

**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

Master

En

Génie électrique

Option :Electrotechnique

THEME :

**Etude expérimental d'une machine supraconductrice à
structure axiale**

Réalisé par :

Mr. KEDDARI Lotfi

Mr. KADRAOUI Merwan

Encadré par :

Pr. AILAM El Hadj

Année universitaire 2016/2017

Remerciements

*Tous d'abord, nous tenons à remercier **DIEU** clément et miséricordieux de nous m'avoir donnés la force et le courage de mener à bien ce modeste travail*

*Nous tenons à remercier sincèrement notre promoteur monsieur **EL Hadj ALLAM** pour ses précieux conseils. Sa disponibilité, ses idées, leur aide et leurs encouragements. et pour nous m'a accordé en nous accueillant au sein de laboratoire de recherche et en acceptant de diriger notre recherche*

*Nous tenons particulièrement à remercier, monsieur, le docteur vétérinaire **Mustafa DJabar** pour leur aide et leurs conseils*

*Nous tenons à remercier notre amie **TITAUNI Brahim** pour leurs aides*

*Nous tenons à remercier notre cousin **Rachid et Mohammed***

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers tous les enseignants de l'institut des sciences et de la technologie qui a contribué à notre formation et à l'élaboration de ce présent travail.

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

Enfin, à nos parents qui nous aidé et soutenus pendant nos études. Toute notre affection.

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

Mes sœurs

Tous les membres de ma grande famille.

À docteur vétérinaire Djabar Mustafa

*À mes cousins à mes amis et à tous les étudiants de l'université de
Djilali bounama khemis miliana*

*À tous ceux qui nous donnent un coude de Mainé pour continuer ces
études*

À mes très chers amis Brahim et merwan

*À tout l'ensemble des enseignants de l'électrotechnique qui ont
contribué à notre formation*

Lotfi KEDDARI

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 grande parent et ma deuxième mère " Ma senia"

Mes très cher frères : Mostafa, Yahya, Abdel kader et Djamel ainsi que les garçons de mon cousin Ahmed et Abdel kader

Ma chère femme et sa famille

Ma cher Sour et ses enfants " Doaa" et "Youcef"

Mon binôme, mon amis et mon frère "Lotfi".

Mes amis : Ibrahim, Omar , Mohamed , Abdel Lah, Idir, KHalid, Saad et Mohamed Zendi

Tous les étudiants de la 2^{em} année Master promotion 2017

A tous mes amis de la résidence chacun à son nom

Merwan KADRAOUI

:

يحتوي هذا العمل على دراسة تجريبية لآلة متزامنة فائقة النقالية . الهدف من هذه المذكرة هو معرفة أهمية استخدام المواد ذات النقالية الفائقة في المجالات الصناعية و كذا مجالات الهندسة الكهربائية. تطرقنا في هذه المذكرة عموميات حول المواد ذات النقالية الفائقة و كل ما يخصها من أصناف و اكتشافات إلي حد الساعة و أيضا مجالات تطبيقها , كما تطرقنا أيضا إلي دراسة حول نوعين من آلات الكهربائية الأكثر انتشارا , . بعد أن مررنا بكل هذه المراحل النظرية , قمنا بدراسة تجريبية و تطبيقية , حيث قمنا بتنفيذ و تطبيق النماذج والاختبارات الضرورية و لازمة لتشغيل هذه الآلة

الكلمات المفتاحية: , النقالية الفائقة , التجميد ,

Résumé :

Ce projet de fin d'études consiste à présenter une étude expérimentale d'une machine supraconductrice à structure axiale. Le but du projet est de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les machines électriques. Nous présentons dans ce mémoire les notions de base et les théories de 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 de travail, une étude expérimentale a été réalisée.

Mot clé : Flux axial, Flux radial, supraconducteur, Ecrantage du champ magnétique, Cryogénie.

Abstract :

This project consists in presenting an experimental study of a superconducting machine with an axial structure. The aim of the project is to highlight the use of superconducting materials in electrical machines. We present in this thesis the basic notions and theories of superconductivity. We also present the two most known structures of the synchronous machine; the axial flux and radial flux one. At the end of the work, an experimental study was carried out.

Key word: Axial flux, radial flux, superconductor, magnetic screening, cryogenic.

Table des Matières

Remerciments	I
Didicace	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Notations symbolique et abréviations	X
Introduction générale	1
Chapitre I : Notions fondamentales sur les supraconducteurs	
I.1.Introduction.....	2
I.2.Théorie de la supraconductivité :.....	2
I.2.1.Définition de la supraconductivité	2
I.2.2.Matériaux supraconducteurs	2
I.2.3. Revue historique	3
I.3.Propriétés des supraconducteurs	5
I.3.1. Effet Meissner	5
I.3.2.Grandeurs critique	5
A) - Température critique	5
B)- Champ magnétique critique	6
C) - Densité de courant critique	6
D)-Surface critique	7
I.4.Classification des matériaux supraconducteurs	7
I.4.1.Supraconducteurs de type I	7
I.4.2.Supraconducteur de type II.....	8
I.5.Les Familles des supraconducteurs	9
I.5.1.Supraconducteur à basse température critique (BTC)	9
I.5.2.Supraconducteur à haute température critique (HTC)	9
I.6.Matériaux supraconducteurs selon leur forme	10
I.6.1. Supraconducteurs massifs	10
a). Aimants supraconducteurs	11
b).Ecrans supraconducteurs	11
I.6.2.Fils supraconducteurs	11

I.7.Fluide cryogénique	13
I.8.Applications de la supraconductivité en électrotechnique	15
I.8.1. Aimants supraconducteurs	15
I.8.2.Les systèmes de stockage de l'énergie SMES	15
I.8.3. Trains à lévitation magnétique	15
I.8.4. Les transformateurs	16
I.8.5.Machines tournantes	16
I.8.6.Limiteurs du courant.....	16
I.9.Conclusion	16

Chapitre II : Machines synchrones

II.1. Introduction	17
II.2.Machines Synchrones	17
II.2.1.Machine synchrone à flux radial (MSFR).....	18
II.2.1.1. Topologies de la machine à flux radial	19
A)-Machine à flux radial à rotor intérieur	19
B)-Machine à flux radial à rotor extérieur	20
II.2.1.2.Performance de la machine à flux radial	20
II.2.2.Machine synchrone à flux axial (MSFA).....	21
II.2.2.1.Topologies du la machine à flux axial	21
A)- MSFA à simple entrefer	22
B)- MSFA à double entrefer	22
B.1. MSFA à rotor intérieur.....	23
B.2. MSFA à stator intérieur.....	23
C)- MSFA multi disques	25
II.2.2.2. Avantages et inconvénients	25
II.2.2.3. Applications de la MSFA	26
II.2.2.3.a. Propulsion navale	26
II.2.2.3.b. Energie éolienne.....	26
II.2.2.3.c. Traction électrique	26
II.3.Comparaison entre MSFR et MSFA	27
II.4.Identification des paramètres d'une machine électrique	28
II.4.1.Calcul des paramètres de la MSFA	28
II.4.1.a.Calcul des inductances propres et mutuelles	28
II.4.1.b.Calcul de l'inductance de fuite (propre)	29
II.4.1.c. Calcul de la résistance statorique	29
II.5.Prototype et méthodes de test du MSFA	30

II.5.1. Identification des résistances	30
II.5.2. Identification des inductances propres et mutuelles	30
II.5.2.1. Inductances mutuelles	30
II.5.2.2. Inductances propres	31
II.6. Conclusion	31
Chapitre III : Etude expérimentale	
III.1. Introduction	32
III.2. Présentation de la machine étudié	32
III.2.1. l'inducteur	33
III.2.1.1. L'induit	33
III.3. Prototype des tests effectués	34
III.3.1. Mesures des paramètres de l'inducteur	34
III.3.1.1. Champ créé par l'inducteur	35
III.3.2. Mesures des paramètres de l'induit	37
III.3.2.1. Identification des résistances	37
III.3.2.2. Identification des inductances propres	38
III.3.2.3. Identification des inductances mutuelles	38
III.3.3. Tests à chaud dynamique	40
III.3.4. Tests à froid statique	40
III.3.4.1. Réalisation des nouveaux bains de refroidissement.....	42
III.3.4.1.a. Tests de la validité des bains réalisés	43
III.3.5. Tests à froid dynamique	44
III.4. Conclusion	45
Conclusion générale	46
Annexe	47
Références bibliographiques	48

Liste des figures

Figure I.1. Résistance en (Ω) d'un spécimen de mercure en fonction de la température absolue. Sur cette étude H.K. Onnes a observé pour la première fois le phénomène de supraconductivité.	3
Figure I.2. Historique et température critique des supraconducteurs au court de XX ^{ème} siècle	4
Figure I.3. Effet Meissner dans une sphère supraconductrice.....	5
Figure I.4. Evolution de la résistivité électrique en fonction de la température	6
Figure I.5. Illustration de la surface critique et des trois grandeurs critiques.	7
Figure I.6. caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type I.....	7
Figure I.7. caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type II.....	8
Figure I.8 . Exemple des matériaux supraconducteurs massif	10
Figure I.9 . Principe de l'écrantage par des supraconducteurs massif	11
Figure I.10. Exemples des supraconducteurs filamenteux.	12
Figure II.1. liste des principales typologies des machines synchrones qui existe	18
Figure II.2. Principe de fonctionnement et structure de la machine a flux radial	19
Figure II.3. Structure d'une machine a flux radial a rotor intérieur	19
Figure II.4. Structure d'une machine a flux radial a rotor extérieur	20
Figure II.5. Principe de fonctionnement, et structure de le machine a flux axial	20
Figure II.6. MSFA a simple entrefer a) Stator a fentes, b) Stator sans fente	22
Figure II.7. MSFA a double entrefer a rotor intérieur	23
Figure II.8. a) Machine a stator intérieure a fente avec enroulement imbriqué de type N-N .b) Machine a stator intérieure sans fente avec enroulement toroïdal de type N-N .c) Machine a stator intérieur a cœur ferromagnétique de type N-S. d) machine a stator intérieure sans fente avec enroulement toroïdal de type N-S.....	24
Figure II.9. Structure du MSFA a multi disques	25
Figure III.1. Machine synchrone supraconductrice a structure axiale.....	32
Figure III.2. a) structure réelle de l'inducteur ,b) structure d'une face de l'inducteur	33
Figure III.3. structure réelle de l'induit b):structure d'un disque de l'induit.....	33
Figure III.4. Tests effectués	34
Figure III.5. Identification de la résistance de protection	35
Figure III.6. Identification de la résistance de l'inducteur.	35
Figure III.7. Les différents points de mesure du champ magnétique crée dans l'entrefer ...	36
Figure III.8. .Variation de l'induction dans l'entrefer suivons rayon (B).....	36
Figure III.9. Variation de l'induction dans l'entrefer suivons rayon (A).....	36
Figure III.10. Identification de la résistance de premier phase d'induit.....	37

Figure III.11. Identification de la résistance de deuxième phase d'induit	37
Figure III.12. Identification de la résistance de troisième phase d'induit	38
Figure III.13. Détermination des réactances X_{12} , X_{13}	39
Figure III.14. Détermination des réactances X_{21} , X_{23}	39
Figure III.15. Détermination des réactances X_{31} , X_{32}	39
Figure III.16. Refroidissement de la machine par l'azote liquide.	41
Figure III.17. Variation de l'induction (B) en fonction d'angle (θ) dans l'entrefer.	41
Figure III.18. Pastilles supraconductrices.....	42
Figure III.19. Bains de refroidissement.	42
Figure III.20. l'effet de Meissner (lévitation magnétique)	42
Figure III.21. Placement des nouveaux bains de refroidissement	43
Figure III.22. Refroidissement de la machine par l'azote liquide verticalement.....	43
Figure III.23. Variation de l'induction (B) en fonction d'angle(θ) dans l'entrefer	44
Figure III.24. tension a vide (à 219 tr.min ⁻¹ et de 1.8A courant d'excitation).	44
Figure III.25. tension a vide (à 219 tr.min ⁻¹ et de 1.8A courant d'excitation) avec zoom	45

Liste des tableaux

Tab I.1. Tc, Hc et Bc dans quelque supraconducteurs de type I, (à 0K).....	8
Tab.I.2 .Tc, Hc2,Bc2 dans quelque matériaux supraconducteurs de type II, (à 0K).....	9
Tab.I.3. Classification des supraconducteurs HTc et BTc les plus utilisés.....	10
Tab.I.4. Caractéristiques et Performances des fils supraconducteurs les plus utilisés.....	13
Tab.I.5. Caractéristiques et performances des Cryo-fluides.....	14
Tab.II.1. Comparaisons entre les performances des MSFA et des MSFR.....	27
Tab III.1. Résistances de l'induit.....	38
Tab III.2. Inductances propre de l'induit.....	38
Tab III.3. Réactances et inductances mutuelles de l'induit	40

Notations symboliques et abréviations

Symbole	Signification	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>
$SMES$	systèmes de stockage de l'énergie	<i>Sans unité</i>
$MSFR$	Machine synchrone a flux radiale	<i>Sans unité</i>
$MSFA$	Machine synchrone a flux axiale	<i>Sans unité</i>
IM	Machine a Induction	<i>Sans unité</i>
}	Coefficient de forme	<i>Sans unité</i>
V_{AF}	Vitesse de la machine axiale	T/min
V_{RF}	Vitesse de la machine radiale	T/min
W_{m1k}	Flux dans le premier entrefer	Wb
W_{m2k}	Flux dans le deuxième entrefer	Wb
N_s	Nombre de spires	<i>Sans unité</i>
\sim_0	Perméabilité magnétique a vide	H/m
L_{mk}	Inductance mutuelle entre deux phases	H
L_f	Inductance Propre	H
...	La résistivité	Ωm
L_{CSE1}	Epaisseur de la culasse statorique coté entrefer 1	m

L_{CSE1}	Epaisseur de la culasse statorique coté entrefer 2	m
L_{AE1}	Epaisseur d'un aiment dans l'entrefer 1	m
L_{AE2}	Epaisseur d'un aiment dans l'entrefer 2	m
e_1	Epaisseur d'entrefer entre le rotor 1 et le stator	m
e_2	Epaisseur d'entrefer entre le rotor 2 et le stator	m
R_1	Rayon intérieur au niveau de rotor de la machine	m
R_2	Rayon extérieur au niveau de rotor de la machine	m

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Depuis la découverte des supraconducteurs en 1911 par Kamerlingh Onnes jusqu'à nos jours, ces matériaux se voient de plus en plus utilisés dans différentes applications, l'amélioration en continu des performances des supraconducteurs et des dispositifs cryogéniques a permis leur développement à l'échelle industrielle dans le domaine de l'électrotechnique et la conversion électromécanique de l'énergie (moteur et générateur). Les supraconducteurs conduisent à des gains significatifs en termes de puissance massique et volumique par rapport aux topologies conventionnelles. L'utilisation des supraconducteurs dans les machines électriques et dans les autres applications industrielles permet ainsi un véritable saut technologique [5] [8] [6].

Ce travail consiste en l'étude expérimentale d'une machine supraconductrice à structure axiale. Le travail est réalisé au niveau du laboratoire de recherche LESI de l'Université DJILALI BOUNAAMA de KHMIS-MILIANA sous la direction de Monsieur Ailam El-hadj. Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique où on introduit les connaissances et les notions de base des matériaux supraconducteurs. Ce chapitre a pour but d'identifier les différents types des supraconducteurs et leurs caractéristiques telles que les grandeurs critiques et de présenter leurs domaines d'applications.

