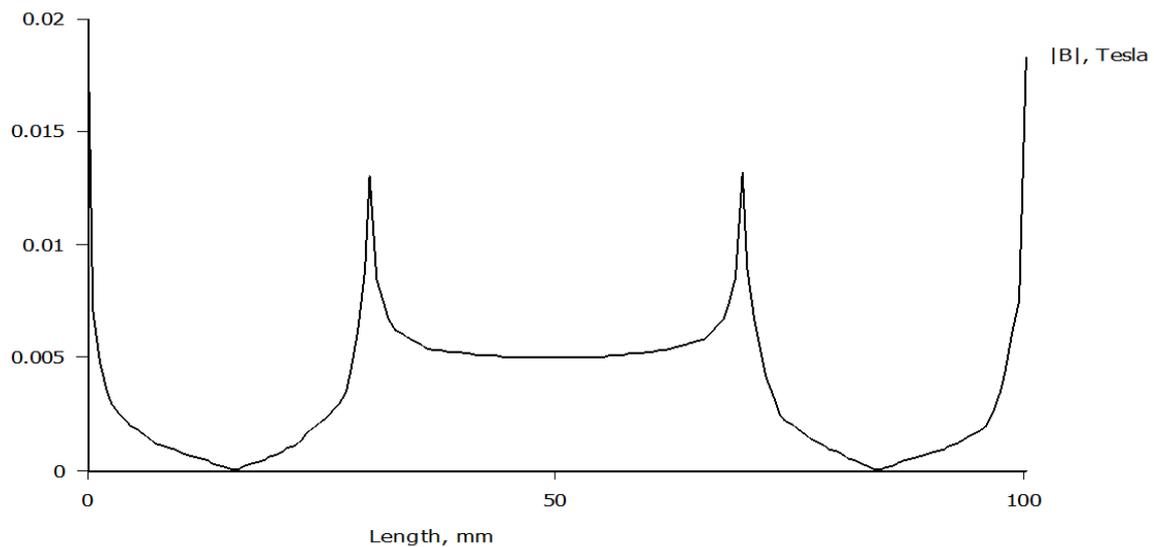


Figure (III.25) : l'induction magnétique dans la machine.

Le refroidissement des pastilles supraconductrices permet à ces matériaux de repousser le champ magnétique et d'obtenir une variation du champ dans l'entrefer (Figure (III.25)). Dans ce cas, les deux pièces supraconductrices sont considérées comme des écrans du champ.

Conclusion :

À travers ce chapitre nous avons fait une étude sur une machine à flux axial supraconducteur nous avons obtenu des idées sur :

Le principe de concentration de champ magnétique et leur importance dans la production de tension électrique ; c'est pour ça nous utilisons les pastilles supraconductrices et refroidies à très basse température pour repousser le champ magnétique et nous avons aussi obtenu une idée sur la structure d'une machine à flux axial, les appareils de mesure et les différents matériaux pour le bon fonctionnement de prototype et comment utiliser le logiciel de simulation FEMM.

CONCLUSION GÉNÉRAL

Conclusion générale :

Ce travail nous a permis de nous familiariser avec le domaine des supraconducteurs. En effet, nous avons passé en revue l'histoire, les principes ainsi que les applications de ces matériaux. Nous avons aussi appris comment utiliser ces matériaux selon leur forme et leur type. Nous avons aussi pu découvrir les principaux fluides cryogéniques utilisés dans ce domaine avec leurs caractéristiques et leurs prix.

Les deux topologies principales des machines électriques ont été présentées. Nous avons constaté que la configuration la plus répandue est la machine supraconductrice à flux radial avec un induit classique et un inducteur supraconducteur. L'étude nous a montré que la machine supraconductrice a des performances plus élevées que la machine conventionnelle qui ne peut pas avoir plus de 2 T au niveau de l'inducteur. Cela limitera ses densités volumique et massique du couple et de la puissance.

Les simulations que nous avons réalisées nous ont permis de valider le principe de la concentration magnétique pour la machine disponible au niveau du laboratoire LESI. Nous tenons aussi à souligner que les expériences réalisées nous ont permis d'approfondir nos connaissances dans ce domaine et la manipulation des gaz cryogéniques comme l'azote.

