

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



**Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme de

Master

En

Spécialité : Génie électrique

Option : Electrotechnique

THEME :

Contribution à la conception d'un inducteur supraconducteur

Réalisé par :

Mr. Bousalhih Khaled

Mr. Djellouli Riadh

Encadré par :

Pr. Ailam El Hadj

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord nous remercions DIEU le tout puissant et miséricorde de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail,

Bien qu'un travail soit individuel, plusieurs personnes ont rendu possible la réalisation de ce modeste travail, que nous tenons à remercier vivement :

* Le Professeur Ailam El Hadj pour avoir accepté de diriger ce travail et nous a accueilli dans son laboratoire de recherche. Nous n'oublions jamais les précieux conseils scientifiques qu'il nous a prodigué, sa patience et ces encouragements nous a été d'un apport scientifique et moral considérable.

* Le Président du jury qui a accepté d'examiner ce travail,

* Le Membre qui a bien voulu juger ce travail,

* Monsieur Hakim Douar Doctorant, pour son aide précieuse, sa clarté dans l'approche thématique et ses discussions enrichissantes et qui nous a prodigué de précieux conseils pour la réalisation de tous travaux de laboratoire,

* Mon père Brahim pour nous avoir longuement orienté, soutenu et encouragé à suivre cette spécialité et nous a aidé à mettre à jour ce document,

* Mes amis qui nous ont exhortés à achever ce travail,

* Notre profonde gratitude s'adresse à tous ceux trop nombreux pour être cités, qui ont collaborés à ce travail,

* Nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation,

* Nos familles respectives pour nous avoir encouragés et soutenus pendant les moments les plus difficiles,

* Sans oublier tout le personnel et les étudiants qui nous ont aidés.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon grand père Chahid mort au champ d'honneur

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.

Mon très cher frère Abdelhak,

Ma sœur Wassila

Khaled

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A ma très chère mère

Quoi je fasse ou que je dise, je ne saurai point te
remercier comme il se doit,

Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta
présence a mes cotés a toujours été ma source de force
pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père Vous êtes toujours a mes cotés pour
me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection et
merci mes parents.

Mes très chers frères,

Tous les membres de ma grande famille,

A tous mes amis et collègues.

A tous les étudiants de la promotion 2018/2019

Riadh

Résumé :

Dans ce projet de fin d'études nous présentons une étude expérimentale d'un inducteur d'une machine synchrone supraconductrice à structure axiale. Le but du projet est de connaître l'intérêt de l'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les machines électriques. Nous présentons dans cette étude une bibliographie la supraconductivité. Nous présentons aussi les deux structures les plus connues de la machine synchrone ; celle à flux axial et à flux radial. A la fin nous avons réalisé deux prototypes d'inducteur.

Mots clé : Flux axial, Flux radial, supraconducteur, inducteur, prototypes

ملخص:

في هذا المشروع النهائي ، نؤدم دراسة تجريبية لمبحث آلة تزامن فائضة التوصيل ذات بنية محورية . يهدف المشروع إلى معرفة الفائدة من استخدام مواد فائضة التوصيل في الآلات الكهربائية . نؤدم في هذه الدراسة الموصلة الفائضة . نحن نؤدم أيضا اثنين من الهياكل الأكثر شهرة للجهاز متزامن . هذا مع التدفق المحوري والتدفق شعاعي . في النهاية قدمنا نموذجين مغو

الكلمة المفتاحية : التدفق المحوري ، التدفق الشعاعي ، التوصيل الفائق

Abstract :

In this final project We present an experimental study of an inductor of a superconducting synchronous machine with axial structure. The aim of the project is to know the interest of using superconducting materials in electrical machines. We present in this study a bibliography superconductivity. We also present the two most known structures of the synchronous machine; that with axial flow and radial flow. At the end we made two inductor prototypes

Key word: Axial flow, Radial flux, superconducting inductor prototypes

Table des Matières

Remerciments.....	I
Didicace.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Notations symboliques et abréviations.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Bibliographie sur les supraconducteurs

1. Introduction.....	2
2. Historique.....	2
3. Grandeurs et caractéristiques.....	3
3.1. Température critique.....	3
3.2. Champ magnétique critique.....	4
3.3. Densité de courant critique.....	5
3.4. Surface critique.....	5
4. Types de supraconducteur.....	6
Supraconducteurs de type I.....	6
Supraconducteur de type II.....	6
5. Matériaux supraconducteurs selon leur température.....	7
Supraconducteur à basse température critique (BTC).....	7
Supraconducteur à haute température critique (HTC).....	7
6. Matériaux supraconducteurs selon leur forme.....	8
6.1. Supraconducteurs massifs.....	8
6.1.1. Aimants supraconducteurs.....	8
6.1.2. Ecrans supraconducteurs.....	8
6.2. Fils supraconducteurs.....	8
7. Applications des supraconducteurs en électrotechnique.....	10
Lignes de transport.....	10
Systèmes de stockage de l'énergie.....	11
Machines électriques.....	11
8. Conclusion.....	12

Chapitre II: Machines synchrones

1. Introduction	13
2. Machine à flux radial.....	15
2.1. Machine à flux radial à rotor intérieur	15
2.2. Machine à flux radial à rotor extérieur	16
2.3 Les avantages et les inconvénients de la Machine à flux radial	16
3. Machine à flux axial.....	17
3.1 Les structures d'une machine à flux axial.....	17
3.1.1. Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor (simple entrefer).....	17
3.1.2. Machine à flux axiale à double entrefer.....	18
3.1.3. Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques.....	19
3. 2. Avantages et inconvénients	19
4. Comparaison entre machine à flux axial et radial	20
5. Applications de la MSFA.....	21
5.1. Énergie éolienne	21
5.2. Propulsion navale	21
5.3. Moteur roue.....	21
5.4. Traction électrique	21
6. Pourquoi utiliser les supraconducteurs.....	22
7. Machine synchrone supraconductrice à flux axial	22
7.1. Machines à flux axial avec bobines supraconductrices.....	23
7.2. Machines à flux axial avec des matériaux supraconducteurs passifs (bulks).....	25
8. Avantages/inconvénients de la MSFA supraconductrice	25
9. Calcul des paramètres de la MSFA... ..	26
Calcul des inductances propres et mutuelles.....	26
Calcul de l'inductance de fuite (propre)	26
Calcul de la résistance statorique	27
10. méthodes de test du MSFA	27
Identification des resistances.....	27
Identification des inductances propres et mutuelles	27
Inductances mutuelles	27
Inductances propres	27
11. Conclusion.....	28

Chapitre III : Etude expérimentale

1. Introduction	29
2. Présentation de l'inducteur	29
3. Calcul des paramètres de l'inducteur	31
4. Réalisation des deux prototypes	35
4.1. Prototype I.....	35
4.1.1. Tests à chaud à courant $I = 3.48A$	35
4.1.2. Test à froid.....	36
4.1.3. Comparaison entre Teste à chaud et à froide	38
4.2. Prototype II.....	39
4.2.1. Inducteur avec pastilles a courant $I = 8.45A$	39
4.2.2. Inducteur sans pastille à courant $I=8.45A$	41
5. Comparaison entre les deux prototypes	42
6. Conclusion.....	43
Conclusion générale	44
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure I.1. Comportement d'un supraconducteur de type 1 et 2.....	4
Figure I.2. Surface critique d'un état supraconducteur	5
Figure I.3. Processus de fabrication des rubans BSCCO	9
Figure II.1. Structure d'une machine à 2 paires de pôles	13
Figure II.32. Moteur synchrones à inducteur bobiné	14
Figure II.3 . Exemple de structure à rotor interne et à rotor externe.....	15
Figure II.4. Structure Machine à flux radial à rotor intérieur	15
Figure II.5. Structure d'une Machine à flux radial à rotor extérieur	16
Figure II.6. Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor	17
Figure II.7. Machine à flux axiale à double entrefer	18
Figure II.8. Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques	19
Figure II.9 : Moteur synchrone à flux axial de 22KW.....	23
Figure II.10. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5kW par IHI.....	24
Figure II.11. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteur massifs IHI....	25
Figure III.1. Pastilles supraconductrices YBCUO	29
Figure III.2. Inducteur avec des bobines en cuivre horizontal	30
Figure III.3. Inducteur avec des bobines en cuivre vertical	30
Figure III.4. Prototype I sans l'utilisation de l'azote liquide	35
Figure III.5. Prototype I avec l'utilisation de l'azote liquide	37
Figure III.6. Prototype II avec les pastilles	39
Figure III.7. Prototype II avec pastille et l'utilisation de l'azote liquide	40

Liste des tableaux

Tab I.1. Représente quelque supraconducteur de types I.....	6
Tab I.2. Représente supraconducteur de types II.....	7
Tab I.3. T_c , H_c et B_c dans quelques supraconducteurs de type II, (à 0 K).....	10
Tab I.4. Les prix de fluides cryogéniques.....	10
Tab II.5. Comparaison entre machine à flux axial et radial.....	20
Tab III.1. Représente les valeurs de tension et courant continue.....	31
Tab III.2. Représente les valeurs de tension et courant alternatif.....	32
Tab III.3. Représente les valeurs de tension et courant continue prototype II.....	33
Tab III.4. Représente les valeurs de tension et courant alternative prototype II.....	34
Tab III.5. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I à chaud.....	36
Tab III.6. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I sans pastilles à froid.....	36
Tab III.7. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I avec pastilles à froid.....	38
Tab III.8. Représente le champ dans les différentes bobines de l'inducteur.....	39
Tab III.9. Représente le champ dans les différentes bobines de l'inducteur sans pastilles.....	41

Notations symboliques et abréviations

Symboles	Significations	Unité
J_c	Densité de courant critique	A/m^2
T_c	Température critique	K
H_c	Champ magnétique critique	A/m
B	Induction magnétique	T
$SBTC$	Supraconducteur à base température critique	<i>Sans unité</i>
$SHTC$	Supraconducteur à haute température critique	<i>Sans unité</i>
$MSFR$	Machine synchrone a flux radiale	<i>Sans unité</i>
$MSFA$	Machine synchrone a flux axiale	<i>Sans unité</i>
μ_0	Perméabilité magnétique a vide	H/m
L_f	Inductance Propre	H
ρ	La résistivité	Ωm
Θ	Le flux propre	wb
M	inductance mutuelle	H

Introduction Générale

Introduction générale

La supraconductivité est un phénomène physique qui se manifeste dans certains matériaux sous des conditions spécifiques ou le matériau perd sa résistivité électrique et il annule le champ magnétique à l'intérieur du matériau sous certaines conditions (température, de champ magnétique et densité de courant)

En 1911 le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes a observé la première fois ce phénomène sur un échantillon de mercure dans une expérience consistant à mesurer la résistance électrique du mercure à très basse température. Aujourd'hui dans le monde, plusieurs laboratoires de recherche et d'industries travaillent sur des applications qui utilisent la supraconductivité par exemple les câbles de transport d'électricité, les transformateurs et les aimants de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) ont vu le jour. Ils sont tous de fabuleux exemples d'utilisation des propriétés de la supraconductivité.

En avril dernier (2014), un câble supraconducteur de un kilomètre de long à été installé. Il est refroidi à l'azote liquide (77 Kelvin) et permet de transmettre cinq fois plus d'énergie qu'un câble couramment utilisé auparavant.[10]

Ce manuscrit consiste en l'étude expérimentale d'un inducteur d'une machine supraconductrice à flux axial. Le travail est réalisé au niveau du laboratoire de recherche de l'Université Djilali Bounaama de Khemis-Miliana sous la direction de Monsieur Ailam El-Hadj.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à l'étude bibliographique sur les supraconducteurs. Dans le but d'identifier les caractéristiques et les grandeurs critiques des différents types des supraconducteurs et leurs applications en électrotechnique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique sur les différents types de la machines à structure axiale et radiale et la différence entre les deux structures. A la fin nous avons identifiés les paramètres de la machine synchrone à flux axial.

Le troisième chapitre concerne le travail expérimental que nous avons réalisé au laboratoire sur l'inducteur de la machine. Cet essai concerne le test à chaud et le second est un test à froid par l'utilisation de l'azote liquide.

Chapitre I
Bibliographie sur les
supraconducteurs

1. Introduction :

La supraconductivité est un phénomène dans lequel le matériau perd sa résistance électrique. Une boucle supraconductrice peut perdurer indéfiniment sans perte d'énergie liée à l'effet Joule. Ce phénomène a été observé par le physicien Heike Kamerlingh Onnes en 1911 sur un échantillon de mercure

2. Historique :

La découverte importante par Meissner et Ochsenfeld en 1933 concernant les propriétés des supraconducteurs. Un matériau placé dans un champ magnétique extérieur exclu toutes les lignes de champ s'il est inférieur à un champ critique.

Selon la théorie BCS (Bardeen, Cooper et Schrieffer établie en 1957), la supraconductivité se résume comme suit :

- L'interaction entre les électrons et les vibrations du réseau crée une attraction réelle entre les électrons. En cas où la température est suffisamment faible, cette attraction sera dominante et les électrons vont s'assembler en paires de Cooper.

- Dans l'état supraconducteur la fonction d'onde de toutes les paires de Cooper a la même phase peut être décrite par une unique fonction d'onde. La théorie BCS n'est pas en mesure d'expliquer la supraconductivité à haute température critique, où les vibrations du réseau sont responsables de l'existence de paires.