Le deuxième chapitre présente une étude théorique sur les machines synchrones à flux axial et radial. Au début du chapitre, les différentes topologies de la machine à flux radial sont présentées. En suite, les performances de chacune des topologies sont mises en évidence ainsi que les différences entre les deux structures. A la fin de ce chapitre, les protocoles d'identification des paramètres des machines électriques sont présentés.

Le dernier chapitre est réservé la partie expérimentale de notre étude où nous présentons les tests relatifs à l'identification de la machine étudiée, les tests à chaud ainsi que les tests à froid en utilisant l'azote liquide.

CHAPITRE 1
NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES
SUPRACONDUCTEURS

I. Introduction :

Les supraconducteurs sont des matériaux étonnants leur capacité à conduire le courant sans dissipation d'énergie ainsi que leur diamagnétisme permet la confection de système électrotechnique plus performant. Les supraconducteurs prennent une place importante dans la recherche actuelle en électrotechnique, des promesses extraordinaires que toute une communauté tente exploitées.

En effet, deux propriétés de ces matériaux, le diamagnétisme est une possibilité de transporte des courants élevés sous forts champs magnétiques, permettant d'envisager une réelle évolution des systèmes électrotechnique [1].

Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les matériaux supraconducteurs. Nous allons voir en premier lieu l'historique de ces matériaux et puis leurs propriétés spécifiques, aussi les types de ces matériaux. Enfin nous présentons les liquides cryogéniques, les différentes applications de ces matériaux.

I.2. Théorie de la supraconductivité :**I.2.1. Définition de la supraconductivité :**

La supraconductivité est un état particulier de la matière dans lequel le matériau perd toute résistance électrique, ainsi tout courant parcourant, une boucle supraconductrice peut perdurer indéfiniment sans perte d'énergie liée à l'effet Joule, un courant peut persister dans un anneau supraconducteur pendant plus de 100 000 ans [2].

I.2.2. Matériaux supraconducteurs :

Un des événements les plus notables du XX^e siècle dans les domaines des sciences a été la découverte des matériaux supraconducteurs par Heike Kamerlingh Onnes de l'université de Leyde en 1911. Il a observé que le mercure immergé dans l'hélium liquide avait perdu totalement sa résistance électrique (Figure I. 1).

Le rêve supraconducteur a rebondi au début 1986 où les deux physiciens Suisse K. A. Müller et J.G. Bednorz ont découvert dans les laboratoires de IBM - Zurich un nouveau composé de la famille des pérovskites avec la composition (La-Ba-Cu-O), qui devient supraconducteur à 30 K, tandis qu'à ce moment, la température critique la plus élevée était de 23,2 K pour NbGe. La découverte des matériaux supraconducteurs de cuprate a fortement excité tout le monde scientifique[3].

L'idée d'un supraconducteur à la température ambiante a induit une formidable concurrence entre différents laboratoires pour trouver le supraconducteur avec une température critique la plus élevée. Le roi de la famille des cuprates a été trouvé dans le début 1993, sous forme d'un composé à base de mercure avec une température de transition de 164 K sous une pression de la 10^5 Pa. Deux composés de cette famille $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_7$ et $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ font l'objet d'études matériaux très approfondies pour leur utilisation dans des nombreux systèmes. [3].

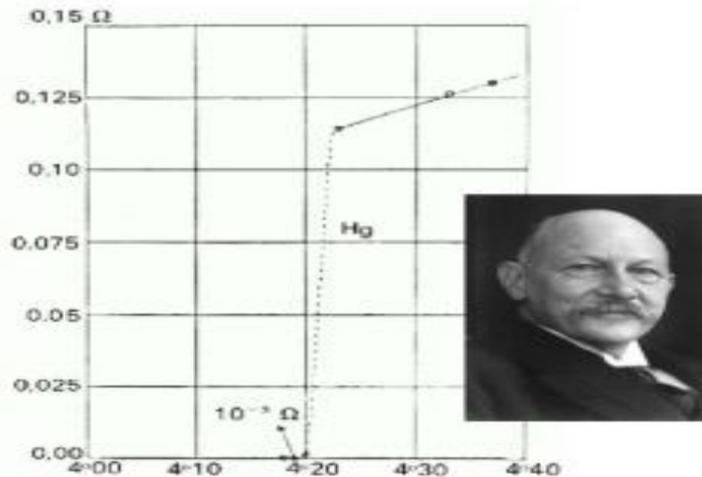


Figure (I.1): Résistance en (Ω) d'un spécimen de mercure en fonction de la température absolue. Sur cette étude H.K. . Onnes a observé pour la première fois le phénomène de supraconductivité[3].

I.2.2.Revue historique :

- En 1908 Liquéfactions de l'hélium par Kamerlingh Onnes [1].
- En 1911 découvert de la supraconductivité par Kamerlingh Onnes et G.Holst sur un échantillon de mercure dans bain d'hélium liquide
- En 1913 Échecs du premier aimant supraconducteur
- En 1933 mise en évidence du diamagnétisme des supraconducteurs par Meissner Ochsenfeld[3]
- En 1954 Premier aiment supraconducteur (Nb)
- En 1957 Théories microscopiques de la supraconductivité par Bardeen Cooper et Schrieffer[13].
- En 1958 mise au point du conducteur NbZr et Nb₃Sn [1].
- En 1960 Découverts des fortes densités de courant sous induction élevée
- En 1962 B.Josephson prédit les effets cantiques qui portent son nom (effet Josephson)

- En 1964 première application significative des supraconducteurs à Argonne [2]
- En 1965 premiers cryoalternateur[1]
- En 1968 définitions du brin multi filamentaire par le laboratoire Rutherford
- En 1974 mise en service la chambre a bulle BEBC au CERN
- En 1982 premiers image IRM et première application industrielle et commerciale des supraconducteurs
- En 1983 mise au point des brins multi filamentaires alternatifs. Premier accélérateur supraconducteur (TEVATRON)
- En 1986 berdnos et Muller découvrent la supraconductivité à hôte température critique de céramique à base d'oxyde
- En 1987 Envolée des températures critique (YBaCuO. 93 K)
- En 1988 mise en fonctionnement de T15 (NB3Sn, 6,4 T, 4,5 K)
- En 1989 mise en fonctionnement du système de champ toroïdal de TOR SUPR
- En 1993 découvertes du HgBa2Ca2Cu3O8+d avec un Tc de 130 K.[3]
- En 1999 tests du premier système IRM à 900 MHz
- En 1999 tests des bobines modèles de TTER
- En 1999 débuts de construction du LHC
- En 2001 Découverts des propriétés supraconductrices du composé MgB2[1].

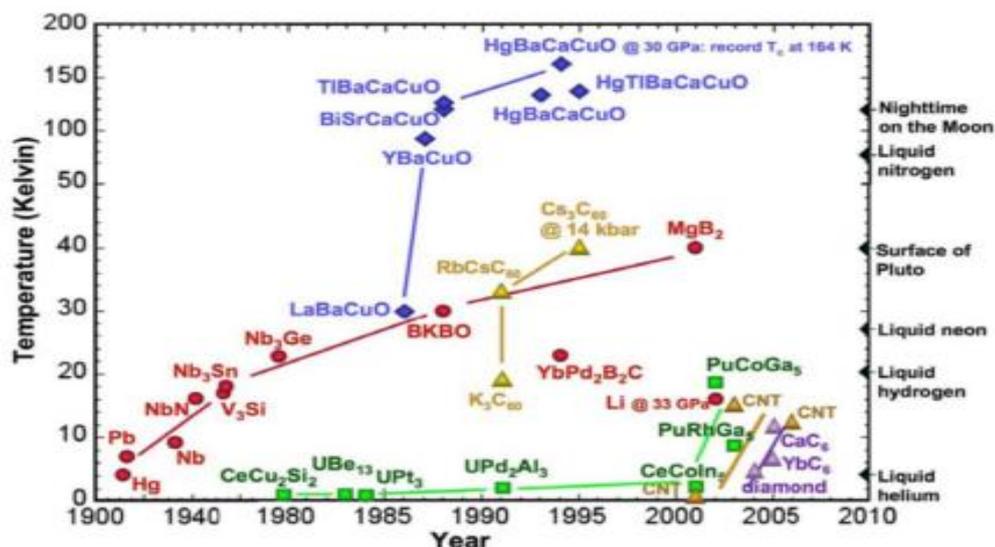
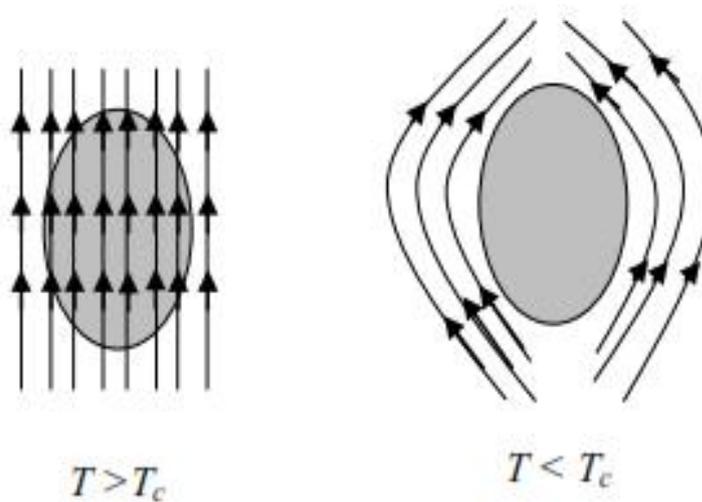


Figure (I.2): Historique et température critique des supraconducteurs au cours de XX^e siècle [5]

I.3. Propriétés des supraconducteurs :

I.3.1. Effet Meissner :

En 1933, W. Meissner et R. Ochsenfeld découvraient que lorsqu'un échantillon supraconducteur est refroidi au-dessous de sa température critique T_c puis placé dans un champ magnétique, celui-ci est expulsé de l'échantillon (diamagnétisme parfait). Cette expulsion s'explique par l'apparition de supra-courants circulant à la périphérie de l'échantillon sur une profondeur de l'ordre de quelques milliers d'Angström, ces courants empêchent le champ magnétique de pénétrer à l'intérieur de l'échantillon supraconducteur. [4].



Figure(I.3) : Effet Meissner dans une sphère supraconductrice[4].

I.3.2. Grandeurs critique :

A) - Température critique :

La résistance des matériaux conducteurs usuels comme le cuivre et l'or est diminuée avec des basses températures jusqu'à une valeur minimale, comme montre la figure (I.4). Par contre dans les matériaux supraconducteurs cette résistance disparaît définitivement et devient nulle avec de très basses températures inférieures à T_c , qui s'appellent la température critique. Donc les matériaux supraconducteurs sont des matériaux parfaits qui n'ont pas des pertes par effet Joule et ne dissipent aucune chaleur lors du passage d'un courant électrique[6].

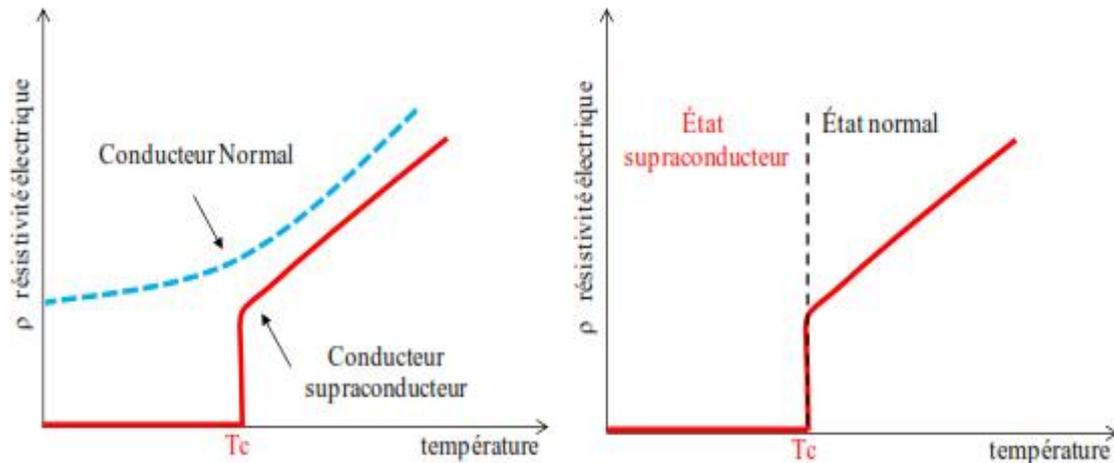


Figure (1.4): Évolution de la résistivité électrique en fonction de la température. [6]

B)- Champ magnétique critique :

Les matériaux supraconducteurs aussi dépendants du champ magnétique extérieur, donc pour avoir un état supraconducteur, le champ extérieur il ne doit pas dépassé certaine intensité du champ critique H_c , en réalité le champ extérieur dépend de la température, ce la dite que la température maximale à laquelle un matériau supraconducteur est obtenu pour un champ extérieur nul [7].

Pour les matériaux supraconducteurs de type II, il existe deux champs magnétiques critiques H_{c1} et H_{c2} , entre ces deux champs critiques il y'a un champ très important, dit champ d'irréversibilité noté H' , au-delà duquel le réseau de vortex disparaît, cependant les supraconducteurs de type I il y'a un seul champ critique H_c . [7].

C) - Densité de courant critique :

La densité du courant est parmi les facteurs le plus importants dans un matériau supraconducteur, donc pour avoir l'état supraconducteur, la densité du courant ne doit pas dépassée certaine valeur du courant, s'appeler la densité critique J_c , d'autre point que cette densité varie aussi en fonction du champ magnétique B et de la température T . [2] [13].

La définition de cette valeur de courant critique dépend du type de supraconducteur. Pour les supraconducteurs de type 1, celle-ci correspond au champ magnétique maximum que peut supporter le matériau avant sa transition vers l'état normal. Pour les supraconducteurs de type 2 décrits plus loin, sa valeur dépend du champ magnétique appliqué et de la température de fonctionnement. [6].

D)-Surface critique :

Un matériau supraconducteur est dépend de trois paramètres essentiels (la température critique, le champ critique et la densité du courant critique), donc on définit une surface critique où le matériau reste a son état supraconducteur.

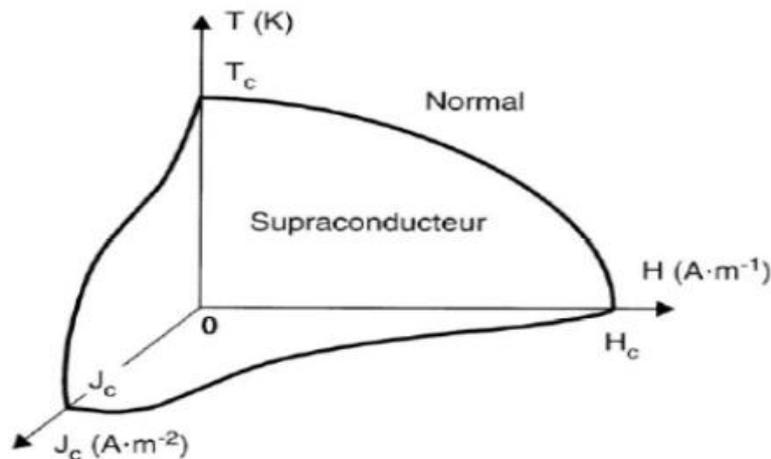


Figure (I.5) : Illustration de la surface critique et des trois grandeurs critiques[1].

I.4.Classification des matériaux supraconducteurs :

Il existe deux types des matériaux supraconducteurs, les supraconducteurs de Type I et les supraconducteurs de Type II.