Référence bibliographique :

[01] : **Bastien Dolisy** «Etude d'un moteur supraconducteur à flux axial avec une transmission magnétique supraconductrice intégrée' 'THESE Présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université de Lorraine en Génie Electrique 2015

[02] : **Mohamed mahtali** « Etude et caractérisation de structures supraconductrice' thèse De DOCTORAT D'ETAT En Physique Spécialité : Sciences des Matériaux, Université MENTOURI – Constantine 2007

[03] : **Rada ALHASAN :** '' Etude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur Synchrone Supraconducteur' 'THESE Présentée en vue de l'obtention du titre de DOCTEUR de l'Université de Lorraine Février 2015

[04] : **Ben mebarek fethi** « modélisation des matériaux supraconducteurs ,application à un limiteur du courant » mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme en magister , UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA ,2014

[05] : **BENSAIDANE Hakim** « Chauffage Par Induction avec un Inducteur Supraconducteur » THESE Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences En Electrotechnique option : Systèmes Electro-énergétiques .université de HOUARI BOUMEDIENE 2013

[06] : **MEGHATRIA SOFIANE et OUZOUGZOU ABDERRAHMANE** « Conception et réalisation d'un induit triphasé d'une machine axiale supraconductrice. » Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention de diplôme Master En Génie électrique Université de Djilali Bounaama 2015

[07] : **Mohamed Lotfi KHENE** « ETUDE DE L'AIMANTATION DANS LES SUPRACONDUCTEURS. » Thèse de DOCTORAT UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA 2015

[08] : **El Hadj AILAM** ''Machine synchrone à plots supraconducteurs Etude et réalisation' 'Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique 2006

[09] : **BOUZID MOHAMED A/F** « Contribution à l'Etude Des Câbles Supraconducteurs » mémoire pour l'obtention du diplôme de magistère en électrotechnique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 2012

[10] : **OULDBIH Talha** « Méthode simplifiée pour l'étude des systèmes de lévitation à base de supraconducteur HTc » Mémoire présenté en vue de l'obtention Du Diplôme de Magister en Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra – 2012

[12] : **MEHABIL Yassine** « étude d'une machine synchrone a flux axial à écrans supraconducteurs » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en génie électrique université de khemis miliana 2012.

[13] : **livre « SAFETY WITH CRYOGENIC FLUIDS »**

Michael G. Zabetakis, **Ph.D.** Bureau of Mines U.S. Department of the Interior Pittsburgh, Pennsylvania

[14] : livre "machine électrique non conventionnelle" sous direction de **ABDERRZAK REZZOUK et MOHAMMED EL HADJ ZAIM**

[15] **Jérôme LEGRANGER** « Contribution à l'étude des machines brushless à haut Rendement dans les applications de moteurs-générateurs embarqués » Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Technologie de Compiègne préparée au Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne avec la société VALEO VES dans le cadre de l'école Doctorale Technologies de l'Information et des Systèmes 2009

[16] **Edouard BOMMÉ** « Modélisation et Optimisation des Machines

Electriques Discoïdes à Double Entrefer » T H E S E pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'Institut polytechnique de Grenoble Spécialité : « Génie Electrique » 2009

[17] **Olivier de la Barrière** « Modèles analytiques électromagnétiques bi et tri dimensionnels en vue de l'optimisation des actionneurs disques. Etude théorique et expérimentale des pertes magnétiques dans les matériaux granulaires. » pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN Domaine : ELECTRONIQUE – ELECTROTECHNIQUE-AUTOMATIQUE 2010

[18] **BARDADI BENDAHA Mansour** « Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel » MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER (Spécialité : Electronique) Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 2015

[19] **Sofiane BENDALI** « Dimensionnement d'un moteur supraconducteur HTc » Thèse Présentée en vue de l'obtention du grade de Doctorat de l'Université de Lorraine Spécialité Génie Électrique 2012

[20] **Fabrice LOCMENT** « Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé » THESE présentée pour l'obtention du titre de Docteur de L'Université des Sciences et Technologies de Lille Spécialité : Génie Electrique 2006.

[21] : « notice d'utilisation du logiciel finite element method magnetics » version 3.4 auteur : **David Meeker**

[22] : **BOUHAREB Ilham** « Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrone à Réductance Variable » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique l'université de Constantine 2009.

[23]**Guilherme BUENO MARIANI** « machine synchrone à réductance – modèles équivalents à réseau de réductances pour la simulation et l'optimisation » thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Grenoble alpes 2016.

[24] **Habi Meriem ; Khengaoui Bouchra** « simulation d'un électro-aimant »

Mémoire master académique domaine : sciences et technologies Université kasdi merbah Ouargla 2015

[25] **Isabela KLUTSCH** « MODELISATION DES SUPRACONDUCTEURS ET MESURES » t h e s e pour obtenir le grade de docteur de l'INPG spécialité : génie électrique préparée au laboratoire d'électrotechnique de Grenoble dans le cadre de l'école doctorale « électronique, électrotechnique, automatique, Télécommunications, signal » institut national polytechnique de Grenoble 2003