Le physicien britannique Brian Josephson en 1962 a caractérisé le courant entre deux supraconducteurs séparés par une couche mince isolante. Ce phénomène a été confirmé expérimentalement plus tard et désormais dénommé l'effet Josephson.

L'intérêt des supraconducteurs a été remis sur scelle lorsque Georg Bednorz et Alex Müller en 1986 ont découvert une nouvelle famille de matériaux (l'oxyde de Baryum (Ba), le Lanthane (La), le Cuivre (Cu) et d'Oxygène (O)). Ces supraconducteurs ont une température élevée de -238°C (34K). Puis le lanthane est remplacé par de l'Yttrium qui produit l'« $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ » avec une température critique 92 K, dépassant la température de l'azote liquide (77 K).

En 2007, une équipe de physiciens franco-canadienne publie dans la revue *Nature* une étude relative à la compréhension de ces matériaux (Nicolas Doiron Leyraud, al, et 2007). Selon un autre communiqué de (Alessio Figalli, 2018) ont fait une avancée sensible dans la compréhension de ces matériaux [1][2].

En janvier 2008, Le professeur Hosono et son équipe de l'institut de Tokyo ont mis en évidence l'existence d'une nouvelle classe de supraconducteurs : de type ROFeAs (où R est une terre rare) dopés avec du fluor sur le site de l'oxygène [3]. Il semble qu'un consensus indiquant que le fer joue un rôle majeur dans la supraconductivité de ces matériaux. Vers la fin du mois de mai 2008, le professeur Johrendt, de l'université de Munich, a montré que la supraconductivité dans le composé $\text{Ba}_{0,6}\text{K}_{0,4}\text{Fe}_2\text{As}_2$, avec une température critique T_c de l'ordre de $-235,15$ °C grâce à la structure cristallographique très proche de celle de LaOFeAs[4]. Cette découverte montre que l'oxygène n'a aucun rôle dans le mécanisme de supraconductivité.

Les supraconducteurs à base de fer découverts en 2009, FeSe, revient dans l'actualité. La faible température critique du fer qui est environ de 10 K n'a pas été jugée intéressante (Yoo Jang Song, 2014). Une autre découverte ouvre la voie aux supraconducteurs en couches minces ainsi qu'à la synthèse de matériaux complexes (Yoo Jang Song, 2014)[5].

Selon Mari Einaga, en 2016, une température critique supérieure à 200 K a été observée dans de l'hydrure de soufre.[6]

3. Grandeurs et caractéristiques :

3.1. Température critique :

La température critique (T_c) est la température où le supraconducteur perd sa résistivité électrique et sera non mesurable (tombe à zéro). Les matériaux supraconducteurs sont des matériaux parfaits car ils ne dissipent aucune chaleur lors du passage du courant électrique (les pertes joules sont nulles). Il existe deux types de matériaux supraconducteurs :

- Matériaux basse température critique (BTC) qui ne dépassent pas une vingtaine de kelvin (NbTi à 9.2 Kelvin).
- Matériaux haute température critique (HTC) sont des supraconducteurs qui peuvent atteindre 160 Kelvin (YBCO 135 Kelvin).

3.2. Champ magnétique :

Le champ magnétique est une grandeur intéressante pour la supraconductivité. Pour avoir ce phénomène il faut que le champ extérieur ne dépasse pas certaine intensité du champ critique H_c . Il existe deux types de supraconducteurs :

- Type 1 a un seul champ critique H_c , il est caractérisé par deux états, état supraconducteur et l'état normal. L'état normal correspond a une valeur élevée de la résistance des matériaux par contre l'état supraconducteur correspond a une résistance nulle, Aluminium (Al).
- Types 2 est caractérisé par deux champs magnétique H_{c1} et H_{c2} , il comporte 3 zones [7] :
- Zones 1 : inférieur à H_{c1} , dans cette zone le matériau est supraconducteur (État Meissner).
- Zone 2 : entre H_{c1} et H_{c2} , c'est la zone mixte le matériau est partiellement diamagnétique.
- Zone 3 : supérieur à H_{c2} c'est l'état normal ou le supraconducteur perd sa caractéristique.

(Fig I.1).

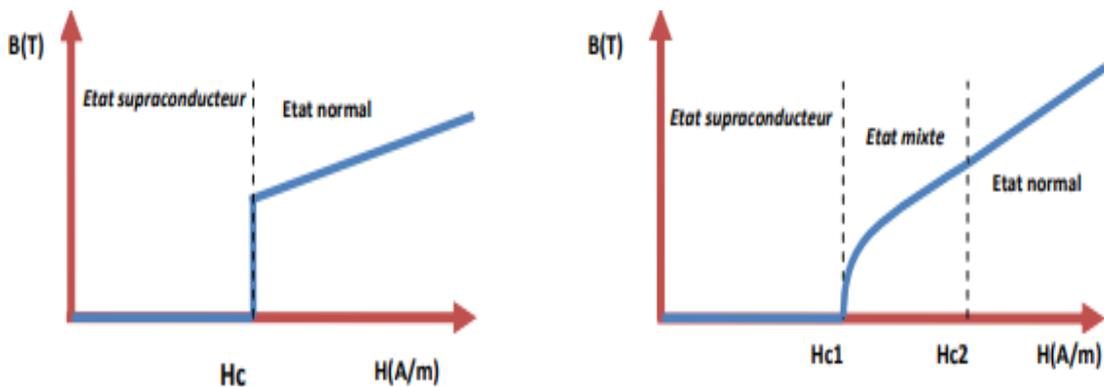


Figure I.1. Comportement d'un supraconducteur de type 1 et 2 [8]

3.3. Densité de courant critique :

Dans le domaine de la supraconductivité la densité de courant est parmi les facteurs importants, comme chaque facteur elle a aussi une valeur critique qu'elle ne doit pas dépasser. Il s'appelle la densité de courant critique (J_c). La densité de courant critique est celle qui amorce le désencrage des vortex, provoquant des échauffements thermiques qui conduisent à la transition du matériau de l'état supraconducteur à l'état normal. Cette valeur dépend du champ magnétique appliqué et de la température de fonctionnement.

3.4. Surface critique :

Les trois grandeurs densité de courant et champ magnétique et température critique construisent une surface : appelée la surface critique ou zone dans laquelle le matériau reste à l'état supraconducteur. (Fig I.2).

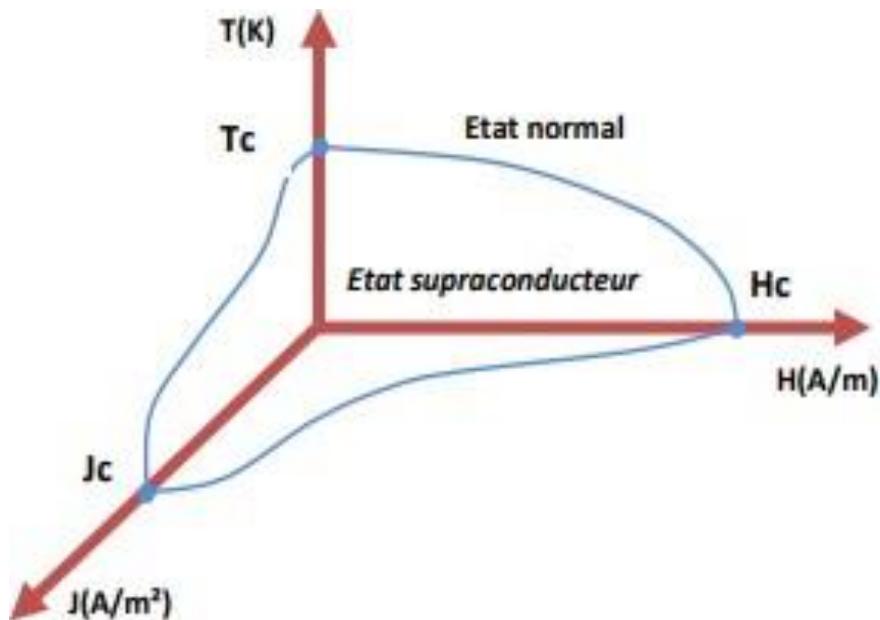


Figure I.2. Surface critique d'un état supraconducteur [8]

4. Types de supraconducteur :

Après avoir cité les grandeurs critiques (T_c , H_c , J_c) de ce matériau et ces caractéristiques, on va montrer les deux types de supraconducteur.

4.1. Supraconducteur type I :

Les supraconducteurs de types I possèdent un seul champ critique H_{c1} . Dans ce type on trouve que le matériau peut être à l'état normal au-dessus de H_c ou à l'état supraconducteur. C'est à dire en dessous de la valeur critique H_c .

Tableau I.1 : représente quelque supraconducteur de types I [9] :

Matériaux	Température critique (Kelvin)	Champ magnétique critique (Tesla)
Titanium (Ti)	0.4	0.0056
Aluminium (Al)	1.2	0.0105
Etain (Sn)	3.7	0.0305
Mercure (Hg)	4.2	0.0411
Plombe (Pb)	7.2	0.0803

4.2. Supraconducteur type II :

Ce type de matériau est caractérisé par deux champs magnétiques critiques H_{c1} et H_{c2} où le H_{c2} est supérieur de H_{c1} . Ce dernier est plus utilisé que le type I parce qu'il présente trois états :

- L'état supraconducteur où le champ magnétique est inférieur à H_{c1} (le Matériau est parfaitement diamagnétique),
- L'état mixte où le champ magnétique est entre H_{c1} et H_{c2} (le Matériau est partiellement diamagnétique),
- L'état normal le champ magnétique supérieur à H_{c2} , dans cet état le matériau a une forte résistance.

Tableau I.2 : Représente supraconducteur de types II [9] :

Matériaux	Température critique (Kelvin)	Champ magnétique critique (tesla)
Nb-Ti	10.2	12
Nb ₃ Sn	18.3	22
Nb ₃ Ge	23.0	30
Nb ₃ Al	18.9	32
PbMo ₆ S ₈	14.0	45

5. Matériaux supraconducteurs selon leur température :

Dans le domaine de supraconductivité il existe deux familles de supraconducteur à :

*Basse température Btc,

*Haute température Htc.

5.1. Supraconducteurs à base température SBtc :

Ces derniers sont utilisés pour les applications industrielles. Ils sont de la famille des supraconductrice à base température Btc parce qu'ils sont simples à utiliser pour fabriquer des bobines de fort champ magnétique. Généralement cette famille est de types II comme le NbTi, leur température critique est inférieur à 20K, on utilise l'hélium liquide pour les refroidissent. L'utilisation de ces supraconducteurs à basse température dans plusieurs domaines comme la médecine IRM (Image par Résonance Magnétique). Ils sont disponibles en grande échelle avec des performances exceptionnelles qui atteignent jusqu'à plus de 2000 A/mm² sous un champ magnétique de 3 T [10] [11].

5.2. Supraconducteurs à haute température SHtc :

En 1986, A. Muller et G. Bednorz ont découvert le premier matériau supraconducteur à haute température critique le (BaLaCuO). Il avait une température critique de 35K alors que la température théorique était de 30K. Ce qui paraissait infranchissable ce qui nous obligé à utiliser l'azote liquide pour le refroidir ce matériau de type II. Il peut faire passer environ 250 A/mm² à 77 K sous un champ propre et environ 750 A/mm² à 30 K sous un champ magnétique de 3 T [10]

6. Matériaux supraconducteurs selon leur forme :

6.1. Supraconducteurs massifs :

Généralement les matériaux supraconducteurs à haute température sont des matériaux massifs exceptés le NbTi qui est utilisé dans des cavités supraconductrices pour accélérateurs de particules [7]. Les applications des fils supraconducteurs sont plus nombreuses que celle des matériaux massifs. Deux applications les plus utilisés sont :

- Les écrans supraconducteurs,
- Les aimants permanents supraconducteurs.

6.1.1. Aimants supraconducteurs :

Sont des aimants refroidis à sa température critique dans un champ magnétique nul et puis exposés à une variation du champ magnétique qui pénètre le matériau supraconducteur au-delà de la valeur H_c . Le matériau va alors piéger le champ magnétique qui passe par l'intermédiaire des courants induits selon la loi de Lenz. Ces courants restent puisque les supraconducteurs sont caractérisés par une résistance nulle [7]

6.1.2. Ecrans supraconducteurs :

Le principe de l'écrantage base sur canalisation et concentration des lignes du champ magnétique dans la direction voulue. Avec l'utilisation du supraconducteur on peut repousser les lignes du champ et les diriger dans la direction voulue.

6.2 Fils supraconducteur :

Il existe quatre types de fil supraconducteur :

- Le fil NbTi est un supraconducteur à basse température avec des longueurs supérieures à 10 kilomètres. C'est un produit industriel standard avec des performances excellentes et avec un coût moins cher.
- Le fil YBaCuO c'est le plus prometteur en termes densité de courant, par contre il est produit en petites longueur (en mètres). La structure et la méthode de fabrication des fils HTc 2G sont très différentes de celles des fils HTc 1G. Les premiers sont réalisés en déposant une couche mince de quelques micromètres d'YBCO sur un substrat métallique par des techniques et procédés physico-chimiques. Ce substrat est en général un alliage nickel-tungstène, sur lequel vient s'ajouter une couche tampon sur laquelle est déposé le précurseur YBCO. Une couche extérieure de cuivre/argent est rajoutée pour stabiliser le

Conducteur. Les rubans obtenus ont une épaisseur comprise entre 0,1 et 0,2 mm et une largeur comprise entre 4 mm et 12 mm. Afin d'illustrer ces différentes couches.