I.4.1.Supraconducteurs de type I :

Ce type des supraconducteurs ils ne possèdent qu'un seul champ critique H_c , le comportement de ce type de supraconducteurs est simple, puisqu'ils sont caractérisés par deux états. L'état normal correspond à une valeur élevée de la résistance du matériau et l'état supraconducteur correspond à une résistance nulle où le diamagnétisme de matériau presque parfait [8]. La figure (I.6) présente la caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur du type I.

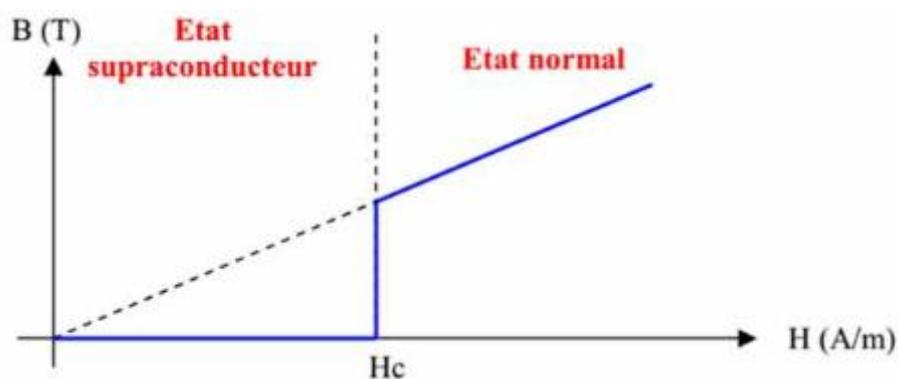


Figure (I.6): caractéristiques $B(H)$ d'un supraconducteur de type I.[13].

Matériau	Tc(K)	Hc(A/m)	Bc(Tesla)
Titanium (Ti)	0.4	0.42×10^4	0.0056
Aluminium (Al)	1.2	0.79×10^4	0.0105
Tin (Sn)	3.7	2.40×10^4	0.0305
Mercure (Hg)	4.2	3.30×10^4	0.0411
Plombe (Pb)	7.2	6.40×10^4	0.0803

Tab (I.1) : Tc, Hc et Bc dans quelques supraconducteurs de type I, (à 0 K). [7]

I.4.2.Supraconducteur de type II :

Ce type des supraconducteurs sont caractérisés par deux champs magnétiques critiques, où le deuxième champ Hc2 est supérieur au premier Hc1 comme le montre la figure (I.7), ces derniers présentent des valeurs critiques (Champ critique, température et la densité critique) plus élevées par rapport aux supraconducteurs du type I, cela rend l'attractivité de ces matériaux pour plusieurs domaines d'application, ce type des supraconducteurs comportent trois zones différentes [8] :

- Zone 1 : État supraconducteur (État Meissner), où le matériau est parfaitement diamagnétique, les valeurs du champ doit être inférieure à Hc1.
- Zone 2 : État mixte, pour des valeurs du champ entre Hc1 et Hc2, le matériau est partiellement diamagnétique, soumet à un champ extérieur.
- Zone 3 : État normal, le supraconducteur perd sa caractéristique et présente une forte résistance pour des valeurs de champ supérieures à Hc2.

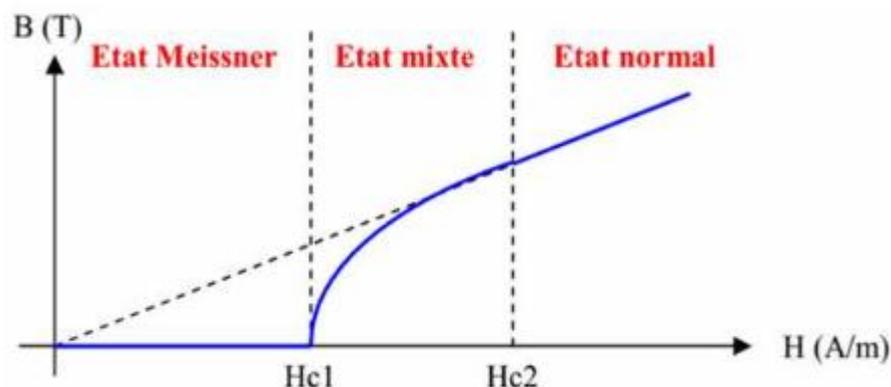


Figure (I.7): Caractéristiques B(H) d'un supraconducteur de type II.[13].

Matériau	Tc(K)	Hc(A/m)	Bc(Tesla)
Nb-Ti	10.2	0.9×10^7	12
Nb ₃ Sn	18.3	1.6×10^7	22
Nb ₃ Ge	23.0	2.2×10^7	30
Nb ₃ Al	18.9	2.3×10^7	32
PbMo ₆ S ₈	14.0	3.3×10^7	45

Tab (I.2) : Tc, Hc₂, Bc₂ dans quelque matériaux supraconducteurs de type II (à 0 K). [7].

I.5. Les Familles des supraconducteurs :

Les supraconducteurs sont classés en deux familles, les supraconducteurs à basse température critique BTC et les supraconducteurs à haute température critique HTC.

I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTc) :

Ces types des supraconducteurs sont caractérisés par des températures critiques inférieures à 20 K et on les utilise essentiellement avec l'hélium liquide, généralement ce type des supraconducteurs sont de type II, comme le (NbTi, Nb₃Sn), on les retrouve dans les applications industrielles, car ils sont simples à utiliser pour fabriquer des bobines de fort champ magnétique, de notre côté ils nécessitent beaucoup d'énergie pour les refroidir. Par contre 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. [6].

I.5.2. Supraconducteurs à haute température critique (SHTc) :

Les travaux de recherche sur les céramiques à base d'oxydes de cuivre ont permis la découverte des supraconducteurs à haute température critique (SHTc) en 1986. A. Muller et G. Bednorz découvrent le premier composite (BaLaCuO) qui avait une température critique de 35 K. les supraconducteurs HTC sont de type II et leur température critique supérieure à 20 K, peuvent 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. [6] [4].

Catégorie	Matériaux	Composition	Tc(K)
<i>HTc</i>	Nb-Ti	Niobium et titane	10.2
	Nb ₃ Sn	Niobium et étain	18.3
<i>BTc</i>	BSCCO	Oxydes de bismuth, strontium, calcium et cuivre	96
	MgB ₂	Diboride de magnésium	39
	YBCO	Oxydes d'yttrium, baryum et cuivre	39

Tab (I.3) : Classification des supraconducteurs HTc et BTc les plus utilisés. [5] [1].

I.6. Matériaux supraconducteurs selon leur forme :

I.6.1. Supraconducteurs massifs :

Usuellement, les matériaux massifs que l'on rencontre sont des supraconducteurs à haute température critique à l'exception du NbTi qui est utilisé dans des cavités supraconductrices pour accélérateurs des particules. [6]. Les applications des matériaux massifs sont moins nombreuses que celle des fils supraconducteurs. On distingue deux applications le plus utilisées pour les supraconducteurs massifs.

- Les aimants permanents supraconducteurs
- Les écrans supraconducteurs



Figure(I.8) : Exemple des matériaux supraconducteurs massifs.[5]

a). Aimants supraconducteurs :

Les aimants supraconducteurs se sont des matériaux supraconducteurs refroidis à sa température critique en absence du champ magnétique extérieur et puis exposés à une variation du champ magnétique qui pénètre le matériau supraconducteur au-delà de la valeur H_c , ce champ magnétique est piégé par l'intermédiaire des courants induits (loi de Lenz) résultants de la variation d'un champ magnétique appliqué sur le supraconducteur, ces courants restent existe puisque les supraconducteurs sont caractérisés par une résistance nulle. [6] [5].

b).Écrans supraconducteurs :

Parmi les caractéristiques d'un matériau supraconducteur, il repousse les lignes du champ magnétique et ne permet pas leur pénétration, donc à travers cette propriété, on peut canaliser et concentrer les lignes du champ magnétique dans la direction voulue et cela forme le principe de l'écrantage [4]. La figure (I.9) présente un phénomène de l'écrantage d'une machine supraconductrice

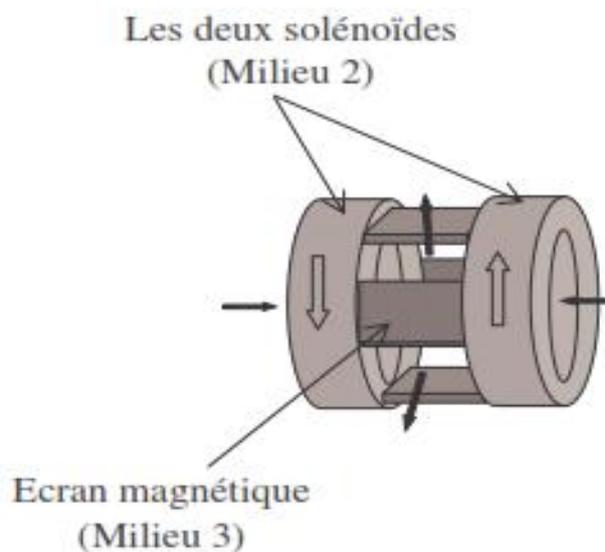


Figure (I.9) : Principe de l'écrantage par des supraconducteurs massifs [8].

I.6.2.Fils supraconducteurs :

Les fils supraconducteurs sont destinés à remplacer bien sûr les linges classiques (cuivre ou l'aluminium), pour le seul objectif à faire éliminer la résistance et leur inconvénient sur l'énergie électrique et faire passer la plus grande quantité possible d'électricité sur un fil a des petites sections. Ces lignes peuvent être sous forme des bobines pour la fabrication des

Machines électriques et des électro-aimants ou sous forme des câbles pour le transport d'énergie électrique. [5].



Figure (I.10) : Exemples des supraconducteurs filamenteux. [5].

Actuellement, les fils supraconducteurs prennent une large place dans les applications industrielles telles que les machines électriques et les travaux d'amélioration de la qualité et de la performance de ces fils, les matériaux supraconducteurs en général ont été découverts par Heike Kamerlingh Onnes de l'université de Leyde en 1911 [3]. Pour avoir utilisé ces fils dans n'importe quel domaine, il doit prendre en compte les performances du fil pour la facilité le choix du meilleur supraconducteur performant qui n'est pas coûteux.

Le tableau ci-dessous présente les performances des quatre fils supraconducteurs les plus utilisés actuellement avec sont pris et sa densité du courant.

Matériaux	Jc A/mm ²	Performance	Prix
NbTi	4000 (5T, 4.2K)	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 faire un moteur. Par contre, il ne fonctionne qu'à très basse température : 4,2 K.	1€kA/m à 3T ou 7€1kA/m
BSCCO	1000 (20T,20K)	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. Son principal défaut est son coût élevé, lié à un cours de l'argent particulièrement versatile	220 €kA/ m.
YBaCuO	30 000 (CP, 77K)	Présente une forte densité de courant par contre il n'est pas mûr industriellement. Il est produit en centaines des mètres seulement. Il est fragile, par ailleurs, ce fil ne supporte pas d'imprégnation. Celle-ci dégrade de manière irréversible jusqu'à 90 %, les propriétés de transport de courant du fil. Des fils pour des applications en courant alternatif font actuellement l'objet de développements en laboratoires privés ou publics.	220 €ka/ m
MgB2	10 000 (5T, 4.2K)	Le dernier fil découvert est le MgB2 on en fait 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. Il est robuste et économique, sa température de fonctionnement se situe entre 10 K et 20 K ce qui est faible. Malgré cela, ce fil est extrêmement prometteur pour des applications en électrotechnique.	10€kA/m sous 2T à 20K.

Tab (I.4):Caractéristiques et performances des fils supraconducteurs le plus utilisés [14] [6]

I.7.Fluides cryogéniques :

Utilisation des fluides cryogéniques dans les matériaux supraconducteurs a pour but de maintenir et descendre le matériau supraconducteur à son état Meissner et bien sûr ces

fluides est dépendent de l'application souhaitée alors on peut citer les gaz couramment utilisés. [1] :

- Pour les supraconducteurs à basse température (**SBTc**) : hélium liquide, voire hélium gaz selon le matériau
- Pour les supraconducteurs à haute température (**SHTc**) : hélium liquide. hélium gaz. Hydrogène. Néon. azote liquide. azote gaz

Cryo-fluides	Tc(K)	Point d'ébullition (K)	Performances
Hélium ($5,3 \cdot 10^{-6}$ dans l'air)	5,2	4,2	-Coût de plus en plus élevé de 3,3 € à 10 €/litre selon quantité -très utilisé dans les domaines des mesures physiques
Hydrogène ($5 \cdot 10^{-7}$ dans l'air)	33,20	20,4	-moins utilisé actuellement - danger potentiel dans son utilisation
Azote (0,78 dans l'air)	126,21	77,36	- Bon marché (environ 0,1 €/litre) - Bonne chaleur latente de vaporisation (210 kJ.kg) - Utilisation facile et peu contraignante
Oxygène (0,21 dans l'air)	154,40	90,2	- Peu utilisé en cryogénie - Risques liés à sa forte réactivité - Utilisé dans Aciers, coupe, combustion (fours), médicale, espace
Argon ($9,6 \cdot 10^{-3}$ dans l'air)	150,80	87,3	- Non toxique - Utilisé dans les calorimètres de détecteur - Coût assez élevé (≈ 8 €/litre)
Krypton ($1,1 \cdot 10^{-8}$ dans l'air)	209,4	119,8	-Non toxique -Plus lourd que l'air -Il est normalement expédié sous forme de gaz.
Néon ($1,8 \cdot 10^{-5}$ dans l'air)	44,40	27,1	- 10 fois plus cher que l'hélium - Utilisé dans les Tubes de lumière

Tab (I.5) : Caractéristiques et performances des cryo-fluides. [9] [10] [11] [15].

I.8.Applications de la supraconductivité en électrotechnique :

Les matériaux supraconducteurs s'occupent une large place dans les applications industrielles, on peut citer trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique[8] :

- Très forts champs magnétiques. Cette catégorie concerne les bobines de champs, les systèmes de stockage d'énergie...
- Forts champs magnétiques. Cette catégorie concerne les moteurs, les alternateurs, les transformateurs, les systèmes de stockage de l'énergie...
- Faible champ magnétique. Cette catégorie concerne les lignes du transport d'électricité, les transformateurs, les limiteurs de courant...

Nous présentons ci-dessous quelques applications majeures des supraconducteurs en électrotechnique.

I.8.1. Aimants supraconducteurs :

Les aimants supraconducteurs se sont des supraconducteurs massifs refroidis à un champ nul et exposent à une variation rapide du champ magnétique, ce champ qui va piégé par le matériau supraconducteur est lié a des courants induits par la loi du Lenz, ces courants se développent à partir de la surface extérieure, mais ils ne s'amortissent pas puisque la résistivité est nulle. Lorsque le champ extérieur diminue, la répartition des courants change pour s'opposer à cette nouvelle variation et tendre à piéger l'induction, pour que le supraconducteur piège efficacement le champ magnétique il faut que le champ extérieur atteigne une valeur appelée champ de pénétration H_p . [1].

I.8.2.Les systèmes de stockage de l'énergie SMES :

L'absence de la résistivité des supraconducteurs permet de stocker l'énergie électrique sous forme magnétique dans une bobine supraconductrice court-circuitée d'inductance propre L et dans laquelle circule un courant I . Ces bobines sont appelées SMES « Superconducting Magnetic Energy Storage ». [4]

I.8.3. Trains à lévitation magnétique :

Se sont des trains sont construits de telle sorte qu'il n'y a aucun contact entre la voie et le train (lévitation de 10 cm au-dessus de la voie dans le meilleur cas), ce qui supprime toute trace de friction. La voie est constituée des aimants permanents qui repoussent le champ magnétique émis par de forts aimants supraconducteurs placés sous le train. C'est un train écologique. [3].

I.8.4. Les transformateurs :

L'application des matériaux supraconducteurs dans les transformateurs permet d'avoir des transformateurs très performantes, ces transformateurs comportent à remplacer des enroulements classiques par des autres en supraconducteur, les pertes en régime alternatif des supraconducteurs restent un inconvénient majeur, cependant les études effectuées ont montré des performances remarquables de ce type des transformateurs par rapport à un transformateur conventionnel, les pertes peuvent diminuer de 30 %, le volume de 50 % et le poids de 70 % [4],

I.8.5. Machines tournantes :

L'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes. Le remplacement des bobinages en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet un gain de masse grâce aux grandes densités de courant de fil et à la disparition du circuit magnétique, le fort couple massique de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués [1].

I.8.6. Limiteurs du courant :

Le fonctionnement d'un limiteur du courant supraconducteur est basé sur les propriétés intrinsèques des matériaux supraconducteurs. Si ceux-ci sont principalement connus pour leur capacité à conduire un courant électrique sans pertes, ils peuvent également devenir résistifs sous certaines conditions. En effet de la transition entre l'état supraconducteur et l'état normal de tout matériau supraconducteur et surtout de type I, donc en lui imposant un courant I supérieur à un seuil de courant I_c appelé "courant critique", donc on observe une augmentation très rapide de la résistance, la limitation se fait donc naturellement sans la nécessité de dispositif de commutation. Le moyen le plus simple de l'utiliser est de l'insérer en série au début du réseau à protéger [16].

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre. Nous avons présenté une étude théorique sur les matériaux supraconducteurs. Sachant qu'il existe deux types : type I et type II. Ces derniers sont limités par des grandeurs critiques qui sont : la température critique T_c , le champ magnétique critique H_c et enfin la densité de courant critique J_c . Les supraconducteurs ont des performances et des propriétés remarquables qui rendent leur utilisation dans divers domaines d'application industriels.

CHAPITRE 2
MACHINES SYNCHRONES

II.1. Introduction :

La géométrie du flux axial n'est pas nouvelle, la première machine de Faraday 1831 était une machine à flux axial, Tesla a breveté un moteur à disques 1889, cette géométrie a toujours fait appel à des Penseurs dans les machines électriques, mais a été difficilement supplémentaires dans l'agencement de la structure mécanique [29].

Ce chapitre est réservé aux différents aspects de la machine synchrone à flux axial. Il est décomposé en plusieurs parties. Dans la première partie, nous allons voir des rappels sur les machines à flux radial, leurs topologies de la conception et ses performances. Ensuite nous présentons les différentes structures de la machine à flux axial suivi par une comparaison entre les deux types (radiale et axiale). La deuxième partie sera réservée pour les méthodes théoriques et pratiques pour identifier les paramètres d'une machine à flux axial.

II.2. Machines synchrones :

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant pour obtenir un tel fonctionnement [17]. Durant la dernière décennie, la demande des machines électriques plus compactes et plus efficaces a attiré toute l'attention des industriels et des chercheurs vers les machines synchrones. [18]. Les topologies des machines électriques potentiellement candidates sont nombreuses et variées, un premier classement peut être opéré en fonction de la direction du trajet du flux principal au niveau du stator et de l'entrefer des machines [20]. On distingue alors les machines à :

- Flux radial (MSFR). Pour lesquelles le flux principal est localisé dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine.
- Flux axial (MSFA). Le flux est essentiellement inclus dans un plan contenant l'axe de rotation de la machine. Ces deux types des machines sont parfois qualifiés de machines longitudinales.

La figure (II.1) regroupe les différentes machines synchrones à flux axial et radial qui existent :

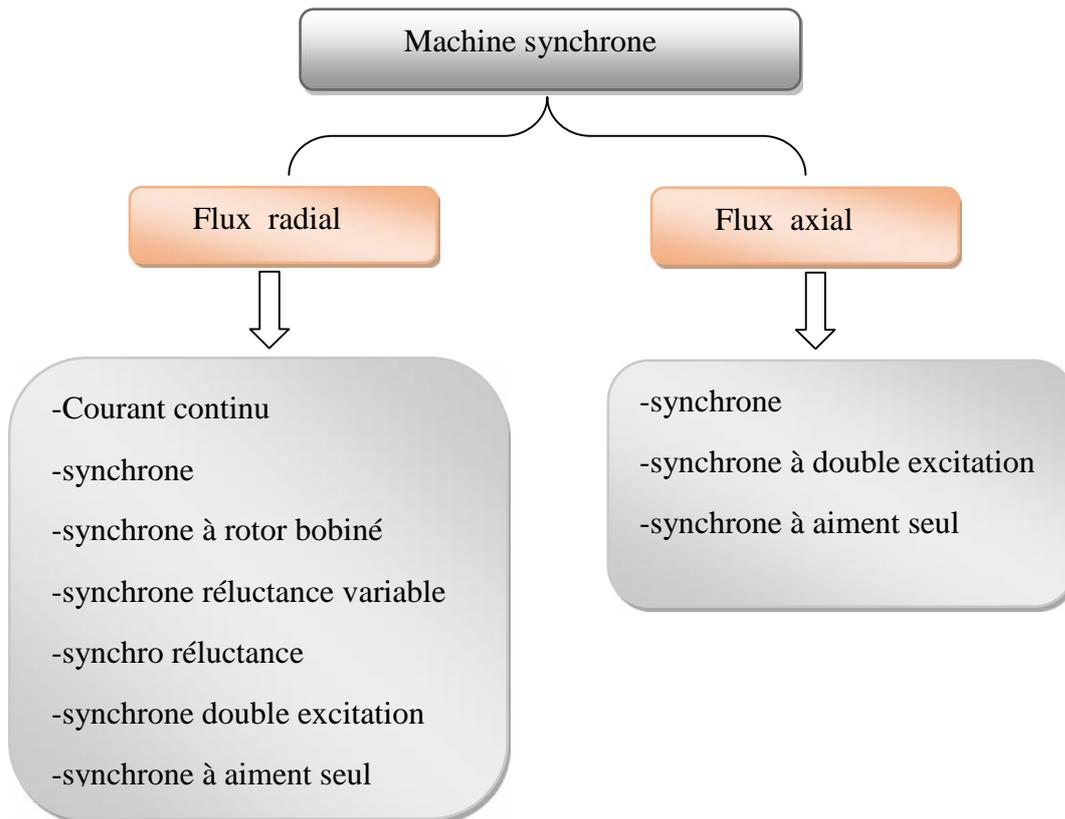


Figure (II.1) : les typologies principales des machines synchrones qui existe.

II.2.1. Machine synchrone à flux radial (MSFR) :

Historiquement, la machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue 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, la première machine synchrone à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est reparti et les aimants placent en surface, cette machine est l'emplacement des aimants. En effet, en les mettant en surface les applications à haute vitesse sont difficiles [19]. La machine synchrone à flux radial est la machine la plus conventionnelle, elle est employée couramment pour l'entraînement direct sans 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. Les différents types de rotors de machine à flux radial sont munis d'aimant monté soit en surface soit encastré ou enterrés [21]. La machine à flux radial principalement le flux est localisé dans un trajet perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine [20], comme le montre la figure (II.2).

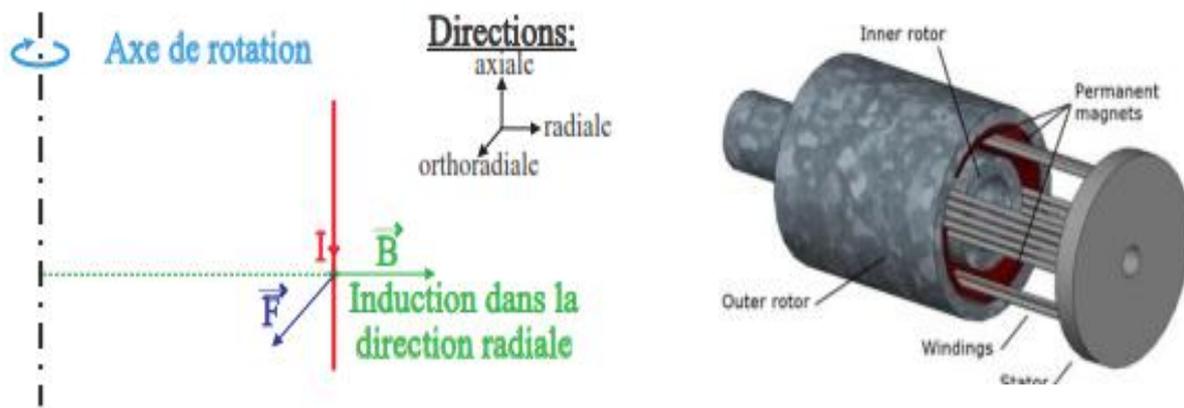


Figure (II.2) : Principe de fonctionnement et structure de la machine à flux radial [22], [23].

II.2.1.1. Topologies de la machine à flux radial :

On distingue habituellement deux structures usuelles dans la conception des machines à flux radial [24] :

- Machine à flux radial à rotor intérieur.
- Machine à flux radial à rotor extérieur.

A)- Machine à flux radial à rotor intérieur :

La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Les pôles rotoriques tournant à l'intérieur de l'armature stationnaire des enroulements, le stator est de forme cylindrique, constitué d'acier de qualité électrique laminations à des enroulements répartis dans les encoches statorique. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [25][26].

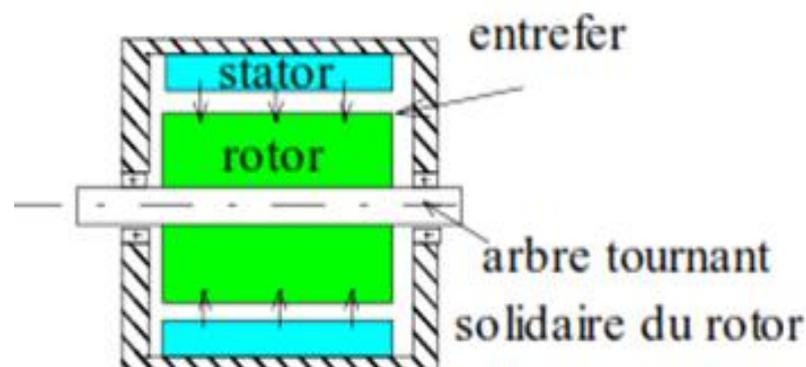


Figure (II.3): Structure d'une machine à flux radial à rotor intérieur [27].

B)- Machine à flux radial à rotor extérieur :

Comme le montre la figure (II.4), le stator est situé au centre de la machine et le rotor à l'extérieur a une forme cylindrique, les circuits magnétiques sont les mêmes que ceux du générateur radiale à rotor interne [26]. La topologie à rotor externe est moins utilisée, car il est plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant et du bobinage, présente les avantages suivants [25] :

- Un diamètre du rotor plus grand que pour les machines conventionnelles à flux radial permettant d'avoir un nombre plus élevé des pôles et un couple plus grand.
- 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.

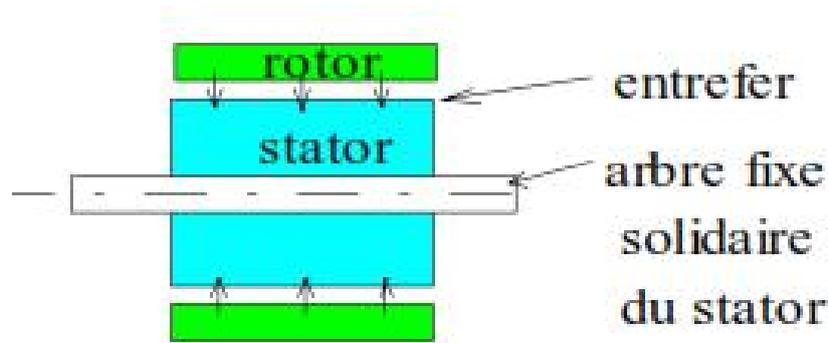


Figure (II.4) : Structure d'une machine à flux radial à rotor extérieur [27].

II.2.1.2. Performances de la machine à flux radiale :

Les machines à flux radial conventionnel ont été utilisées depuis des décennies, des nombreux documents existent concernant la machine MSFR, le plus courant type de machine utilisée dans l'industrie. Ces machines sont bien connues pour avoir une capacité de couple plus élevée et robuste que les autres machines à induction (IM). L'efficacité est également supérieure à celle d'un IM en raison du volume de la machine qui permet d'avoir un nombre plus élevé des pôles. Cependant le volume de la machine reste un important inconvénient qui va limiter leurs utilisations avec des certaines conditions dans les différentes applications industrielles. De notre côté pour les machines à aimants permanents, l'entretien de l'aimant doit être soigneusement mis en œuvre de telle sorte que le rotor ne se décolle pas [28] [13].

II.2.2. Machine synchrone à flux axial (MSFA) :

La machine à flux axiale est une configuration où le flux circule principalement dans la direction axiale. Apparue dans les années 1980, cette machine fut conçue essentiellement dans le but de réduire l'encombrement de la motorisation des véhicules électriques et le poids des éoliennes [30]. Ces machines dites « discoïdales » représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant soit les aimants permanents ou des bobines, leurs principaux avantages sont l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales. [21]

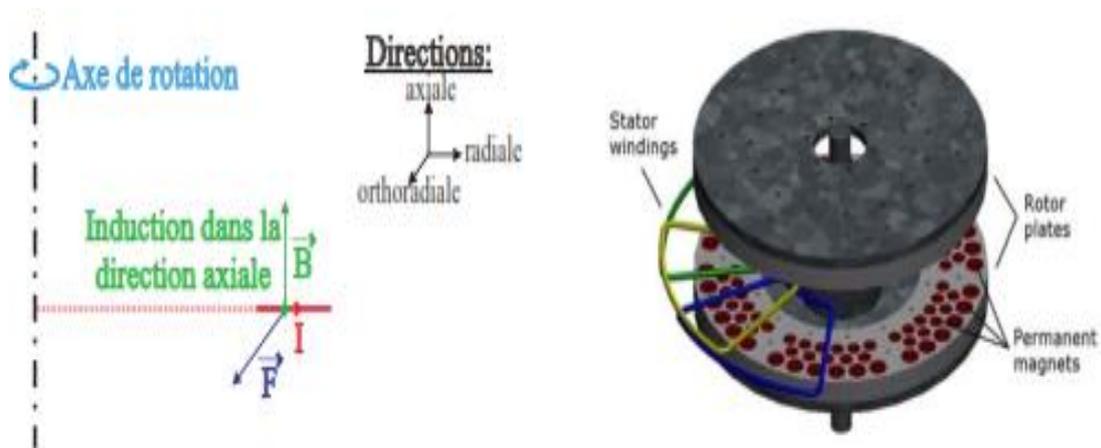


Figure (II.5) : Principe de fonctionnement et structure de la machine à flux axial[22] [23].

II.2.2.1. Topologies de la machine à flux axial :

Les machines à flux axial ont fait l'objet d'importants efforts de recherche dans le monde entier après les années 80. Cette technologie peut ainsi être considérée comme une technologie viable à présent, eu égard à leurs avantages et à leur utilisation dans une grande variété d'applications. Différentes topologies ont été largement étudiées dans la littérature et certains aspects clés de l'analyse et de la conception de ces machines font encore l'objet d'un nombre considérable de nouvelles publications chaque année. Les structures des topologies existantes des machines à flux axial se retrouvent à travers l'étude des matériaux, de même que leurs applications potentielles, elles peuvent être à simple entrefer ou à double entrefer ou multi disque [31][32].