- Le fil MgB₂ (10k et 20k) a tout d'abord été utilisé pour travailler sous faible champ magnétique < 3 T et à haute température 20 K (-253°C). C'est un fil produit en grandes longueurs utilisables en alternatif et continu, il ne pose aucun problème de bobinage.
- Le fil BSCCO (20k et 50k) est un supraconducteur utilisé pour des applications en courants continus et alternatifs. Ces fils sont produits en longueur kilométrique.

Des techniques d'extrusions et d'empilements de la métallurgie classique sont la base de la conception de ce fils selon les étapes suivantes :

1. Remplissage d'un tube d'argent (Ag) par le précurseur,
2. Extrusion du tube (alignement des cristaux du précurseur),
3. Empilement dans un tube d'argent de taille supérieure,
4. Laminage et formation d'un ruban,
5. Traitement thermique complexe (atmosphère contrôlée) [8]. (Fig I.3).

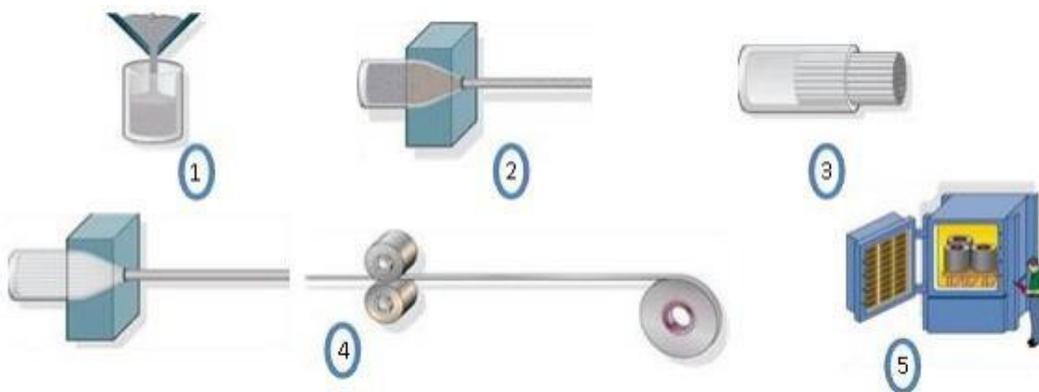


Figure I.3. Processus de fabrication de rubans BSCCO [8]

Tableau I.3 : J_c , H_c et prix dans quelques supraconducteurs de type II, (à 0 K). [12]

Matériaux	Densité de courant (A/mm ²)	Champs (tesla)	Prix
Nbti	4000	5T	1€/kA/m à 3T ou 7€/1kA/m
YbaCuO	30000	cp	220 €/kA/ m.
BSCCO	1000	20T	220 €/ka/ m
MgB2	10000	5T	10€/kA/m sous 2T à 20K.

Les prix de fluides cryogéniques :

Les liquides cryogéniques sont utilisés pour maintenir et faire descendre la température de matériaux pour qu'il devienne supraconducteur (Azote liquide).

Caractéristiques et performances des cryo-fluides. [10]

Tab I.4 : Les prix de fluides cryogéniques [12]

Liquides cryogéniques	Température (Kelvin)	Prix
Hélium (5,3.10 ⁻⁶ dans l'air)	5.2	3,3 € à 10 € /litre selon quantité
Azote (0,78 dans l'air)	126.21	0,1 €/litre
Argon (9,6. 10 ⁻³ dans l'air)	150.8	8 €/litre

7. Applications des supraconducteurs en électrotechnique :**7.1. Lignes de transport :**

Aujourd'hui les câbles de transport de courant entre les centrales et les industries sont en cuivre ou en aluminium. L'inconvénient de ces deux métaux est d'avoir une résistance (pertes joules). Pour éviter ou diminuer les pertes, on a utilisé les supraconducteurs qui ont une résistance nulle. Au Japon, la compagnie Furukawa Electric a installé en mars 2004 un câble refroidi à l'azote de 500 m de longueur, de 77 kV et 1 kA dans le réseau électrique pour le tester pendant une année [14].

7.2. Systèmes de stockage de l'énergie :

Les matériaux supraconducteurs ont une résistance nulle, ils facilitent le stockage d'énergie sous forme magnétique dans une bobine supraconductrice court-circuitée d'inductance propre L . Dans laquelle circule un courant I . Ces bobines sont appelé SMES (Superconducting Magnetic Energie Storage). Le but de bobinage supraconducteur est d'éliminer les pertes joules lorsqu'on le met en court-circuit.

7.3. Machines électriques

L'utilisation des supraconducteurs Htc a permis un développement continu des moteurs supraconducteurs. Ils ont remplacé des bobines en cuivre par des enroulements supraconducteur pour augmenter la densité de courant de fil et le couple massique de ces machines.

8. Conclusion :

Ce chapitre est réservé à l'étude théorique sur les matériaux supraconducteurs. On trouve deux types de matériaux de type I et II. Ces derniers sont limités par des grandeurs critiques qui sont :

- La température critique T_c ,
- Le champ magnétique critique H_c ,
- La densité de courant critique J_c .

Nous avons abordé les domaines d'application de la supraconductivité dans l'électrotechnique.

Chapitre II
Machine synchrone

1. Introduction :

La machine synchrone est un engin électrique qui permet de convertir une énergie électrique en énergie mécanique ou convertir l'énergie mécanique en une énergie électrique. Ce dispositif fonctionne en deux modes : Moteur ou Génératrice. La machine synchrone se compose en deux parties : une tournante le rotor et l'autre fixe stator. Le rotor tourne à la même vitesse que le champ du stator.

➤ Rotor :

Cette pièce dans la machine est l'inducteur. Il crée un champ magnétique par des bobines ou par des aimants permanents. Le rotor est alimenté en courant continu.

➤ Stator :

Habituellement l'induit est le stator. Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile (Fig. II.1).

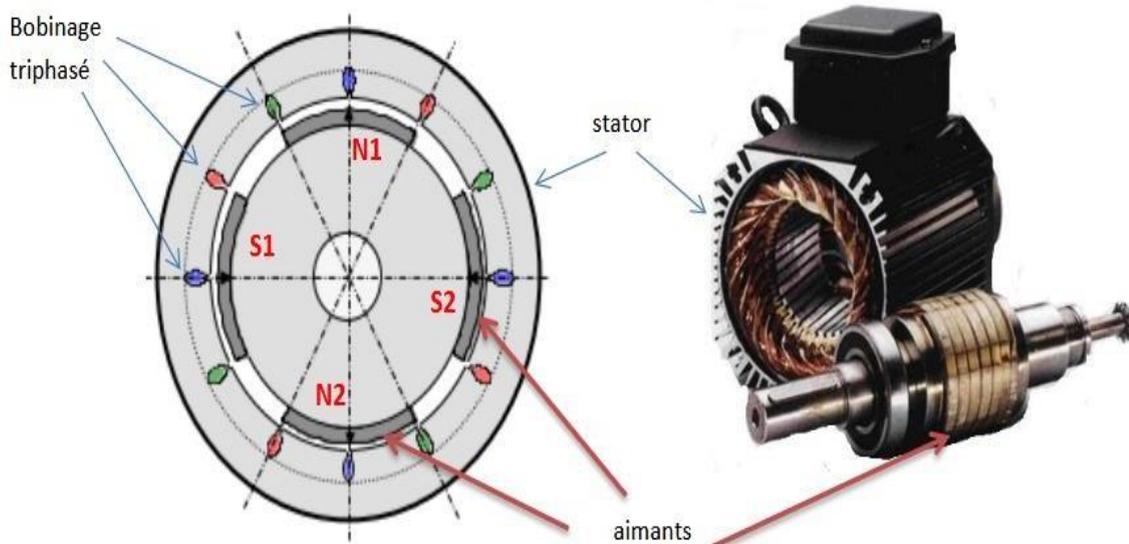


Figure II.1. Structure d'une machine à 2 paires de pôles [14]

Il existe deux types de machine synchrone :

➤ **Machine à pôles saillants :**

- Le stator a un circuit magnétique encoché avec un bobinage triphasé,
- Le rotor a des pôles saillants,
- Un courant continu alimente le rotor à travers des bagues et des balais,
- Le nombre de pôles varie de 2 à 128 ou plus,

➤ **Machine à pôles lisses :**

- Le stator est un circuit magnétique circulaire encoché,
- Un bobinage triphasé est placé dans les encoches,
- Le rotor est également un circuit magnétique circulaire,
- Un enroulement continu multipolaire est placé dans des encoches au rotor (Fig. II.2) [14].

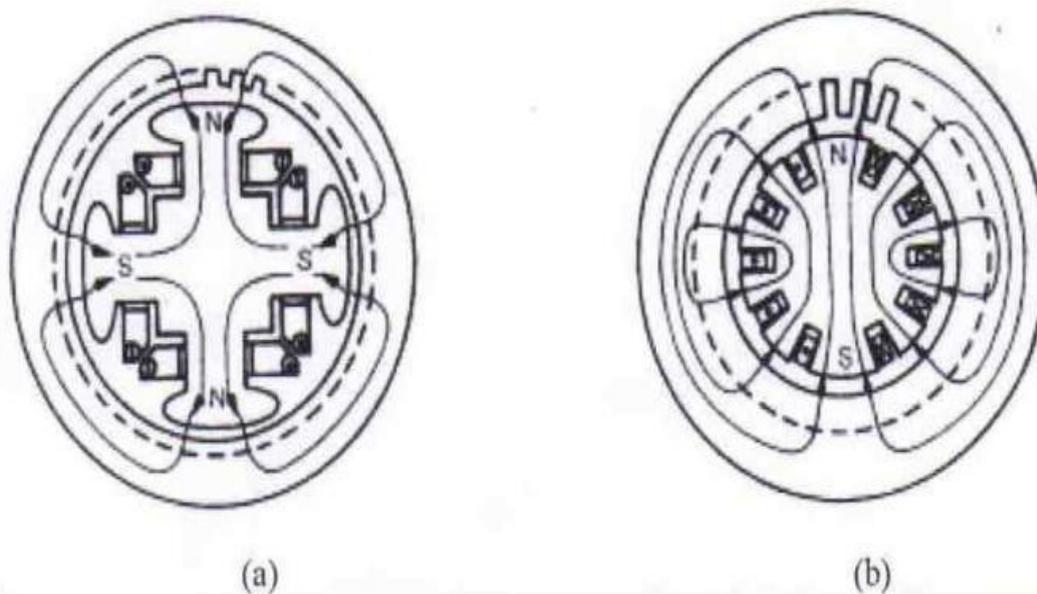


Figure II.2. Moteur synchrones à inducteur bobiné
a) rotor à pole saillants, b) rotor à pole lisses [14]

2. Machine à flux radial (MSFR) :

La machine synchrone à flux radial est une engin classique, elle est la première machine à aimant permanent produite dans l'industrie en forme cylindrique. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la performance des aimants permanents, elle commence à supplanter la machine asynchrone. Dans cette machine on peut utiliser le bobinage de types concentré pour minimiser les pertes joules. 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, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Fig. II-3) [15].

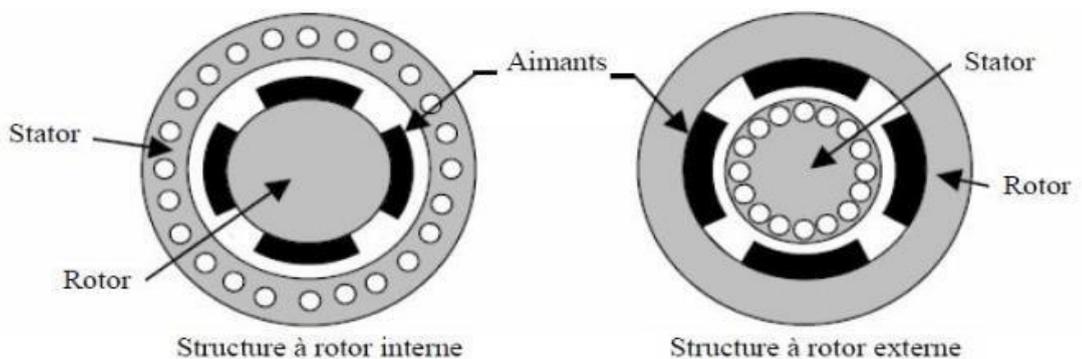


Figure II.3. Exemple de structure à rotor interne et à rotor externe [15]

2.1. Machine à flux radial à rotor intérieur :

Généralement la machine à flux radial la plus utilisée est à rotor intérieur à cause de sa simplicité et son faible coût de réalisation. À l'intérieur de l'armature stationnaire des enroulements, on trouve des pôles rotoriques tournant. Le stator est de forme cylindrique (Fig. II-4).

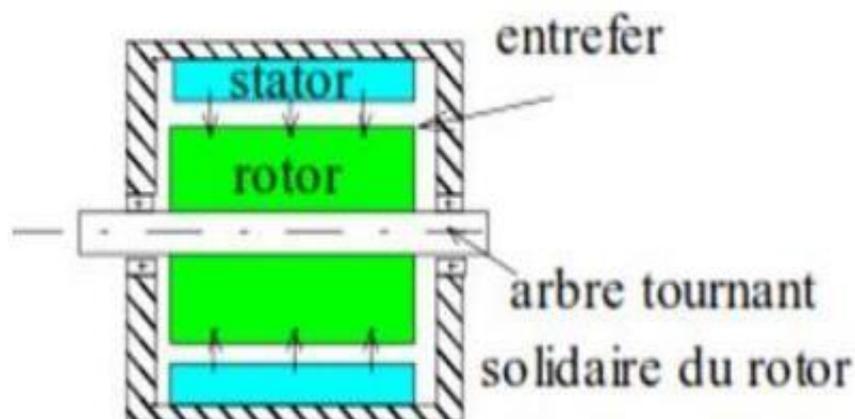


Figure II.4 . Structure Machine à flux radial à rotor intérieur [15]

2.2. Machine à flux radial à rotor extérieur :

C'est une machine moins utilisée en raison de sa difficulté en réalisation. Dans cette machine le rotor est en forme cylindrique et le stator est au centre de la machine, les circuits magnétiques sont les mêmes que ceux du générateur radial à rotor interne (Fig.II-5) [15].