A)- MSFA à simple entrefer :

La première machine à flux axial apparue est une structure à simple entrefer, c'est la topologie la plus simple dans la gamme des machines à flux axial, ce type de machine se compose d'un seul stator et d'un seul rotor, comme le montre la figure (II.6), le noyau du stator peut-être soit fendu (Figure II.6.a) ou sans fente (Figure II.6-b) [34].

Le fonctionnement de ce type de machine est basique, car il ne fait intervenir qu'un stator et un rotor. Le flux créé par un bobinage reparti classiquement présente au stator va interagir avec le flux créé par les aimants permanents collés en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique. Malgré sa simplicité de conception, cette machine accuse de forts problèmes d'attraction entre stator et rotor imposant des ajouts mécaniques lourds et coûteux [33].

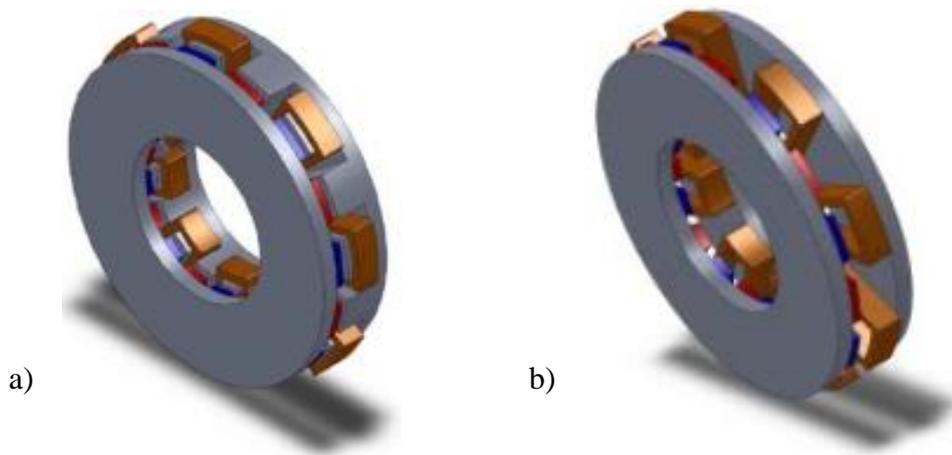


Figure (II.6) : MSFA à simple entrefer : a) Stator à fentes, b) Stator sans fente [34].

B) - MSFA à double entrefer :

La duplication de la machine axiale à simple entrefer permet de créer un équilibre entre les forces d'attraction et de répulsion entre les disques. Les concepteurs se sont penchés sur des machines équipées deux entrefers, deux configurations sont possibles [34] [32] :

- MSFA à rotor intérieur.
- MSFA à stator intérieur.

B.1. MSFA à rotor intérieur :

La machine à flux axial à rotor intérieur se caractérise par la présence de deux entrefers. Dans ces types de machines, un disque rotorique portant des aimants permanents est placé entre deux disques statoriques, comme représentés dans la figure II.7. Dans cette configuration, les stators peuvent être alimentés en parallèle pour permettre à la machine de fonctionner en marche dégradée, cependant le fonctionnement global dépend de l'emplacement des aimants permanents. Un des avantages intéressants de cette configuration est que le cœur de rotor peut être évité pour obtenir un rotor sans noyau, ces machines obtiennent des bons résultats en termes de couple et de puissance. [13] [33].



Figure (II.7) : MSFA à double entrefer à rotor intérieur [26].

B.2. MSFA à stator intérieur :

Cette configuration est une structure similaire à celle du MSFA à rotor intérieur, cependant cette dernière possède un stator situé entre deux rotors, ce type de la machine parfois appelée machine TORUS, peut être [13] [34] :

– Machine TORUS de type N-S, les aimants placés face à face de polarité différente qui peut être aussi :

- Stator intérieur à cœur ferromagnétique
- Stator intérieur sans noyau

- Machine TORUS de type N-N, les aimants placés face à face de même polarité, qui peut être :

- Stator intérieur à fentes avec enroulement imbriqué
- Stator intérieur sans fente avec enroulement toroïdal.

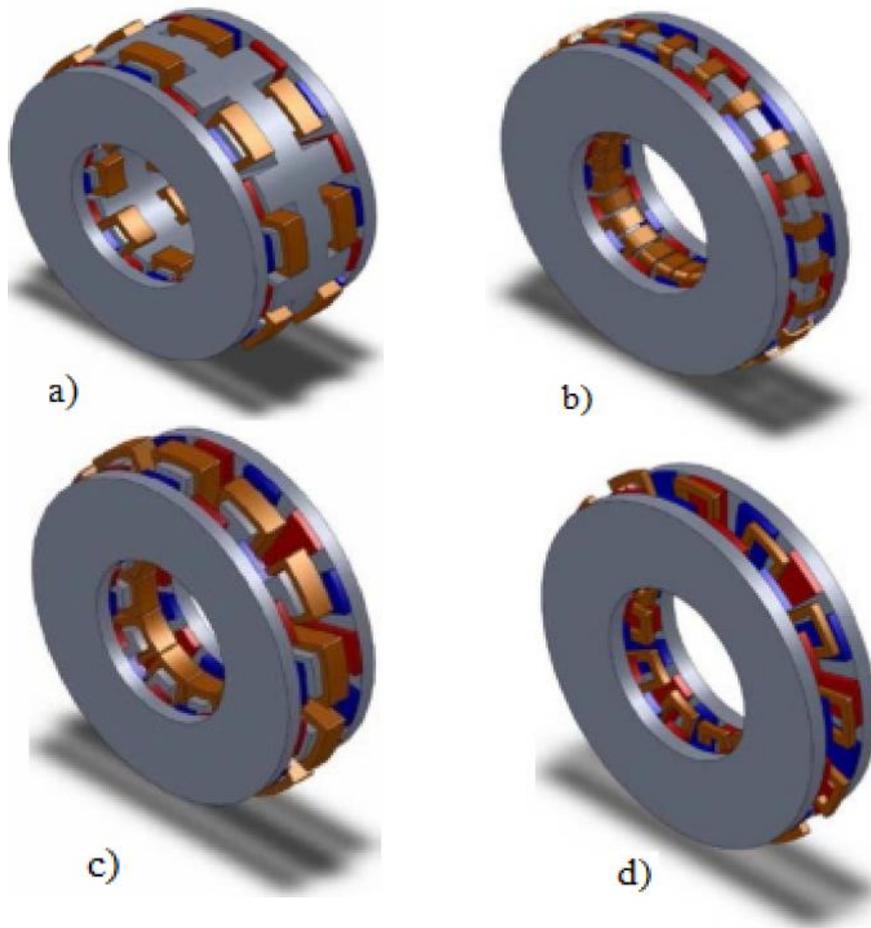


Figure (II.8) : a) Machine à stator intérieur à fentes avec enroulement imbriqué de type N-N. b) Machine à stator intérieur sans fente avec enroulement toroïdal de type N-N. c) Machine à stator intérieur à cœur ferromagnétique de type N-S. d) machine à stator intérieur sans fente avec enroulement toroïdal de type N-S. [34].

C)- MSFA multi disques :

L'adaptabilité est le principal avantage des machines à flux axial multidisques. En effet, pour augmenter la puissance ou le couple d'une machine, il suffit d'ajouter sur le même axe de rotation un nouveau stator et rotor, cette possibilité conduit à compliquer l'assemblage à cause de l'imbrication des anneaux statoriques et des disques rotoriques, le rotor ne peut être pas monté comme dans une machine cylindrique traditionnelle.

Le principe global de fonctionnement reste identique aux machines discoïdes à simple ou à doubles entrefers. La plupart du temps, les machines à flux axial multidisques sont à stator interne. Dans la littérature scientifique, ces machines sont étudiées pour des applications à grandes puissances telles que l'éolien ou pour la traction ferroviaire. [19] [32]

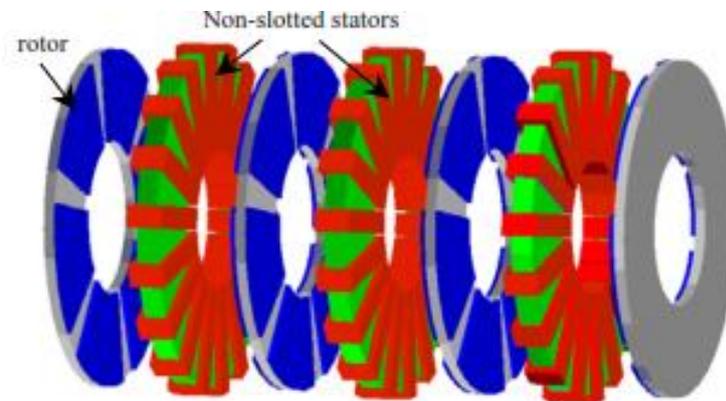


Figure (II.9) : Structure du MSFA à multidisques [28].

II.2.2.2. Avantages et inconvénients :

L'avantage déterminant de la structure discoïde par rapport aux structures cylindriques provient de l'optimisation de la surface utile de génération du couple, source d'une densité de puissance importante pour des géométries axialement courtes, la surface active d'entrefer est supérieure à celle des machines cylindriques. L'accroissement de la polarité a le même effet que dans les structures à champ radial et se traduit ici par une diminution de la longueur, le volume étant parfaitement occupé contrairement aux structures cylindriques qui deviennent creuses.

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 [24]. 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 avec des tôles laminées est délicate, surtout si ce stator doit contenir des encoches. Or la présence de ces dernières est nécessaire afin d'augmenter la valeur des constantes de temps [35].

II.2.2.3. Applications de la MSFA :

Actuellement, ces machines ont trouvé un vaste champ d'applications dans plusieurs domaines (génération de l'énergie, traction terrestre et navale...) en raison de leur grande couple massique et volumique. Dans le but de montrer leurs avantages, nous allons mentionner quelques exemples d'applications de ces machines [21].

II.2.2.3.a. Propulsion navale :

De même, la tendance pour la génération d'énergie dans le navire tout électrique est aux MSFA entraînée à grande vitesse par turbine à gaz, ce qui réduit ainsi la masse et le volume des équipements sur le segment 4-6 MW à vitesse élevée, ainsi que leur couple élevé à basse vitesse permet une nette amélioration de la poussée d'hélice par rapport à la propulsion conventionnelle, la propulsion électrique, permet le renforcement de la discrétion acoustique et l'accroissement de la fiabilité. [32] [24].

II.2.2.3.b. Énergie éolienne :

Dernièrement, les MSFA s'occupent une large place dans les énergies éoliennes, la majorité de ces machines sont des doubles entrefers et à stator interne 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 [34].

II.2.2.3.c. Traction électrique :

L'utilisation des moteurs à fort couple et à faible vitesse (MSFA) pour la traction ferroviaire permet de réduire la masse de la locomotive, 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 [32] [34].

II.3.Comparaison entre MSFR et MSFA :

Le tableau ci-dessous montre une étude comparative entre les deux types des machines MSFA et MSFR, basé sur des performances et des contraintes données.

Performances comparées	Contraintes de comparaison	Conclusions
Couple volumique en fonction du nombre des paires des pôles	Densités linéiques du courant et les inductions dans l'entrefer sont identiques	Le couple volumique des MSFA est toujours supérieur à celui des MSFR
Volume des parties actives	Masses identiques d'aimants	Les MSFA deviennent plus performantes à partir de $2p=12$
Volume des parties actives	Diamètres externes fixes	Les MSFA deviennent plus performantes quand $2p=2$ ou $2p=14$
Puissance volumique et Rapport des volumes V_{AF}/V_{RF}	0.25 kW à 10 kW 1000tr/mn	Puissance volumique des MSFA est supérieur, et $V_{AF}/V_{RF} = 0,2$
Couple volumique et Rendement	150 kW/1200 tr/min	MSFA offre un couple volumique et un rendement plus intéressant
Couple massique et Rendement	2.25 kW à 37 kW/1800tr/mn	Les deux structures présentent les mêmes couples massiques et Rendements
Volume des parties utiles	Bobinage concentré, 50 kW et 10 000 tr/min	Le volume de la MSFR est 80 % plus grand que celui de la MSFA
Couple électromagnétique et Couple massique en fonction du coefficient de forme λ	Volume fixe 0,01 m, 1000 r/min, induction dans le fer identique, induction dans l'entrefer, pertes/surface d'échange $K_{losses} = 2500 \text{ W/m}^2$	MSFR intéressante quand : $\lambda > 1$ et nombre de pôles faible MSFA plus performante quand : $\lambda < 0,3$

Tab (II.1) : comparaisons entre les performances des MSFA et des MSFR[32].

II.4. Identification des paramètres d'une machine électrique :

II.4.1. 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 [35].

II.4.1.a. Calcul des inductances propres et mutuelles :

Pour calculer les inductances propres et mutuelles, il faut redéfinir les flux engendrés par ces inductions. Les intégrales suivantes donnent les expressions de ces flux captés par un enroulement m décalé d'un angle de $(m-k) \frac{2f}{n}$ par rapport à la bobine k [35] :

$$\phi_{m1k} = N_s (R_2^2 - R_1^2) / 2 \int_{\frac{(m-1)2f}{m} - f/2p}^{\frac{(m-1)2f}{m} + f/2p} B1k(\theta) d\theta \quad (II.1)$$

$$\phi_{m2k} = N_s (R_2^2 - R_1^2) / 2 \int_{\frac{(m-1)2f}{m} - f/2p}^{\frac{(m-1)2f}{m} + f/2p} B2k(\theta) d\theta \quad (II.2)$$

Après les calculs on obtient:

$$\phi_{m1k} = 2 \mu_0 N_s^2 (R_2^2 - R_1^2) / \pi p \left(\frac{1}{e_1 + L_{A1}} \right) i_k \sum_{\xi=0}^{\xi} \frac{1}{h^2} \cos \left((m-k) \frac{2f}{n} h \right) \quad (II.3)$$

$$\phi_{m2k} = 2 \mu_0 N_s^2 (R_2^2 - R_1^2) / \pi p \left(\frac{1}{e_2 + L_{A2}} \right) i_k \sum_{\xi=0}^{\xi} \frac{1}{h^2} \cos \left(h(m-k) \frac{2f}{n} \right) \quad (II.4)$$

Par définition :

$$\phi_{mk} = (\phi_{m1k} + \phi_{m2k}) / 2 \quad (II.5)$$

Ce qui donne pour le flux capté par les N_s spires :

$$\phi_{mk} = \mu_0 N_s^2 (R_2^2 - R_1^2) / \pi p \left(\frac{1}{e_1 + L_{A1}} + \frac{1}{e_2 + L_{A2}} \right) i_k \sum_{\xi=0}^{\xi} \frac{1}{h^2} \cos \left((m-k) \frac{2f}{n} \right) \quad (II.6)$$

$$\text{Nous avons :} \quad \phi_{mk} = 2p \phi_{mk} \quad (II.7)$$

$$\phi_{mk} = L_{mk} i_k \quad (II.8)$$

Alors nous pouvons définir l'inductance mutuelle entre deux phases par :

$$L_{mk} = 2\mu_0 N_s^2 (R_2^2 - R_1^2) / \pi \left(\frac{1}{e_1 + L_{A1}} + \frac{1}{e_2 + L_{A2}} \right) \sum_{t=0}^{\zeta} \frac{1}{h^2} \cos \left(h(m-k) \frac{2f}{n} \right) \quad (\text{II.9})$$

II.4.1.b. Calcul l'inductance de fuite (propre) :

La connaissance des inductances de fuites est nécessaires à la prédétermination des caractéristiques électromécaniques des machines électriques, ces inductances des fuites interviennent dans les schémas équivalents et sont indispensables dans l'étude de l'association entre la machine et la source d'alimentation, ainsi qu'elles sont plus importantes pour faire de la commande que pour réaliser un dimensionnement de la machine [36].