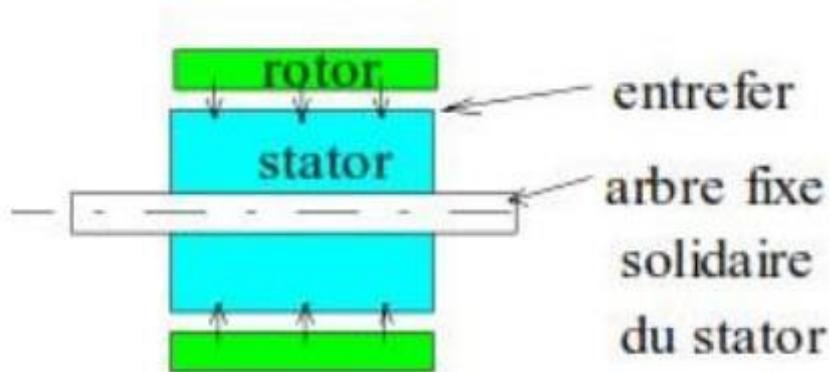


Figure II.5. Structure d'une Machine à flux radial à rotor extérieur [15]

2.3. Les avantages et les inconvénients de la machine à flux radiale :**Les avantages :**

- Un nombre de pôles plus élevé grâce au diamètre du rotor,
- Un couple plus grand,

Les inconvénients :

- Pour les machine à flux radial à rotor intérieur, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [16].
- Machine à flux radial à rotor extérieur est difficile à réaliser,
- Le volume de la machine reste un important inconvénient qui va limiter leurs utilisations avec des certaines conditions dans les différentes applications industrielles.

3. Machine à flux axial (MSFA) :

Historique des machines indiquent que les premières machines électriques sont des machines à flux axial (Machine de Faraday, 1821). C'est une machine où le flux circule dans la direction axiale. 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 [17].

3.1. Structures d'une machine à flux axial :

3.1.1. Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor (simple entrefer) :

Les machine à flux axial à 1 stator et 1 rotor est la première machine à flux axial apparue. Elle a une structure la plus simple comprenant un rotor et un stator. Le noyau du stator peut-être soit fendu ou sans fente. Leur fonctionnement est basique car il ne fait intervenir qu'un stator et un rotor. Le flux crée par un bobinage reparti classique, présent au stator va interagir avec le flux crée par les aimants permanents collés en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique [18]. Cette machine accuse de forts problèmes d'attraction entre stator et rotor malgré sa simplicité de conception (Fig. II-6).

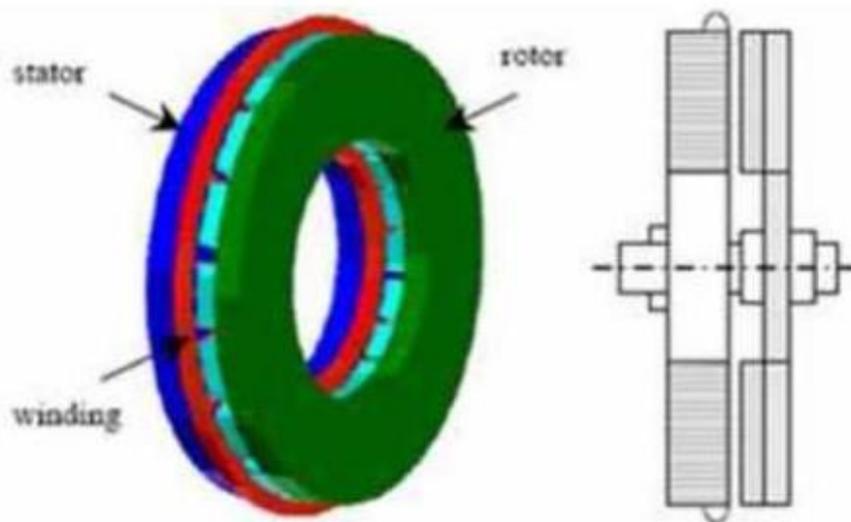


Figure II.6. Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor [17]

3.1.2. Machine à flux axial à double entrefer :

Dans ce type de machine existe deux configurations possibles les machines discoïdes à stator interne et celles à rotor interne.

Les machines discoïdes à stator interne sont caractérisées par la présence de deux entrefers, dans cette configuration le stator est situé entre deux rotors. Ces machines parfois appelées machines Torus. Elles peuvent être soit de type NS, c'est-à-dire que les aimants placés face à face sont de polarité différente qui peut être aussi Stator intérieur à cœur ferromagnétique ou Stator intérieur sans noyau. Soit de type NN et dans ce cas les aimants placés face à face sont de même polarité. Le Stator intérieur à fentes avec enroulement imbriqué ou stator intérieur sans fente avec enroulement toroïdal (Fig. II-7) [17].

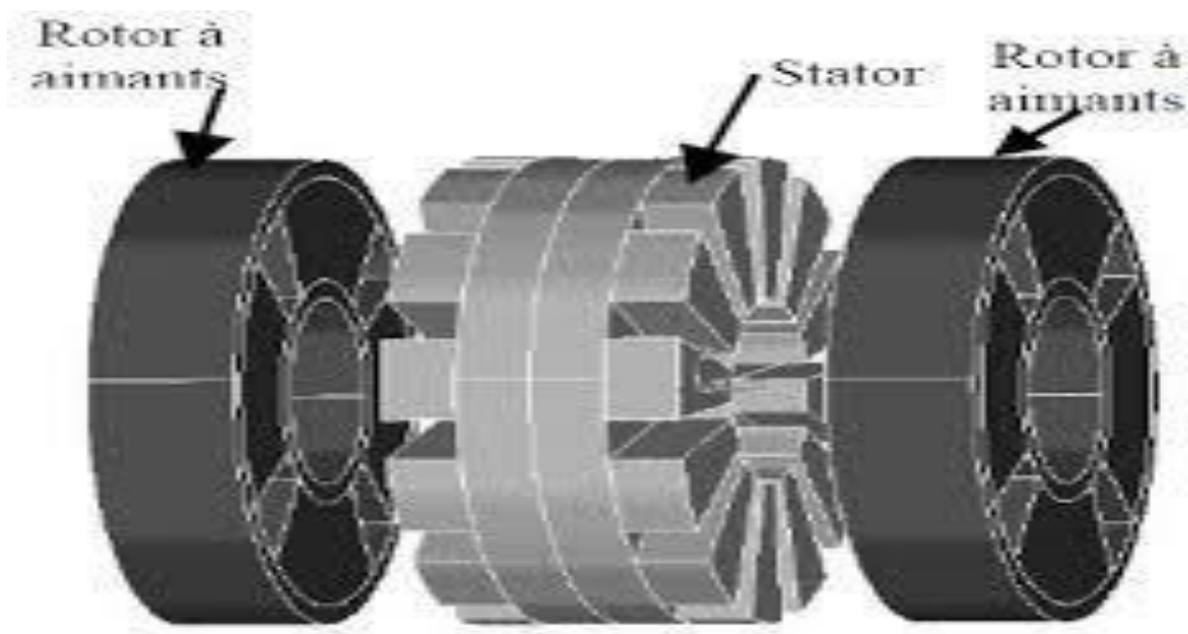


Figure II.7. Machine à flux axiale à double entrefer [19]

3.1.3. Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques :

C'est une machine à plusieurs disques ou on ajoute sur le même axe de rotation un nouveau stator et rotor dans le but d'augmenter la puissance ou le couple d'une machine. Ces machines s'appellent des machines multi-niveaux.

Pour le fonctionnement reste le même avec les machines à flux axial à simple ou à doubles entrefers. En Général les machines multi-niveaux sont à stator interne. Dans la littérature scientifique, ces machines sont étudiées pour des applications à grandes puissances telles que l'éoliennes ou pour la traction ferroviaire (Fig. II-8) [17].

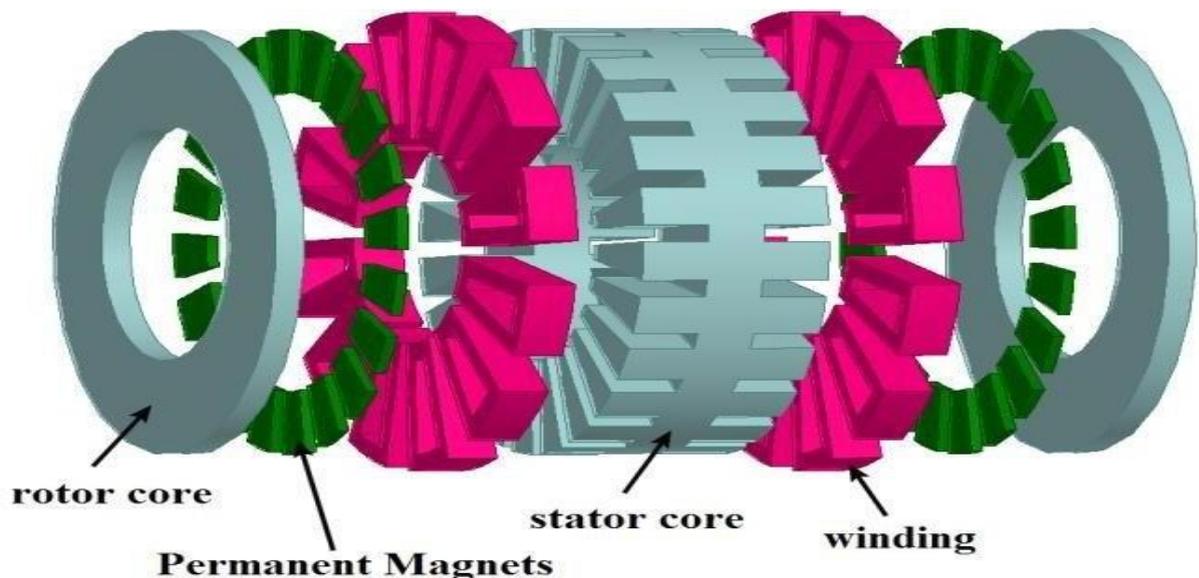


Figure II.8. Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques

3.2. Avantages et inconvénients Machines à flux axial :

Avantages :

- L'optimisation de la surface utile de génération du couple pour la structure discoïde par rapport aux structures cylindriques,
- Source d'une densité de puissance importante pour des géométries axialement courtes,
- Les structures discoïdes offrent également une grande modularité naturelle par juxtaposition des modules, la puissance étant déterminée par le nombre de disques pour un diamètre donné [20].

Inconvénient :

- Les machines à flux axial sont de nature tridimensionnelle et donc plus difficiles à modéliser.

4. Comparaison entre machines à flux axial et machines radial

Sources	Performances comparées	Contraintes de comparaison	Conclusions
[21]	Couple volumique en fonction du nombre de paires de pôles	Densités linéiques du courant et les inductions dans l'entrefer sont identiques	Le couple volumique des MSAPFAs est toujours supérieur à celui des MSAPFRs
[22]	Volume des parties actives	Masses identiques d'aimants	Les MSAPFAs deviennent plus performantes à partir de $2p=12$ et $(0.6 \leq \lambda D \leq 0.7)$
[22]	Volume des parties actives	Diamètres externes fixes	Les MSAPFAs deviennent plus performantes quand $2p=2$ ou $2p \geq 14$
[23]	Puissance volumique et Rapport des volumes VAF/VRF	0.25 kW à 10 kW 1000 tr/mn	Puissance volumique des MSAPFAs est supérieur, et VAF/VRF=0.2
[24]	Couple volumique et Rendement	150 kW / 1200 tr/mn	MSAPFAs offrent un couple volumique et un rendement plus intéressant
[25]	Couple massique et Rendement	2.25 kW à 37 kW / 1800tr/mn	Les deux structures présentent les mêmes couples massiques et rendements MASPFAs nécessite plus d'APs

5. Applications de la MSFA :

On trouve plusieurs applications pour les machines à flux axial dans plusieurs domaines (génération de l'énergie, traction terrestre et navale).

Dans le but de montrer leurs avantages, nous allons mentionner quelques exemples d'applications de ces machines :

5.1. Énergie éolienne :

Les machines à doubles entrefers et à stator interne occupent une large place dans les énergies éoliennes. Ces dernières ont permis la suppression du multiplicateur mécanique, la raison principale est que en évitant les couplages et réduction de la taille de la machine, le système devient plus léger, plus efficace, sans entretien et sans vibration [26].

5.2. Propulsion navale:

Les machines à flux axial sont utilisées aussi dans le domaine Propulsion navale à cause de leur couple élevé à basse vitesse qui permet une nette amélioration de la poussée d'hélice ces machines permettent aussi de diminuer le coût d'entretien et le rapport de vitesse du réducteur d'hélice dans les mêmes contraintes d'espace, et d'améliorer le rendement.