Pour déterminer l'inductance de fuite, nous allons utiliser la relation suivante :

$$L_f = \mu_0 N_s^2 I \frac{h}{3w} \quad (\text{II.10})$$

Avec l , h et w qui représentent respectivement la longueur d'une spire, la profondeur et la largeur d'encoche. Si nous nous intéressons à l'inductance de fuite d'une phase L_f , il vient [35] :

$$L_f = 2p L_f = 4\mu_0 N_s^2 p (R_2 - R_1 + L_{CSE1} + L_{CSE1} + 2L_E) \frac{L_E}{2X} \quad (\text{II.11})$$

II.4.1.c. Calcul de la résistance statorique :

la résistance d'une spire se détermine à l'aide de la formule classique :

$$r = \rho \frac{1}{S} \quad (\text{II.12})$$

Avec ρ la résistivité (Ωm) et S la section de la spire (m^2). En appliquant (II.12) à nos dimensions la résistance d'une spire est égale à :

$$R_{sp} = \rho \frac{2(R_2 - R_1 + L_{C1} + L_{C2} + 2L_E)}{S} \quad (\text{II.13})$$

En suit la résistance totale R d'une phase :

$$R = 2p N_s R_{sp} = p N_s \rho \frac{4(R_2 - R_1 + L_{C1} + L_{C2} + 2L_E)}{S} \quad (\text{II.14})$$

II.5. Méthodes pratiques de test du MSFA :

Après avoir les méthodes théoriques de calcul des paramètres de la machine, maintenant nous allons voir pratiquement l'identification de ces paramètres. (Des résistances, des inductances propres et des inductances mutuelles de trois phases d'induites).

II.5.1. Identification des résistances :

Les mesures pratiques des résistances consistent à appliquer une alimentation avec une tension continue sur les trois phases de l'induit l'une après l'autre et à travers d'un voltmètre et un ampèremètre on peut mesurer la tension et le courant parcouru dans les trois phases qui permettent de connaître les résistances des trois phases. [8] [37].

II.5.2. Identification des inductances propres et mutuelles :

Les tests d'identification des inductances consistent à appliquer des tensions alternatives sur chaque une des trois phases, nous alimentons la phase en question et nous relevons le courant, la tension et la puissance réactive de cette phase ainsi que les tensions des deux autres phases.

II.5.2.1. Inductances mutuelles :

Identification pratique de l'inductance mutuelle ce fait à travers des graphes de la variation des tensions des deux phases non alimentées par rapport au courant de la phase alimentée en tension alternative, ces graphes représentent la réactance mutuelle (X) à l'aide de la relation (II.15) on peut calculer les inductances mutuelles [8].

$$L_{ij} = \frac{X_i}{2ff} \quad (\text{II.15})$$

II.5.2.2. Inductances propres :

L'identification des inductances propres basée sur le graphe de la variation de la puissance réactive de la phase concernée en fonction du courant de la phase de chaque phase à travers la relation qui lie la puissance réactive et l'inductance propre (II.16), les équations qui régissent ces graphes on peut calculer ω puis l'inductance propre [8].

$$Q = I_i (\omega L_i^2) \quad (\text{II.16})$$

II.6.Conclusion:

Ce chapitre est réservé à l'étude théorique sur les machines synchrones à flux axial et radial. Ce dernier nous a permis de connaître le développement actuel des différentes topologies et structures de ces types des machines qui existe.

Après un rappel sur les notions nécessaires à la compréhension de ces différentes topologies et structures. Une étude comparative entre les deux structures a été présentée montre la supériorité de la machine à flux axial, cette étude bien sûr basée sur des performances et des contraintes donnés.

Nous avons présenté des méthodes théoriques pour le calcul des paramètres de la MSFA, les résistances, inductances mutuelles et propres. Puis le prototype et les méthodes du test pour identifier la machine expérimentalement.

CHAPITRE 3
ETUDE EXPÉRIMENTALE

III.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale d'une machine supraconductrice à structure axiale, réalisée au laboratoire de recherche LESI de l'Université Djilali Bounama de Khemis Miliana. L'objectif principal de cette étude est de faire tourner cette machine. Nous allons voir dans ce chapitre les tests nécessaires pour identifier les paramètres et valider expérimentalement le fonctionnement de la machine. Ces tests sont répartis en quatre catégories : les tests à chaud statique, à chaud dynamique, à froid statique et à froid dynamique.

III.2.Présentation de la machine étudiée :

La machine que nous avons étudiée est une machine synchrone à flux axial, se caractérise par la présence de deux entrefers. L'inducteur situé entre deux induits (machine à double entrefer), son alimentation en alternatif se fait avec un système bagues-balais et l'inducteur par un courant continu. Le système de la machine comporte aussi un moteur d'entraînement de 1400 tr/m lié à la machine par une courroie qui porte un réducteur de vitesse, possède également un réservoir d'azote liquide avec une pompe pour l'injecter dans les pastilles supraconductrices de type YBCCO, comme le montre la figure (III.1).

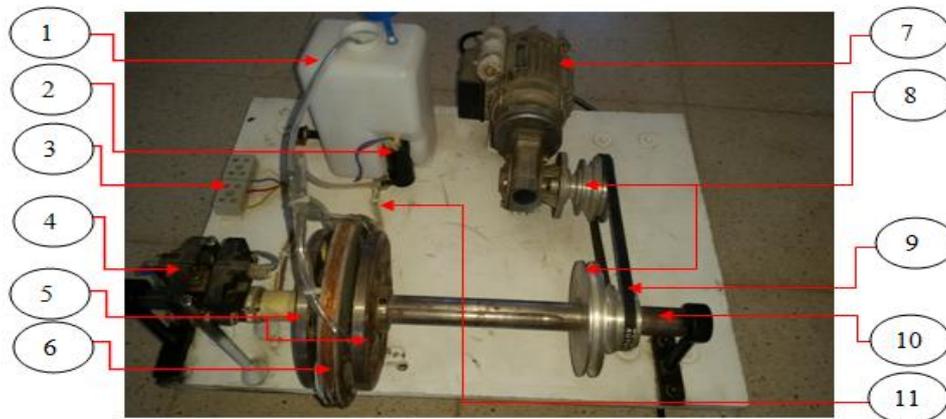
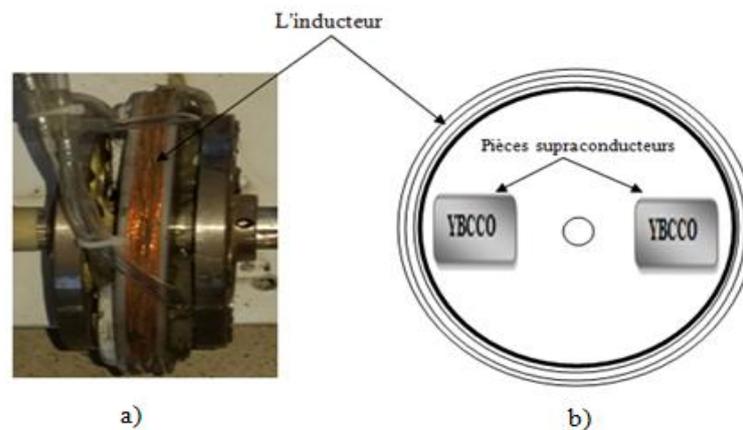


Figure (III.1): Machine synchrone supraconductrice à structure axiale

- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1- Réservoir de l'azote | 7- Moteur d'entraînement |
| 2- Pompe d'injection | 8- Réducteurs de la vitesse |
| 3- Bornes de l'alimentation de l'induit | 9- Courroie d'entraînement |
| 4- Système bagues- balais | 10- L'axe de rotation |
| 5- L'induit | 11- L'alimentation de l'inducteur |
| 6- L'inducteur | |

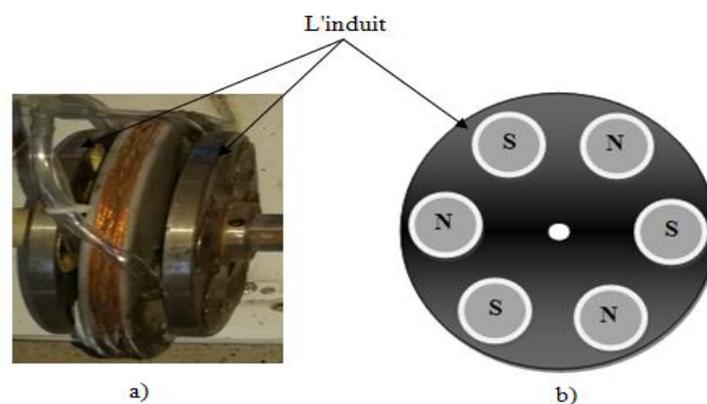
III.2.1. l'inducteur :

L'inducteur de cette machine est basé sur la concentration magnétique, se compose d'un disque enroulé à l'extérieur par une bobine en cuivre possède à l'intérieur deux pastilles supraconductrices de type II (YBCCO) refroidies par l'azote liquide à travers une pompe d'injection a pour but de créer la variation du champ magnétique à l'intérieur des deux entrefers de la machine. Cet inducteur est situé entre deux induits, joue le rôle de stator. La figure ci-dessous présente la structure de l'inducteur.



III. 2.1. L'induit :

L'induit se compose de deux disques en fer placés en parallèle à l'extérieur de l'inducteur, comme le montre la figure (III.3), chacun représente un induit qui comporte six solénoïdes (6 pôles) en cuivre, réparties à la surface. L'induit global de la machine comporte six paires de pôles (12 pôles) couplées en étoile pour avoir le neutre fictif, joue le rôle d'un rotor.



III.3. Essais effectués sur le prototype :

Après la présentation de notre système et l'identification des principaux composants de notre machine, nous avons effectué les tests nécessaires pour valider le fonctionnement de cette machine. Ces tests sont articulés comme le montre la figure (III.4).

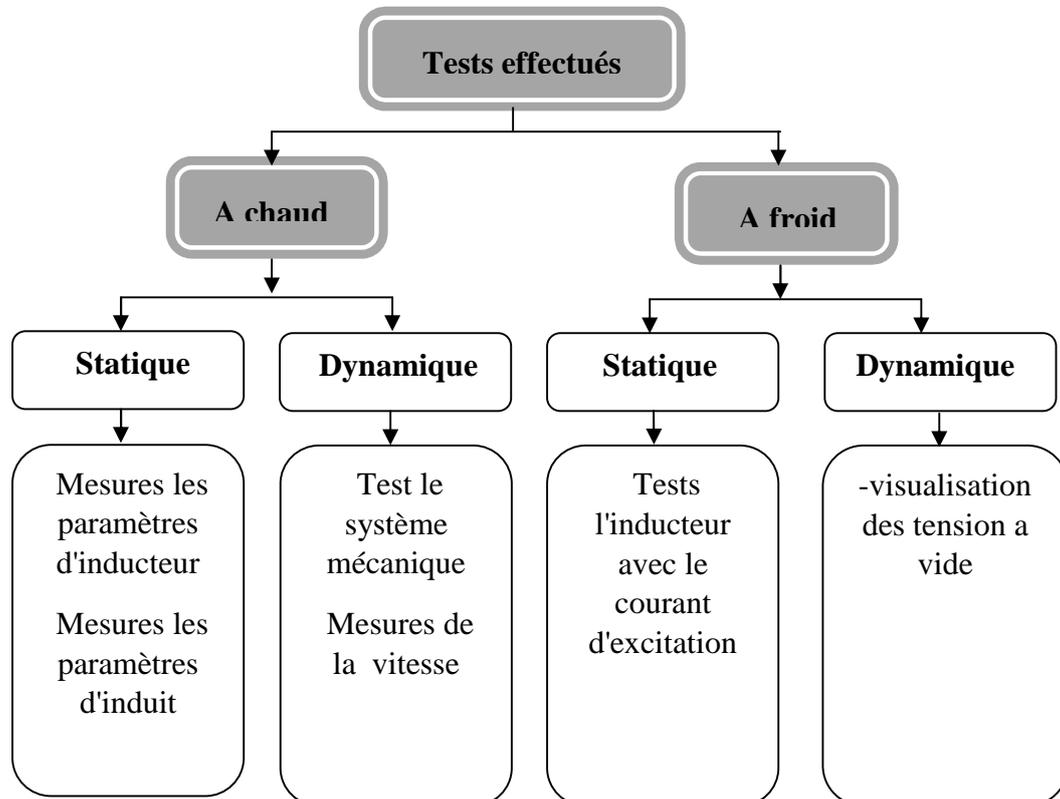
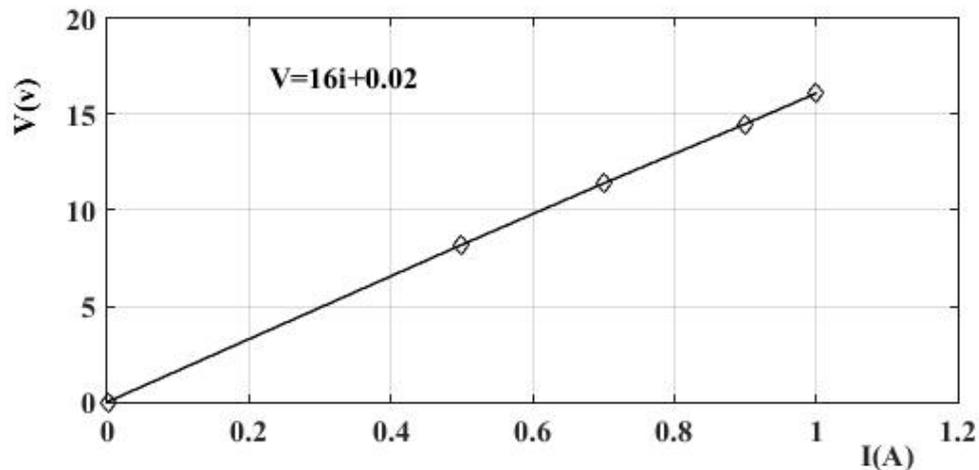


Figure (III.4) : Tests effectués

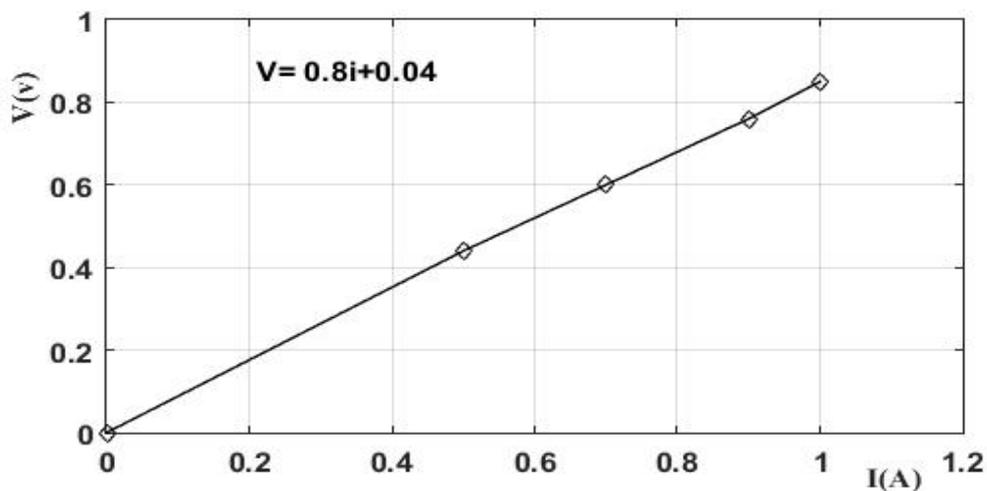
III.3.1. Mesures des paramètres de l'inducteur :

Ce test consiste à mesurer la résistance de l'inducteur, réalisé à chaud sans nécessité d'un liquide de refroidissement (azote liquide) et sans entrainement de la machine.

La mesure de cette résistance est effectuée en alimentant ce dernier par une tension continue, nous relevons la tension aux bornes et le courant parcouru à l'aide d'un ampèremètre et voltmètre. Nous avons mis en série à l'inducteur une résistance de protection et pour connaître sa valeur nous avons fait même opération précédente. Les figures ci-dessous représentent la variation de la tension en fonction du courant de l'inducteur et de la résistance de protection.



Figure(III.5): Identification de la résistance de protection



Figure(III.6): Identification de la résistance de l'inducteur.

Les pentes des courbes présentées dans les figures (III.5) (III.6) représentent successivement la valeur des résistances de protection et de l'inducteur :

- Résistance de protection : 16Ω
- Résistance de l'inducteur : $0,8 \Omega$

III.3.1.1. Champ créé par l'inducteur :

Pour tester le fonctionnement de l'inducteur, on excite l'inducteur par un courant continu et on relève l'induction créée dans les deux entrefers à l'aide d'un tesla-mètre. Premièrement nous avons mesuré le champ dans l'entrefer suivant un rayon (A) entre deux bobines où se trouve les pastilles supraconductrices. Puis suivant un rayon (B) qui parallèle à la bobine .

Comme nous l'indique dans la figure (III.7).

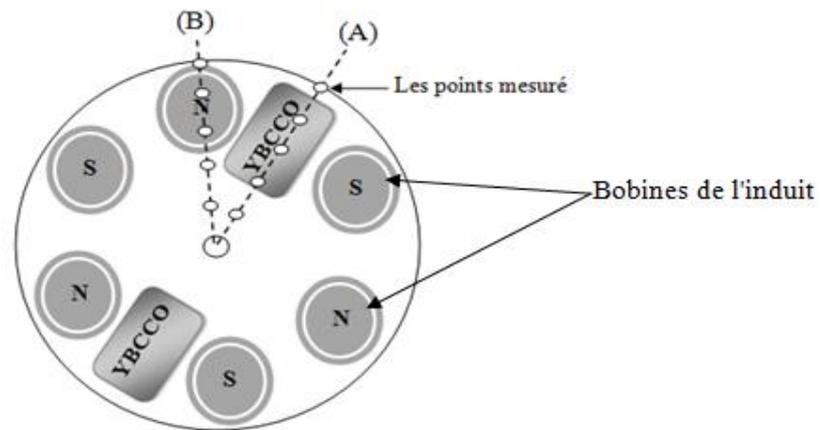
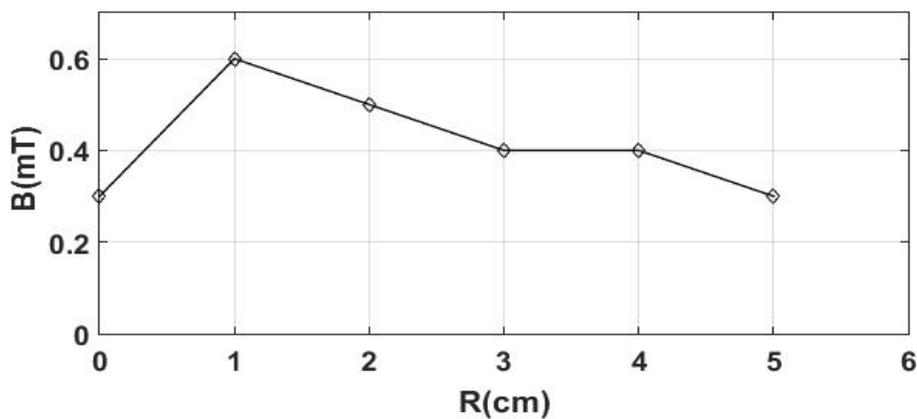
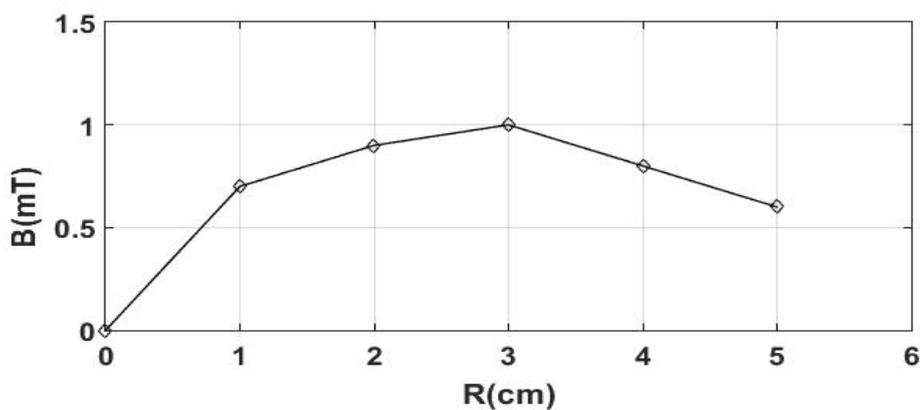


Figure (III.7) : Les différents points de mesure du champ magnétique créé dans l'entrefer.

Les deux figures ci-dessous présentent la variation de l'induction magnétique créée par l'inducteur en fonction de la profondeur de la sonde de tesla-mètre.



Figure(III.8.) : Variation de l'induction dans l'entrefer suivons rayon (A)



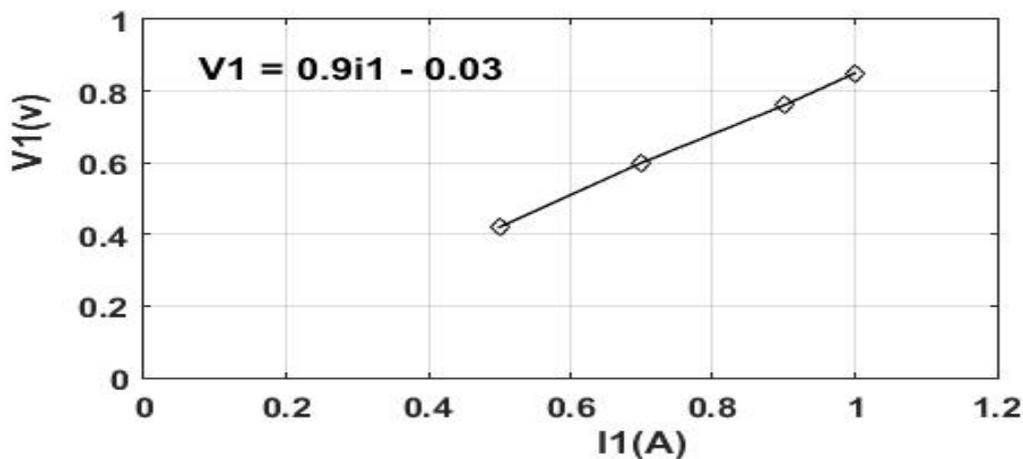
Figure(III.9) : Variation de l'induction dans l'entrefer suivons rayon (B).

III.3.2. Mesures des paramètres de l'induit :

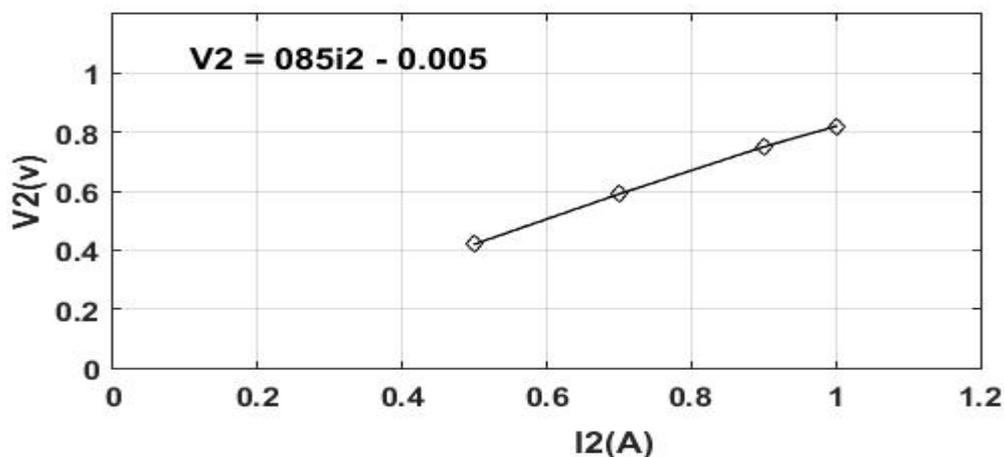
Cette partie traite des tests nécessaires pour mesurer et identifier les résistances, les inductances propres et les inductances mutuelles des trios phases de l'induit de notre machine. Nous avons utilisé les méthodes ampérométriques, ces tests seront répartis en deux parties. La première partie sera réservée pour l'identification des résistances et puis la deuxième pour les inductances propres et mutuelles.

III.3.2.1. Identification des résistances :

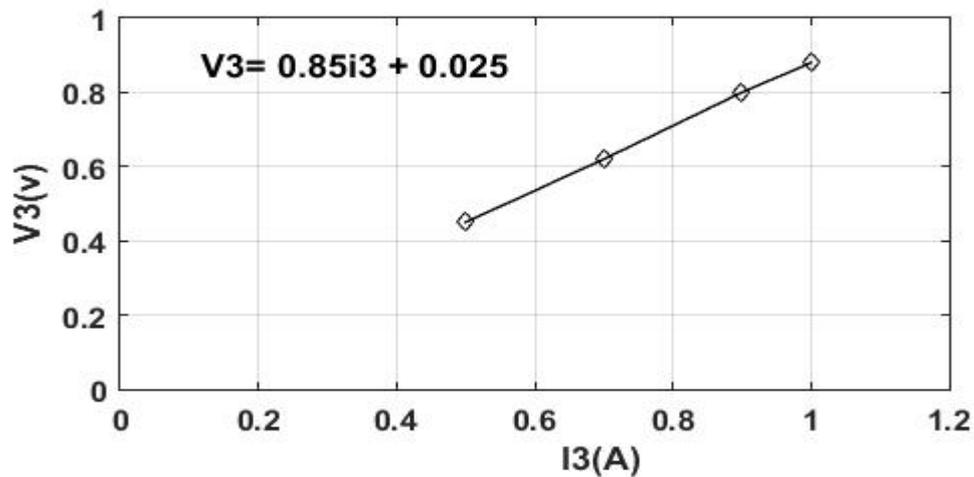
Pour mesurer les résistances des trois phases de l'induit. Nous alimentons ces derniers par un courant continu l'une après l'autre, à travers un ampèremètre et un voltmètre nous relevons la tension où bornes et parcourue pour chaque phase. Ces tests permettent aussi de valider le fonctionnement des trois phases. Les figures ci-dessous présentent la variation de la tension en fonction du courant de chaque phase de l'induit.



Figure(III.10): Identification de la résistance de première phase d'induit



Figure(III.11): Identification de la résistance de deuxième phase d'induit



Figure(III.12): Identification de la résistance de troisième phase d'induit

Les pentes des courbes présentées dans les trois figures précédant représentent les résistances des trois phases de l'induit, comme nous l'indique dans le tableau (III.1).

Numéro de phase	1	2	3
Résistances (Ω)	0.9	0.85	0.85

Tab(III.1) : Résistances de l'induit

III.3.2.2. Identification des inductances propres :

L'identification des inductances propres se fait à l'aide d'un RLC-mètre. Nous branchons leurs bornes dans chaque phase et nous relevons les inductances propres. Le tableau (III.2) présente les inductances propres des trois phases de l'induit.

Numéro de phase	1	2	3
L'inductances (mH)	0.20	0.19	0.19

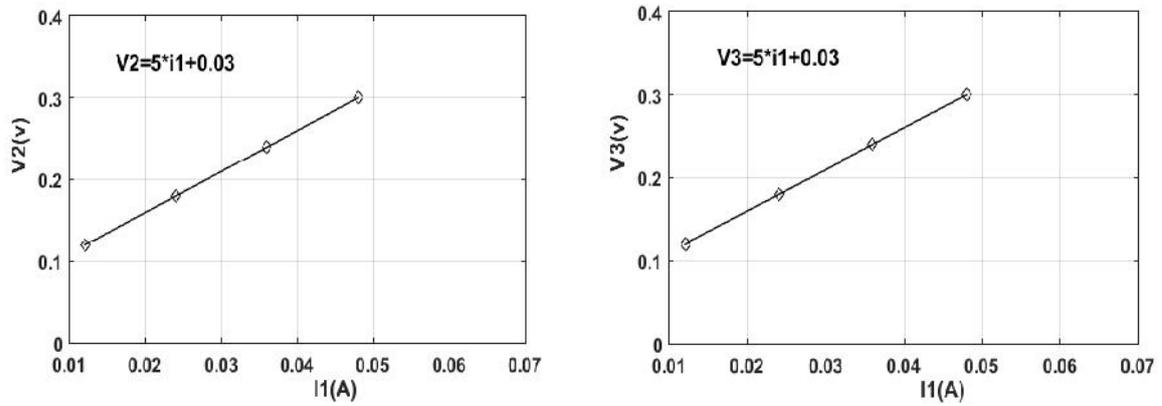
Tab(III.2) : Inductances propres de l'induit

III.3.2.3. Identification des inductances mutuelles :

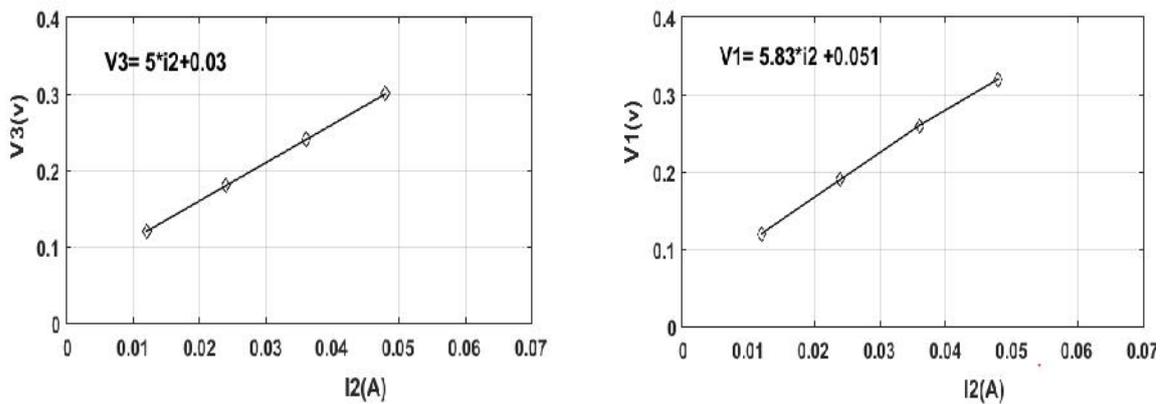
Pour identifier les inductances mutuelles .Nous alimentons la phase en question par une tension alternative , en relevons le courant de la phase alimentée et la tension de deux phases non alimentées à l'aide d'un ampèremètre et voltmètre et puis nous présentons les variations des tensions des deux phases non alimentées par rapport au courant de la phase alimentée, la

penne de chaque courbe de ces variations représente la réactance mutuelle et les inductances mutuelles se calculent par la relation suivant :

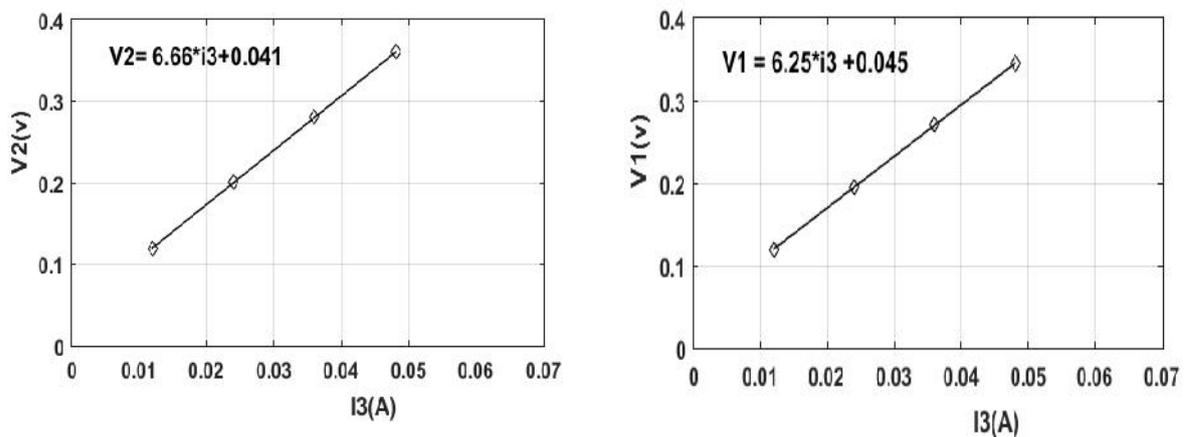
$$L_{ij} = \frac{X_i}{2ff} \tag{III.1}$$



Figure(III.13) : Détermination des réactances X_{12} , X_{13}



Figure(III.14) : Détermination des réactances X_{21} , X_{23}



Figure(III.15) : Détermination des réactances X_{31} , X_{32}

À partir des figures précédentes (III.13) (III.14) (III.15), nous pouvons calculer les réactances mutuelles et à travers la relation (III.1) on peut calculer les inductances mutuelles de l'induit

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus.