5.3. Moteur à roue :

Le remplacement des moteur de traction conventionnels par des moteurs roues dans les véhicules électriques ou hybrides permet de :

- libérer plus de place sans modifications excessives,
- éliminer les arbres d'entraînement et de distribution,
- avoir un contrôle plus précis du couple sur les deux roues simultanément ce qui offrent plus de stabilité pour les véhicules dans les virages [27].

5.4. Traction électrique

Pour la traction ferroviaire permet de réduire la masse de la locomotive ils ont utilisé des moteurs à fort couple et à faible vitesse (Machine synchrone à flux axial), cependant cette application impose à ces moteurs un diamètre limité, parmi les applications de traction électrique les véhicules électriques, se distingue hybride véhicules qui combinent un moteur à combustion interne avec un moteur électrique [28] [26].

6. Pourquoi utiliser les supraconducteurs ?

Aujourd'hui les machines électriques conventionnelles utilisant du cuivre, du fer. Tandis que les aimants permanents ne sont pas utilisables dans le domaine de la propulsion marine ou l'éolien qui exigent un gain en compacité et en rendement supplémentaire qui est impossible à obtenir avec les limitations technologiques que l'on connaît sur ces machines. Pour améliorer ces machines les chercheurs ont apporté une nouvelle technologie (la supraconductivité dans les machines) qui permet d'augmenter les densités de courant dans la machine, tout en diminuant les pertes Joule.

Exemples de prototypes développés à travers le monde :

Ils existent trois types de technologies qui ont été testés à ce jour :

- Utilisation des supraconducteurs sous forme de fil pour remplacer les conducteurs en cuivre, le champ magnétique est ainsi directement liée aux ampères-tours,
- Utilisation de supraconducteur massif comme alternative aux aimants permanents,
- Utilisations combinées des fils supraconducteurs et des supraconducteurs massifs.

Les fils supraconducteurs sont utilisés pour générer de forts champs magnétiques et les pastilles permettent de moduler le champ dans l'entrefer (propriété diamagnétique). En comparaison avec les deux autres exemples d'utilisation qu'on qualifie de cryoscopies par leur ressemblance avec les machines conventionnelles, cette topologie est la plus originale.

7. Machine synchrone supraconductrice à flux axial :

La supraconductivité dans les machines synchrone à flux axial permet d'augmenter les densités de courant et éliminer les pertes joule. Les topologies 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 [29].

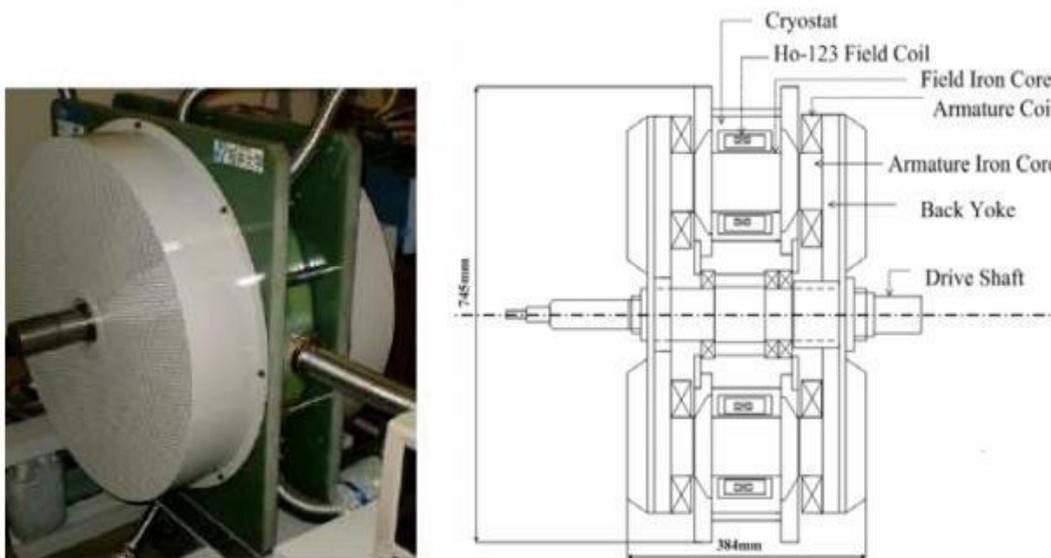
Dans ces machines on distingue deux catégories :

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

7.1. Machines à flux axial avec bobines supraconductrices.

Sont des machines qui ont un induit tournant avec bobinages en cuivre et un inducteur supraconducteur fixe. Il utilise l'azote liquide pour refroidir à une température de 77 k. Le stator est composé de six bobines identiques en cuivre de forme sectorielle.

Au Japon, IHI Corporation est porteur de plusieurs projets, de la machine à inducteur supraconducteur de 22kW refroidis à l'azote liquide par un cryocooler à la machine composée seulement d'enroulements supraconducteurs de 12.5Kw (Fig.II-9) [10].



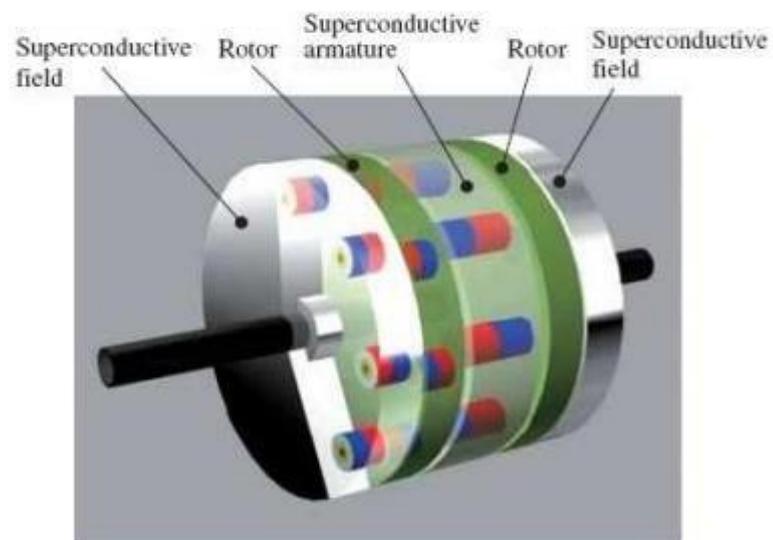
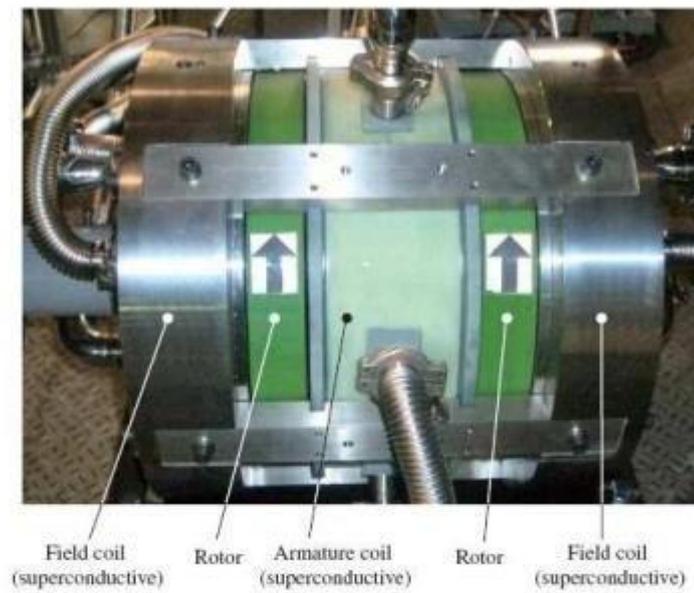


Figure II.10. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5kW par IHI[10]

7.2. Machines à flux axial avec des matériaux supraconducteurs passifs (bulks) :

C'est un inducteur 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'YBCO de l'inducteur est refroidi par l'azote liquide (Fig. II-11) [29].

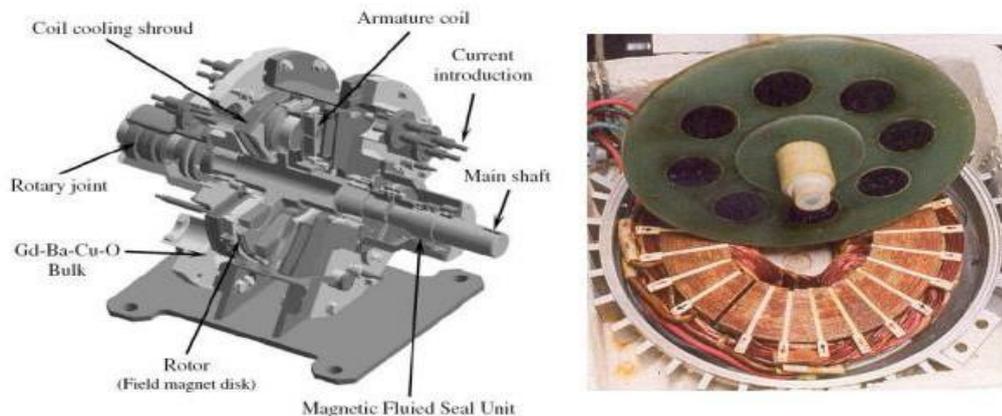


Figure II.11. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteur massifs IHI [10]

8. Avantages/inconvénient de la machines à flux axial supraconductrice :

- 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,
- La présence de ces dernières est nécessaire afin d'augmenter la valeur des constantes de temps,
- Les machines à flux axial sont intrinsèquement de nature tridimensionnelle et donc plus difficile à modéliser,
- La réalisation d'un stator de machine à flux axial avec des tôles laminées est délicate surtout si le stator doit contenir des encoches.

9. Calcul des paramètres de la MSFA :

Le nombre de spires est un paramètre secondaire dans le dimensionnement d'une machine électrique. Néanmoins, il influe sur les éléments caractéristiques que sont les inductances (propres, mutuelles et de fuites) et la résistance statorique [30].

9.1. Calcul des inductances propres et mutuelles :

Pour calculer les inductances propres et mutuelles, il faut calculer le flux engendré par ces inductions.

Le champ magnétique B (champ propre) est:

$$B = \mu_0 n i = \mu_0 N / l \ i$$

Le flux propre Θ propre est alors :

$$\Theta_{\text{propre}} = N \int B \cdot dS = N (BS) = \mu_0 N^2 S / l \ i$$

L'inductance propre L est alors :

$$L_f = \Theta_{\text{propre}} / i = \mu_0 N^2 S / l \ i / i = \mu_0 N^2 S / l$$

-Expression de l'inductance mutuelle :

Les champs B1 et B2 étant respectivement proportionnels aux courants i1 et i2, les flux de mutuelle inductance peuvent s'écrire :

$$\Theta_{1 \rightarrow 2} = M_{12} i_1 \quad \text{et} \quad \Theta_{2 \rightarrow 1} = M_{21} i_2$$

Nous admettons que les deux coefficients M12 et M21 sont égaux et désignerons par inductance mutuelle M leur valeur commune :

$$M = \Theta_{1 \rightarrow 2} / i_1 = \Theta_{2 \rightarrow 1} / i_2$$

9.2. Calcul de la résistance statorique :

$$r = \rho * l / s$$

Avec ρ la résistivité ($\Omega \text{ m}$) et S la section de la spire (m^2)

10. Méthodes pratiques de test du MSFA : Ω

Après avoir vu comment calculer les paramètres en théorie, maintenant nous allons identifier les résistances et les inductances en pratique.

10.1. Identification des résistances :

Pour la mesure pratique des résistances on applique une alimentation avec une tension continue et à travers d'un voltmètre et un ampèremètre on peut mesurer la tension et le courant parcouru dans les résistances.

10.2. Identification des inductances propres et mutuelles :

Les tests d'identification des inductances consistent à appliquer des tensions alternatives.

Inductances mutuelles :

$$M = X_i / 2\pi f$$

Inductances propres :

$$L_f = l_i (w_i^2)$$

11. Conclusion :

Dans ce chapitre à l'étude théorique sur les machines synchrones à flux axial et radial et les différents topologies et structures de ces deux types.

Après nous avons fait une comparaison entre les deux types axial et radial en montrant la supériorité de la machine à flux axial.

Nous avons présenté la machine synchrone supraconductrice à flux axial et comment calculer les paramètres de la MSFA leurs résistances, inductances mutuelles et propres.

Chapitre III
Etude Experimentale
d'un inducteur
supraconducteur

1. Introduction :

Ce chapitre est réservé à l'étude expérimentale d'un inducteur d'une machine supraconductrice à flux axial réalisée au laboratoire de recherche de l'Université Djilali Bounama de Khmis Miliana. L'objectif de cette étude est de connaître le meilleur placement des bobines pour avoir un champ élevé. Dans ce chapitre nous avons testé les paramètres d'un 'inducteur. Ces tests comprennent deux parties :

- Test à chaud,
- Test à froid.

2. Présentation de l'inducteur

L'inducteur est un disque de 8.5 cm composé de six bobines en cuivre placées en série et deux pastilles supraconductrices type II en YBCO refroidis par de l'azote liquide. Ceci dans le but de créer la variation du champ magnétique qui est basée sur la concentration magnétique. (Fig III.1)



Figure III.1. Des pastilles supraconductrices YBCUO

Nous avons testé deux prototypes pour connaître le meilleur.

Prototype I :

Dans le prototype I, l'inducteur est sous forme disque de 8.5cm de diamètre et de six bobines en cuivre horizontal et deux pastilles YBcuo, l'espace entre les deux pastilles est de 1.5cm. (Fig III.2)



Figure III .2. Inducteur avec des bobines en cuivre horizontal

Prototype II :

Dans le prototype II, l'inducteur est sous forme de disque de 8.5cm de diamètre et de six bobines en cuivre vertical et deux pastilles YBcuo, l'espace entre les deux pastilles 1.5cm. (Fig III.3)



Figure III.3. Inducteur avec des bobines en cuivre vertical

3. Calcul des paramètres de l'inducteur :

Calcul de l'inductance de prototype I :

Pour calculer l'inductance on doit appliquer deux sources de tension (une tension alternatif et tension continue) à l'aide d'une alimentation. Nous relevons la tension aux bornes des bobines et le courant parcouru à l'aide d'un ampèremètre et voltmètre.

Alimentation sinusoïdal :

On appliquant une différence de potentiel U_{ac} alternatif entre les extrémités, l'une est traversée par un courant électrique I_{ac} donné.

- Calcul de l'impédance :

$Z = U_{ac}/I_{ac}$ impédance réel.

Alimentation continue :

On appliquant une différence de potentiel U_{co} continue entre les extrémités, l'une est traversée par un courant électrique I_{co} donné.

- Calcul de la résistance

$R_s = U_{co}/I_{co}$

Calcul de réactance X_s :

$$X_s = \sqrt{Z^2 - R_s^2}$$

$$L_s = X_s/\omega$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

Tension continue

Tableau III.1. Représente les valeurs de tension et courant

Tests	Tension (V)	Courant (A)
1	4.95	5.01
2	3.29	3.24
3	2.97	2.91

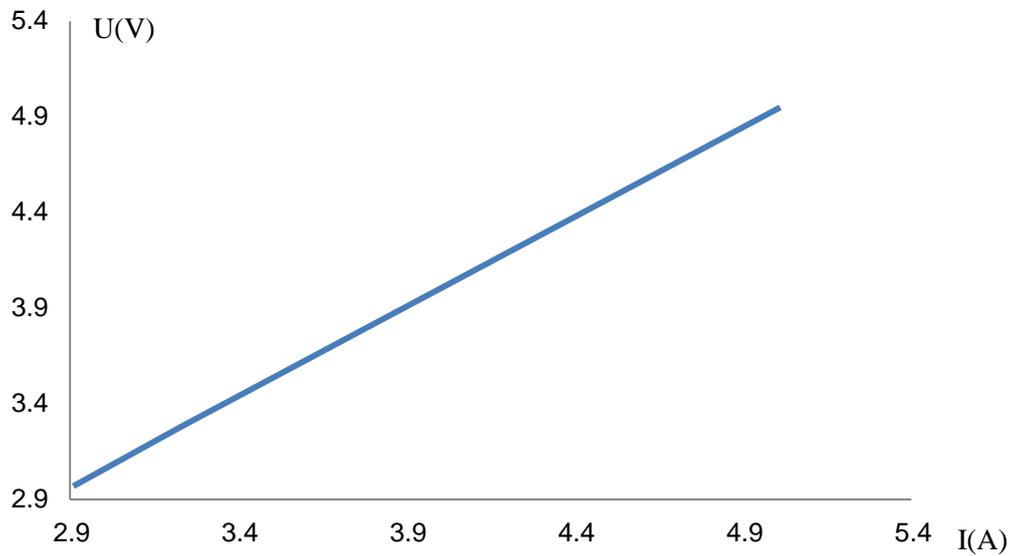


Figure III.4. Représente les valeurs de tension et courant continu

Calcul de la résistance R_s

$$R_s = U_{co} / I_{co}$$

$$R_s = 1.01$$

Tension alternatif

Tableau III.2 .Représente les valeurs de tension et courant alternatif

Tests	Tension (V)	Courant (A)
1	3.05	2.85
2	4.99	4.79
3	6.85	6.51

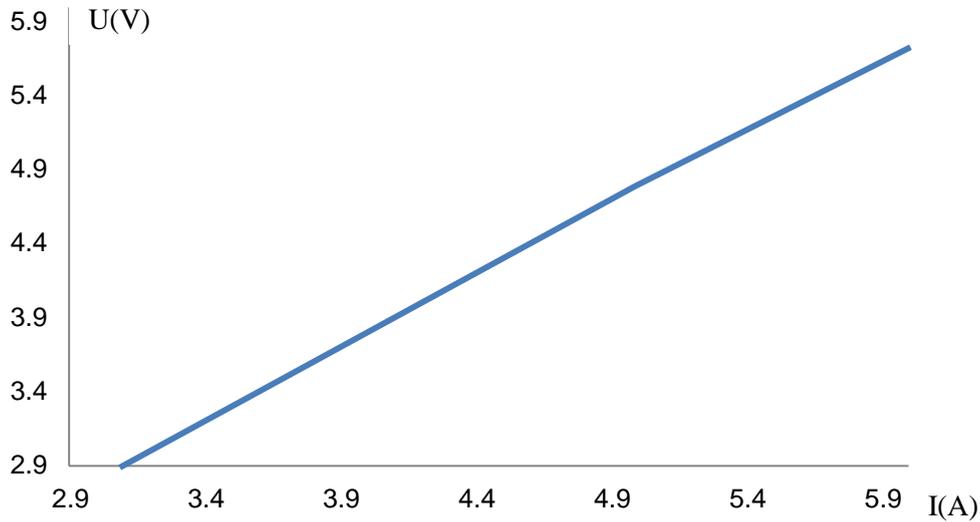


Figure III.5. Représente les valeurs de tension et courant alternatif

Calcul l'impédance :

$$Z=U_{ac}/I_{ac}$$

$$Z=1.05$$

Calcul de la réactance :

$$X_s=\sqrt{Z^2 - R_s^2}$$

$$X_s=0.28$$

Calcul de l'inductance :

$$L_s=X_s/\omega =X_s/(2*\pi*f)$$

$$L_s=9.1*10^{-4}H$$

Prototype II:

Tension continues:

Tableau III.3. Représente les valeurs de tension et courant continu prototype II

Tests	Tension (V)	Courant (A)
1	1.85	2.33
2	2.9	3.63
3	4.37	5.42

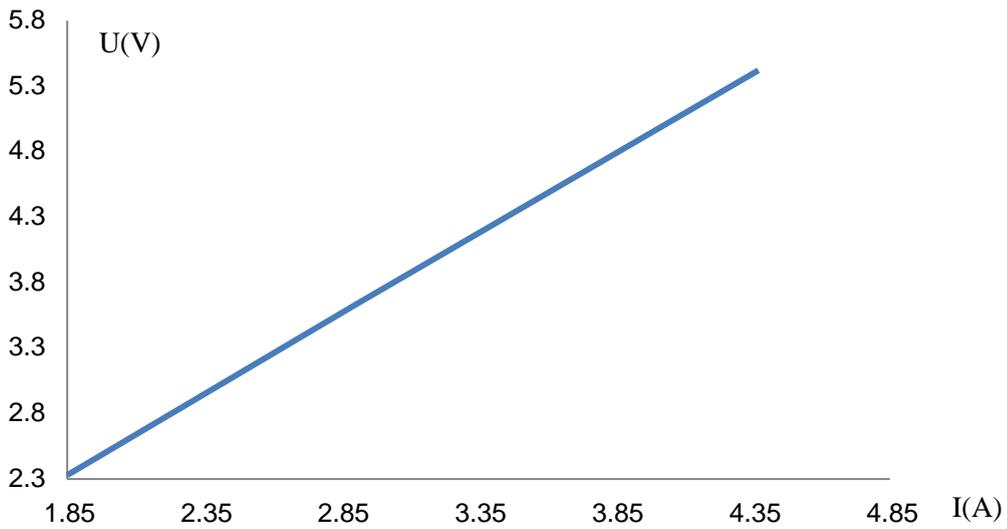


Figure III.6. Représente les valeurs de tension et courant continu prototype II

Calcul de la résistance R_s

$$R_s = U_{co} / I_{co}$$

$$R_s = 0.63$$

Tension alternative:

Tableau III.4. Représente les valeurs de tension et courant alternatif prototype II

Tests	Tension (V)	Courant (A)
1	4.22	5.21
2	5.21	6.6
3	6.1	8

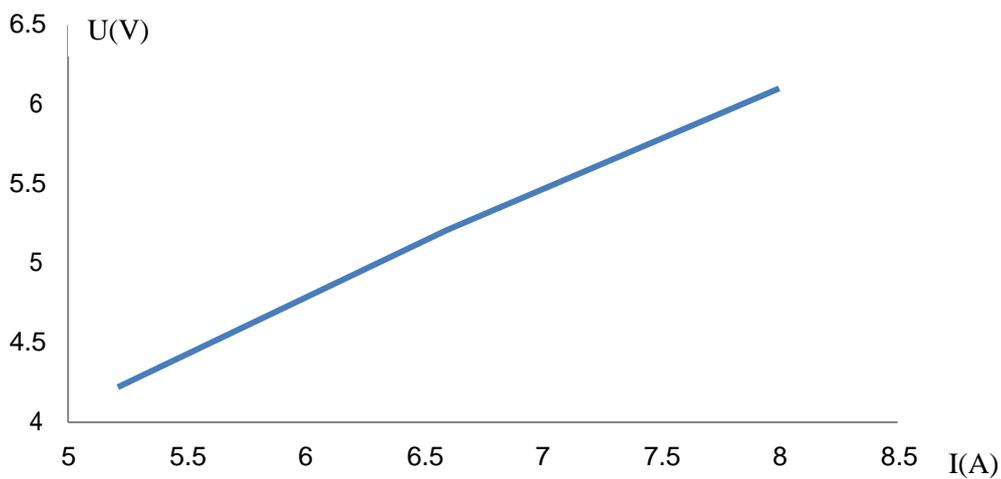


Figure III.7. Représente les valeurs de tension et courant alternatif prototype II

Calcul l'impédance :

$$Z=U_{ac}/I_{ac}$$

$$Z=0.78$$

Calcul de la réactance :

$$X_s=\sqrt{Z^2 - R_s^2}$$

$$X_s=0.45$$

Calcul de l'inductance :

$$L_s=X_s/\omega =X_s/(2*\pi*f)$$

$$L_s=1.4*10^{-3}$$

4. Réalisation de deux prototypes

Prototype I:

4.1.1 Tests à chaud à courant = 3.48A

On appliquant une tension continue par une alimentation électrique AC/DC à l'aide de voltmètre en parallèle, ampèremètre en série et tesla mètre en relevant le champ dans les bobines au centre et à coté de la bobine. (Fig III.4)

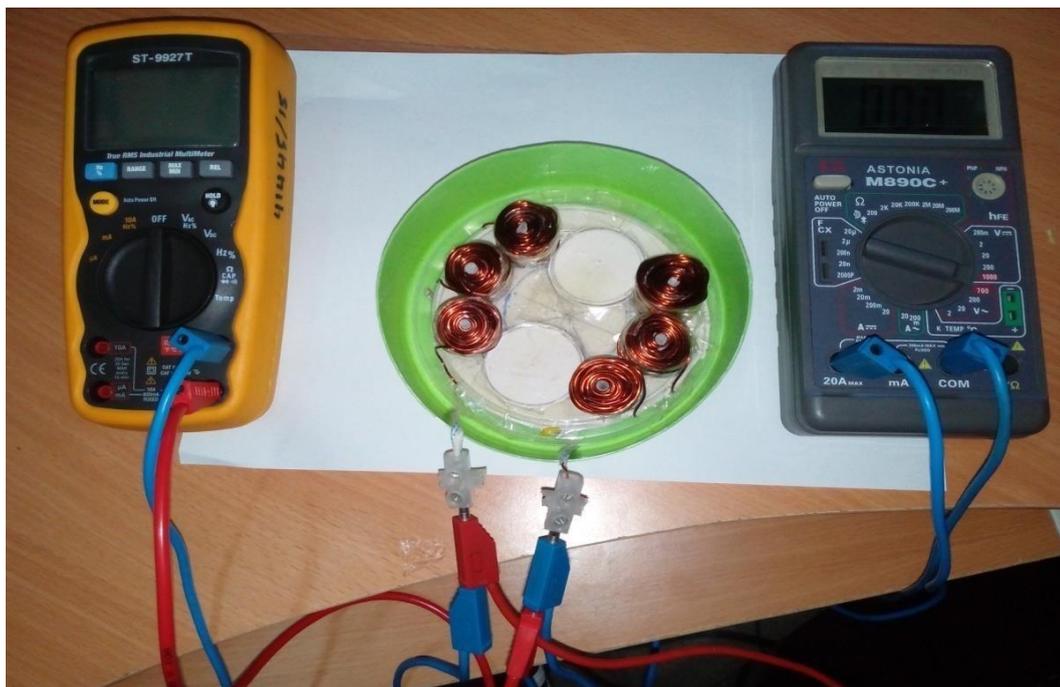


Figure III.8. Prototype I sans l'utilisation de l'azote liquide

Tableau III.5. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I à chaud:

Bobines	1	2	3	P1	4	5	6	P2
Champ (mT)	11.5	7.5	7.2	0.6	10.9	10	7.9	0.6

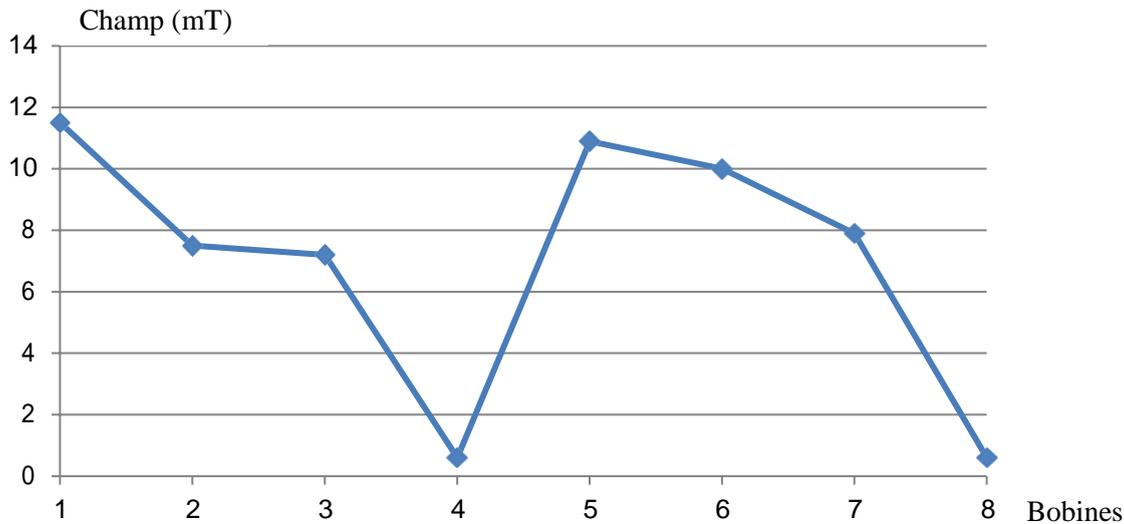


Figure III.9. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I à chaud

Commentaire :

Pour ce prototype on remarque que le champ est très élevé dans les bobines 1 et 4. Dans le test à chaud on a augmenté le courant jusqu'à 6A ce qui entraîné l'échauffement des bobines.

4.1.2. Test à froid :

Pour ce test on ajoute l'azote liquide pour refroidir les bobines, les pastilles et on a mesuré le champ avec le tesla mètre au centre et à coté des bobines. Pour l'inducteur sans et avec pastilles et puis on a appliqué une tension continue.

Inducteur sans pastilles a courant $I = 8.45A$.

Dans ce test on a ajouté l'azote liquide et on a refroidit les bobines puis on a mesuré le champ au centre et à coté des bobines. Les résultats étaient les suivants :

Bobines	1	2	3	Pastille1	4	5	6	Pastille2
B (mT) au centre	20.4	18.5	18.1	2.4	18.1	19.2	18.6	2.4
B (mT) a coté	1.1	2.6	3.1	1.3	1.8	1.9	3.1	1.8

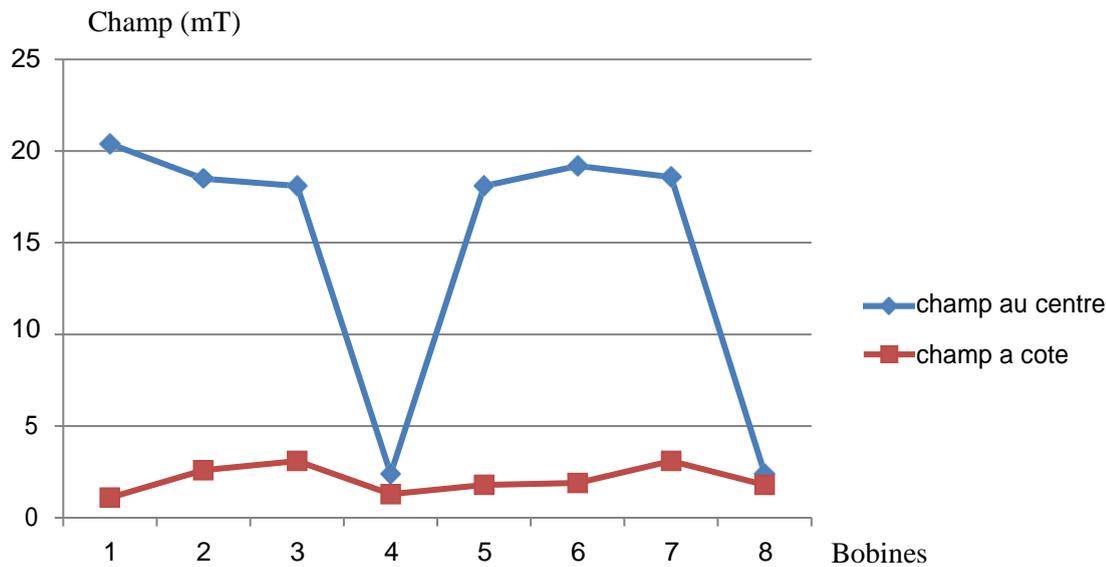


Figure III.10. Représente les valeurs des champs pour le Prototypé I sans pastilles à froid

Pour une densité de courant 8.45A :

L'induction magnétique dans le cas d'un inducteur sans pastilles est faible comparé à celui de l'inducteur avec pastilles. Tandis que l'induction magnétique au centre de la bobine est plus élevée comparé à celle située à coté. Elle est la même dans les pastilles.

Au centre de la bobine l'induction magnétique se centralise sur les bobines 1 et 5, et dans le cas d'à coté ce dernier se centralise sur les bobines 3 et 6.

Inducteur avec pastilles a courant $I = 8.45A$:

Pour cette expérience on ajoute l'azote liquide pour refroidir les pastilles et tester l'effet Meissner avec l'aimant et on a mesuré le champ au centre et à coté. (Fig III.5)



Figure III.10. Prototypé I avec l'utilisation de l'azote liquide

Tableau III.6. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I avec pastilles à froid :

Bobines	1	2	3	Pastille 1	4	5	6	Pastille 2
B (mT) au centre	34	34.8	35	2.1	30	26.8	29.9	2.3
B (mT) A cote	1.1	2.6	3.1	1.3	1.8	1.9	3.1	1.8

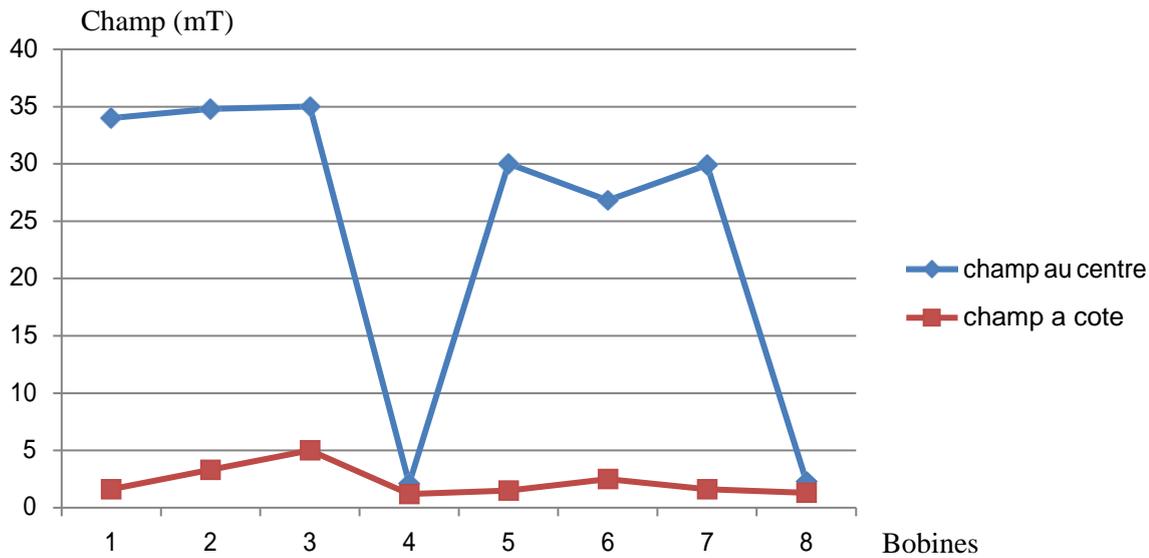


Figure III.11. Représente les valeurs des champs pour le Prototype I avec pastilles à froid

Pour une densité de courant 8.45A, le graphe III.7 montre que l'induction magnétique au centre d'une bobine est plus grande que celle d'à coté. L'induction magnétique se centralise sur les bobines 3 et 6. L'induction magnétique au centre d'une pastille est plus grande que celle d'à coté.

4.1.3. Comparaison entre Test à chaud et Test à froid :

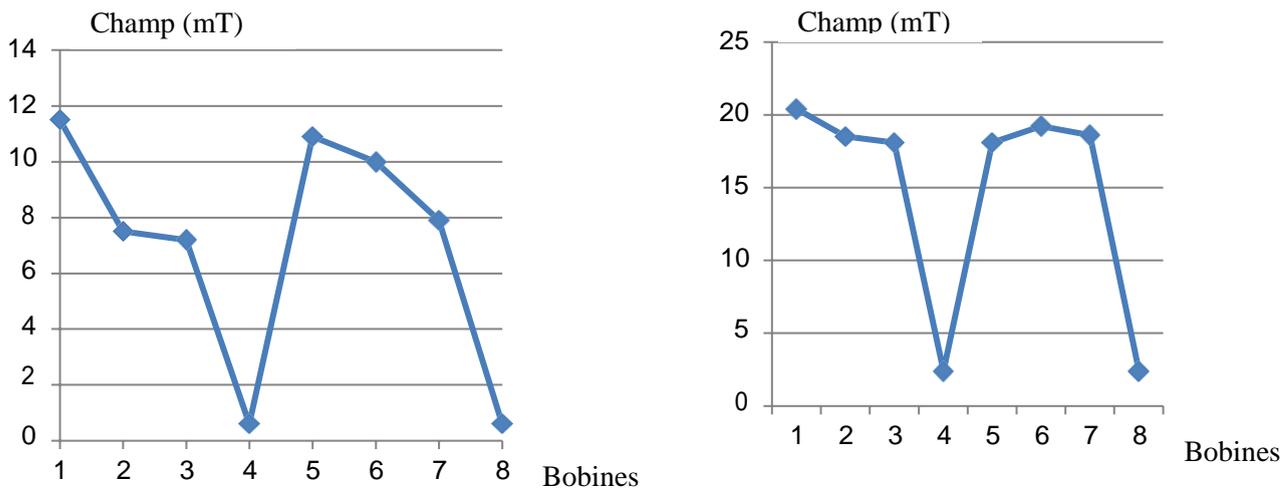


Figure III.12. Représente les valeurs du champ magnétique à chaud et à froid

On remarque que le champ dans le test à froid est plus élevé que le test à chaud. Lorsqu'on refroidit les bobines est double par rapport au sans refroidi les bobines. On conclut que pour élever le champ on doit refroidir les bobines.

4.2. Prototype II :



Figure III .13.Prototype II avec les pastilles

4.2.1. Inducteur avec pastilles a courant $I = 8.45A$

On refroidit les bobines qui sont verticales et on ajoute un courant continue de 8.45A. Les mesures du champ au centre de la bobine donnent les résultats suivants :

Bobines	1	2	3	Pastille 1	4	5	6	Pastille 2
Champ B (mT)	8.8	9.1	8.3	0.8	7.2	8.5	8.3	1.1



Figure III.14. Prototype II avec pastille et l'utilisation de l'azote liquide.

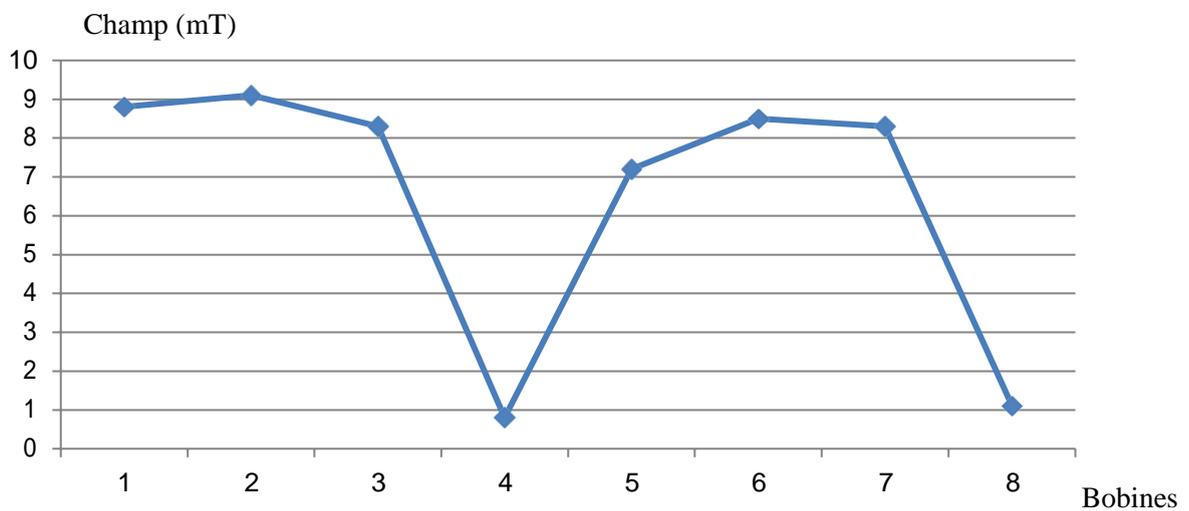


Figure III.15. Représente les valeurs des champs pour le Prototype II avec pastilles à froid

Pour une densité de courant 8.45A, Graphe III.9 montre que l'induction magnétique se centralise sur les bobines 2 et 5, tandis que pour l'induction dans les pastilles elle est presque nulle.

4.2.2. Inducteur sans pastilles à courant $I = 8.45A$:

Pour cette expérience on ajoute l'azote liquide pour refroidir les pastilles au dessus de sa température critique. On applique une tension continue avec un courant de 8.45 et on mesure le champ.

Tableau III.9. Représente le champ dans les différentes bobines de l'inducteur sans pastilles :

Bobines	1	2	3	Pastille1	4	5	6	Pastille2
Champ B (mT)	5.3	7.7	5.9	0.5	5.3	6.6	5.4	1

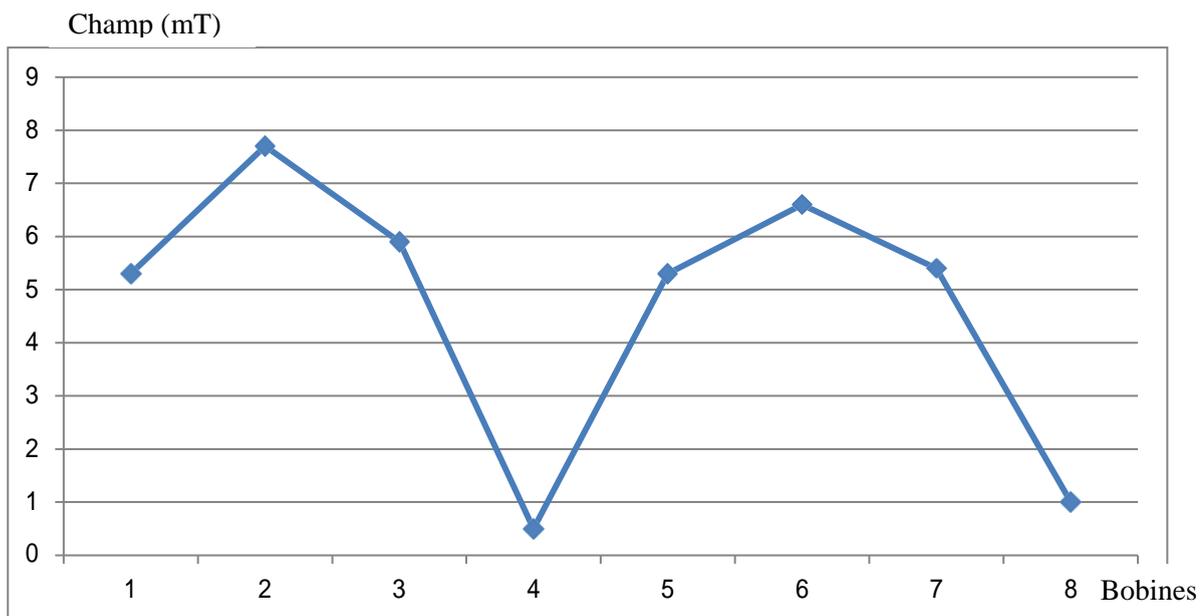


Figure III.16. Représente les valeurs des champs pour le Prototype II sans pastilles à froid

Pour une densité de courant 8.45A, Graphe III.10 montre que l'induction magnétique dans le cas d'inducteur sans pastilles est faible que dans l'inducteur avec pastilles, alors que l'induction magnétique se centralise sur les bobines 2 et 5.

L'induction dans les pastilles est presque nulle.

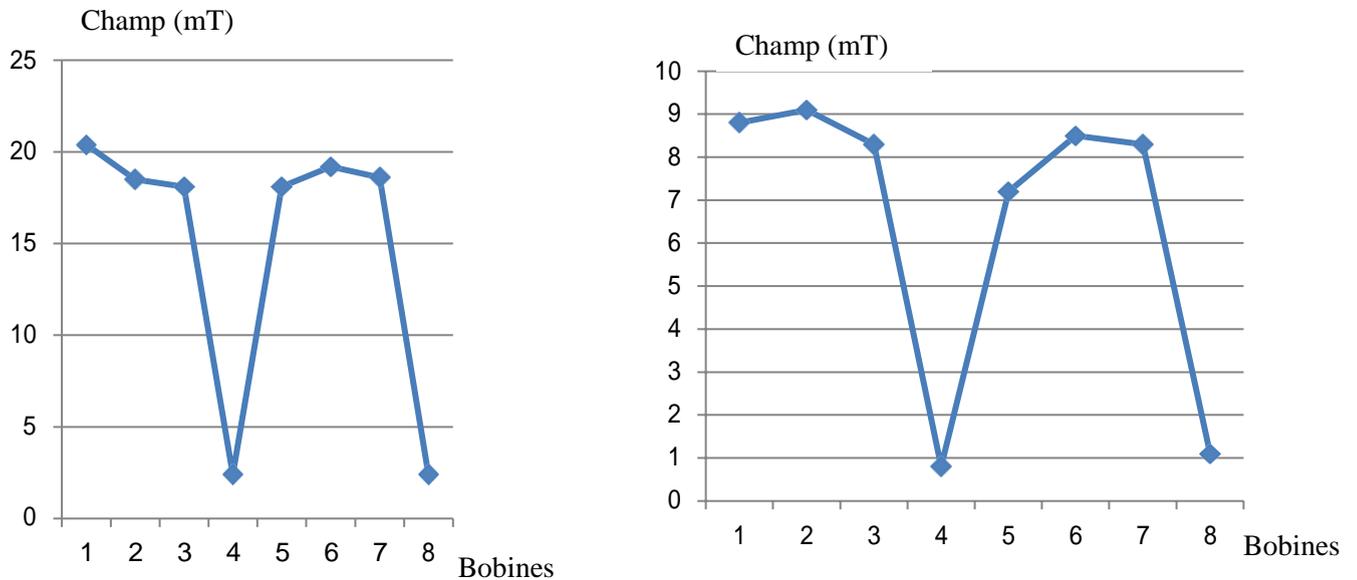
5. Comparaison entre les deux prototypes :

Figure III.17. Représente les valeurs du champ magnétique à froid de prototype I et II

Dans le premier prototype les bobines sont horizontales, avec cette position on a obtenu un champ plus élevé que dans le prototype II vertical. On peut affirmer que la meilleure position du prototype quand ses bobines sont horizontales.

6. Conclusion :

Pour ce chapitre nous avons fait une présentation de l'inducteur de la machine supraconductrice à flux axial pour deux prototypes.

Nous avons présenté premièrement les tests à chaud qui nous ont permis d'identifier les paramètres de l'inducteur. Dans un deuxième temps nous avons effectué un test à froid. Premièrement nous avons testé le champ pour le premier prototype. Puis on a comparé le test à chaud avec le test à froid. Le résultat obtenu en test à froid montre un champ plus élevé. On a constaté que dans la deuxième partie nous avons fait un test sur le deuxième prototype pour voir le champ comment il réagit en froid. Les résultats des deux tests obtenus ont été comparés entre les deux prototypes. On a conclu que le prototype à bobines horizontal produit un champ plus élevé.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le projet que nous avons réalisé concerne un inducteur d'une machine synchrone supraconductrice à flux axial. Le but de ce travail est d'obtenir une variation spatiale du champ magnétique par l'utilisation des pastilles supraconductrice.

Notre étude nous a permis dans un premier temps de découvrir un domaine très passionnant qui est la supraconductivité et ses multiples applications dans le domaine du génie électrique. L'expérience nous a permis de mettre en évidence les avantages et les intérêts de l'utilisation de ces matériaux dans les machines électriques.

Dans un deuxième temps nous avons abordé le côté théorique des machines axiales et radiales et leurs différences. L'utilisation de la supraconductivité dans les machines axiales et ces domaines d'application dans l'électrotechnique cas de l'application dans l'énergie éolienne.

En dernier nous avons réalisé deux prototypes d'un inducteur d'une machine synchrone supraconductrice à flux axial et on les a testé à chaud et à froid. L'expérience nous a amenée vers la comparaison entre les deux prototypes. On a conclu que le prototype à bobines horizontales produit un champ magnétique plus élevée que prototype à bobines verticales.

Nous souhaitons que ce travail très intéressant dans le domaine de l'électrotechnique sera valorisé et même exploité dans la pratique. Il est intéressant que d'autres étudiants poursuivent cette entreprise dans le futur pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus.

Références Bibliographiques

- [1] Alessio Figalli, 2018 : chargé de recherche du CNRS depuis 2007 et actuellement détaché à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich « .
- [2] Nicolas Doiron-Leyraud, Cyril Proust, David Le Boeuf, Julien Levallois, Jean-Baptiste Bonnemaïson, Ruixing Liang, D. A. Bonn, W. N. Hardy et Louis Taillefer, « *Quantum oscillations and the Fermi surface in an underdoped high- T_c superconductor* », *Nature*, vol. 447, 31 mai 2007 , p. 565-568
- [3] Yoichi Kamihara, Takumi Watanabe, Masahiro Hirano et Hideo Hosono, 2008. *Iron-Based Layered Superconductor* *Journal American Chemical Soc.*, vol. 130, n° 11, p. 3296-3297
- [4] Marianne Rotter, Marcus Tegel et Dirk Johrendt, « *Superconductivity at $-235, 15$ °C in the Iron Arsenide $(Ba_{1-x}K_x)Fe_2As_2$* », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, n° 10, 2008 ,p. 107006
- [5] Yoo Jang Song, Jong Beom Hong, Byeong Hun Min et Kyu Jun Lee, 2011. *The pseudoga behavior in the stoichiometric FeSe superconductor. Journal of the Korean Physical Society*, vol. 59, n° 2, p. 312
- [6] Mari Einaga, Masafumi Sakata, Takahiro Ishikawa et Katsuya Shimizu, 2016. *Crystal structure of the superconducting phase of sulfur hydride*, *Nature Physics*, vol. 12, n° 9, 9 mai, p. 835–838.
- [7] El Hadj AILAM "Machine synchrone à plots supraconducteurs, Étude et réalisation" Thèse doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I. 2006.
- [8] Sofiane BENDALI" Dimensionnement d'un moteur supraconducteur HTc" Thèse Doctorat de l'Université de Lorraine, 2012
- [9] OULD BIH Talha "Méthode simplifiée pour l'étude des systèmes de lévitation à base de supraconducteur HTc Mémoire magister de l'université Mohamed Khider - Biskra 2012
- [10] Rada ALHASAN " Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur". Thèse doctorat de l'université de Lorraine 2015.
- [11] Mohamed Lotfi KHENE" Étude de l'aimantation dans les supraconducteurs" Thèse doctorat de l'université Mohamed- khaidar -Beskra 2015.
- [12] Henri Godfrin "Cryogenic Fluids" European Advanced Cryogenics School– Chichilianne 2011.
- [13] S. Mukoyama, "Development of 500m HTS power cable in super-ACE project", *Cryogenics* 45 (2005) 11–15.

- [14] AIT AMARA Nassim «Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et courants électriques» MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE master en Electromécanique 2014
- [15] https://les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/et_ch7-msync.pdf
- [15] 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
- [16] Bernard MULTON et Jean BONAL .les entraînements électromécaniques directs : Diversité, contraintes et solutions Electromechanical direct drives : variety, constraints and Solutions. La conversion électromécanique directe. 4 février 1999 - ENS Cachan - SEE.
- [17] 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
- [18] LATRECHE Mohammed Tahar " Commande floue de la Machine synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien". Mémoire de magister d'Université Ferhat Abbas de Setif.2012
- [19] 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 de magister d'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. 2015
- [20] Pul LETELLIER "les machine à aiment permanent de grandes puissances dans les systèmes de propulsion électrique", le navire tout électrique.
- [21] Z. Zhang, F. Profumo and A. Tenconi, "Axial-flux Versus Radial-flux PM Machines," Electromotion, Vol. 3, No. 3, 1996, pp. 23-29
- [22] N. Brown, L. Haydock and J. Bumby, "An Idealized Geometric Approach to Electromagnetically Comparing Axial and Radial-flux Permanent Magnet machines," Proceedings of International Conference on Electrical Machines, ICEM'02, CD-ROM, 2002
- [23] K. Sitapati and R. Krishnan, "Performance Comparisons of Radial and Axial Field Permanent- Magnet, Brushless Machines, " IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 5, 2001, pp. 1219- 1226
- [24] S. Huang, M. Aydin, T. A. Lipo, "A Direct Approach to Electrical Machine Performance Evaluation: Torque Density Assessment and Sizing Optimization, " Proceedings of International Conference on Electrical Machines, ICEM'02, CD-ROM, 2002.

- [25] R. Qu, M. Aydin, T. A. Lipo, "Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines," Proceedings of IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03, Vol. 3, Madison, United States, 1-4 June 2003, pp. 1948- 1954
- [26] Electric Energy Magazine No. 4 " DESIGN OF ELECTRIC MACHINES: Axial Flux Machines", Faculty of engineering-Electric Energy Group, 2013
- [27] D. Petterson and R. Spee," The design and development of an axial flux permanent magnet brushless DC motor for a wheel drive in solar powered vehicle,". IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 31, no. 5, September 1995, pp.1054-1061
- [28] Jaouad Azzouzi " Contribution a la modélisation et _a l'optimisation des machines synchrones a aimants permanents aux axial. Application au cas de l'aérogénérateur .Thèse d'université du havre.2007
- [29] MEHABIL Yassine « étude d'un machine synchrone a flux axial à écrans supraconducteurs » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en génie électrique université de khemis miliana 2012.
- [30] Fabrice LOCMONT " Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé ", Thèse doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille, 2006