X_{12} (Ω)	X_{13} (Ω)	X_{21} (Ω)	X_{23} (Ω)	X_{31} (Ω)	X_{32} (Ω)	L_{12} (H)	L_{13} (H)	L_{21} (H)	L_{23} (H)	L_{31} (H)	L_{32} (H)
5	5	5.83	5	6.25	6.66	0.015	0.015	0.018	0.015	0.019	0.021

Tab(III.3) : Réactances et inductances mutuelles de l'induit

III.3.3. Tests à chaud dynamique:

Ces tests ont pour but de vérifier le comportement mécanique de notre système complètement et de mesurer les vitesses de différentes parties. Sont effectués sans l'azote et sans courant d'excitation. Nous avons entraîné notre machine par un moteur asynchrone et puis nous mesurons la vitesse de réducteur, vitesse de moteur d'entraînement et la vitesse de la machine à l'aide d'une taque-mètre. On obtient les résultats suivant :

- Vitesse de moteur d'entraînement : 1400 tr.min^{-1}
- Vitesse de réducteur : 147 tr.min^{-1}
- Vitesse de la machine : 219 tr.min^{-1}

III.3.4. Tests a froid statique :

Ces tests sont effectués pour vérifier l'état supraconducteur des pièces utilisées dans l'inducteur (fonctionnement de l'inducteur), ainsi de vérifier les fuites des bains de refroidissement. Nous avons mis l'azote liquide dans le réservoir de notre machine pour l'injecter dans les pastilles supraconductrices. Malheureusement, ces tests ont été échoués puisque nous avons trouvé un problème dans lequel la pompe n'a pas été en mesure de pomper l'azote dans les pastilles supraconductrices.

À cause de ce problème. Nous avons refroidi la machine directement et de transmettre l'azote dans les bains à travers des entonnoirs comme montre la figure (III.16). Nous avons obtenu les résultats illustrés dans la figure (III.17).



Figure (III.16) : Refroidissement de la machine par l'azote liquide.

Nous avons mesuré l'induction magnétique créée par l'inducteur avec un courant continu de 1,8 A dans les quatre quadrants (pour $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) de l'entrefer par un tesla-mètre a pour bute de vérifier la concentration magnétique (l'état supraconducteur des pastilles utilisées) au niveaux l'entrefer et validé le fonctionnement de l'inducteur. La figure (III.17) présente les résultats obtenus qui représentent la variation de l'induction magnétique en fonction d'angle (θ).

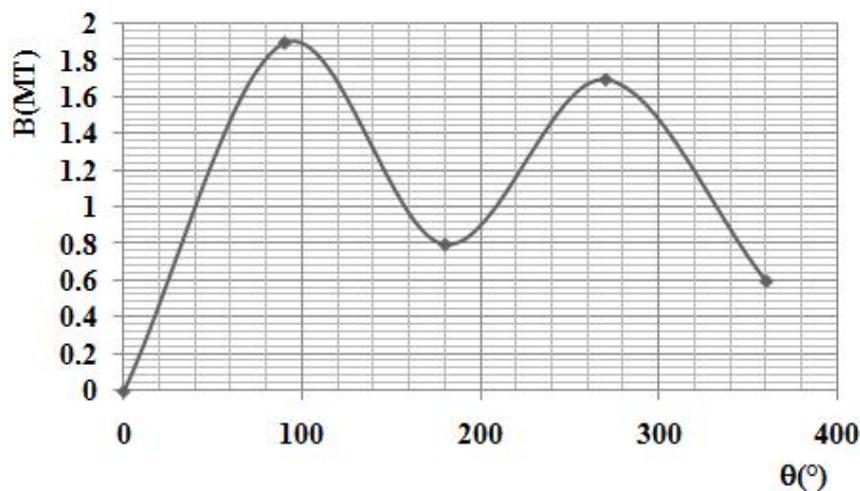


Figure (III.17) : Variation de l'induction (B) en fonction d'angle (θ) dans l'entrefer.

Les résultats obtenus montrent la concentration du champ (l'écrantage du champ) dans l'entrefer de la machine, mais nous avons trouvé une fuite dans les bains du refroidissement. A cause de ce problème nous avons réalisé des nouveaux bains.

III.3.4.1. Réalisation des nouveaux bains de refroidissement

Durant notre essai, nous avons trouvé une fuite dans les bains de refroidissement, à cause de ce problème nous avons réalisé des nouveaux supports en cuivre pour assurer le refroidissement et le fonctionnement des pastilles supraconductrices comme présentées dans les figures (III.18) (III.19).



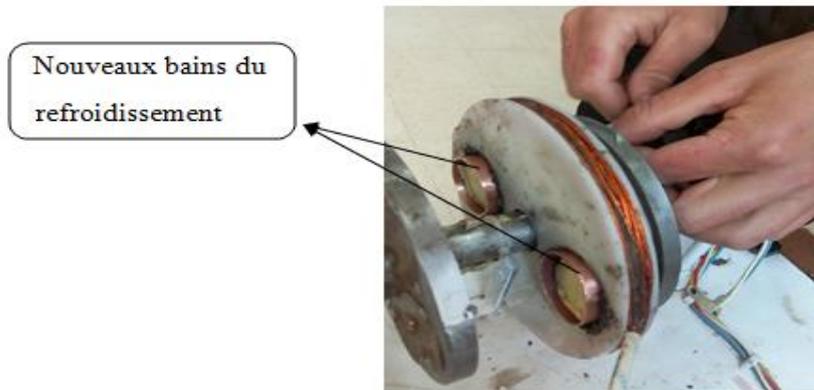
Figure (III.18):Pastilles supraconductrices. **Figure (III.19):**Bains de refroidissement.

Avant l'installation de ces bains, nous avons testé la validité des pastilles supraconductrice et l'état des supports réalisé à travers de la vérification de lévitation magnétique (effet Meissner) de nos pastilles à l'aide d'un fort aimant. Nous avons refroidi les pastilles par l'azote liquide. La figure (III.20) illustre l'effet de Meissner.



Figure (III.20): l'effet de Meissner (lévitation magnétique) .

Nous avons élargi les anciens trous pour avoir placé les nouveaux bains de refroidissement. La figure ci-dessous illustre l'emplacement de ces bains.



Figure(III.21) : Placement des nouveaux bains de refroidissement.

III.3.4.1.a. Tests de la validité des bains réalisés :

Ces tests ont pour objectif de vérifier si les bains ne présentent aucune fuite. Après avoir placé notre machine verticalement, nous avons mis l'azote liquide dans les nouveaux bains de refroidissement et pour valider aussi l'état supraconducteur des pastilles supraconductrices (fonctionnement de l'inducteur), nous avons mesuré l'induction magnétique dans les quatre quadrants (pour $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) de l'entrefer comme le test précédent. Les tests effectués sont présentés dans la figure (III.22).



Figure (III.22) : Refroidissement de la machine par l'azote liquide verticalement.

Les résultats sont présentés dans la figure (III.23).

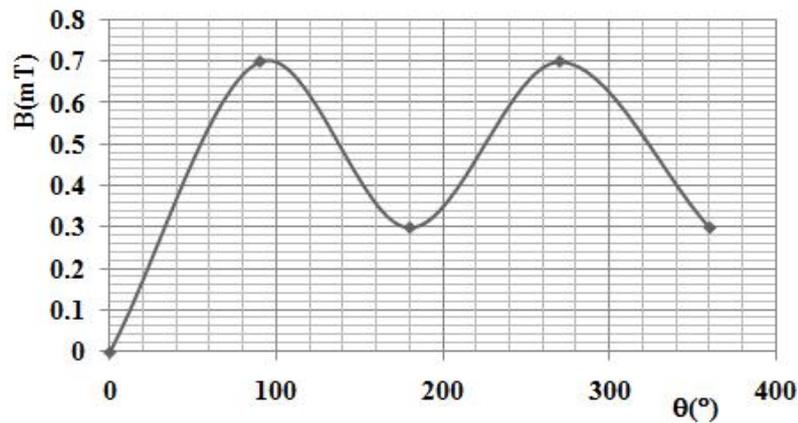


Figure (III.23) : Variation de l'induction (B) en fonction d'angle (θ) dans l'entrefer.

Selon les résultats présentés (figure III.23). Nous sommes arrivés à valider le fonctionnement de l'inducteur de notre machine, il est clair que la concentration du champ par des pastilles supraconductrices crée une variation à l'intérieur de l'entrefer. Ce dernier valide la nouvelle structure de notre inducteur qui est basée sur l'écrantage du champ. Nous avons atteint notre objectif pour ce test.

III.3.5. Tests à froid dynamique :

Après avoir les tests nécessaires pour vérifier les composants de notre système (les tests à chaud statique et dynamique, les tests à froid statique). Nous avons effectué les tests à froid dynamique. Ces derniers ont pour objectif de valider le fonctionnement et la structure de notre machine. Après le refroidissement des pastilles supraconductrices. Nous avons entraîné l'induit par une vitesse de 219 tr.min^{-1} et alimenté l'inducteur en courant continu de $1,8 \text{ A}$. Notre machine est testée en fonctionnement générateur. Nous avons visualisé la tension de sortie à vide d'une phase, à l'aide d'un oscilloscope. Les résultats sont présentés sur les figures (III.24) (III.25).

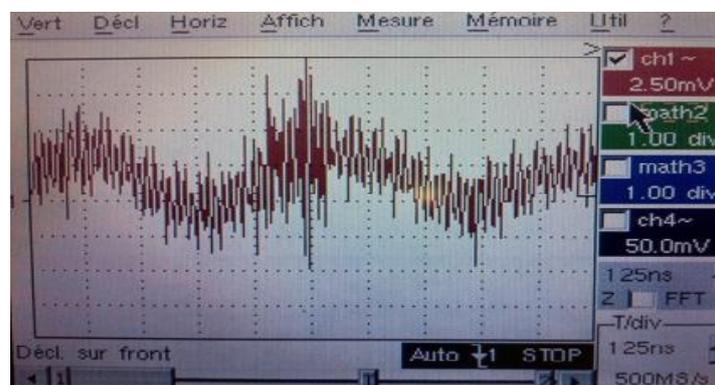


Figure (III.24) : tension à vide (à 219 tr.min^{-1} et de 1.8 A courant d'excitation).

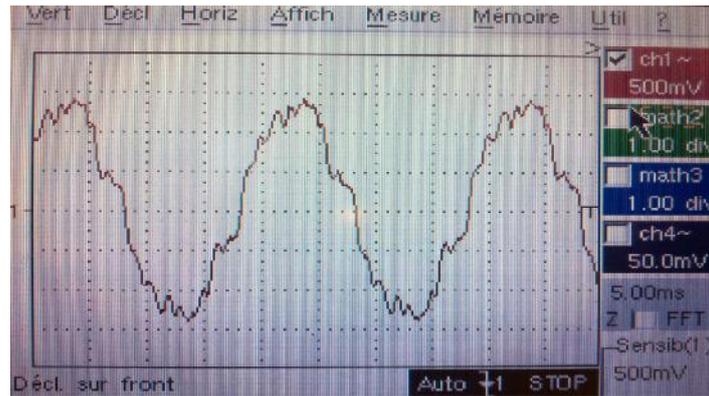


Figure (III.25) : tension à vide (à 219 tr.min^{-1} et de 1.8A courant d'excitation) avec zoom.

Nous avons remarqué sur l'oscilloscope une variation ce qui indique l'existence d'une tension très faible, cette tension n'a pas été purement sinusoïdale, mais elle prend la forme d'un sinusoïde. Ce résultat confirme un petit peu la validité de la concept de notre machine qui basé sur la concentration magnétique du champ par des pastilles supraconductrices.

III.4.Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes du test de la machine supraconductrice à flux axial. L'objectif principal de notre étude est de valider le fonctionnement de la machine et la structure de l'inducteur qui basée sur la concentration magnétique.

Nous avons présenté premièrement les tests à chaud, nous ont permis d'identifier les paramètres de la machine. Pour la suite, nous avons vu également les tests à froid. Ces tests sont repartis en deux parties. Nous avons présenté dans la première partie les tests à froid statique qui permettent de vérifier le fonctionnement de l'inducteur et de détecter les fuites des bains de refroidissement. Dans la deuxième partie nous sommes passés à les tests à froid dynamiques. Nous avons visualisé la tension à vide, les résultats obtenus confirment la validité de la machine.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les travaux menés dans le cadre de ce mémoire se sont articulés sur l'étude expérimentale d'une machine supraconductrice à structure axiale. La structure originale de cette machine est basée sur le principe de l'écrantage par l'utilisation des pastilles supraconductrices qui oriente le flux magnétique afin d'obtenir une variation spatiale du champ magnétique au niveau de l'entrefer. Le but principal de cette étude est de valider le concept de la concentration magnétique pour une structure axiale.

Dans la partie recherche bibliographique sur les matériaux supraconducteurs, nous avons pu apprendre et approfondir nos connaissances sur ce domaine. Ca nous a aussi permis de mettre en évidence les avantages et les intérêts de l'utilisation de ces matériaux dans le domaine des machines électriques tournantes. L'absence de la résistance permet de transporter le courant électrique sans dissipation et en fortes densités ce qui permet la création d'un fort champ magnétique au niveau de l'entrefer de la machine électrique.

L'étude théorique sur les machines à flux axial et à flux radial nous avons menée par la suite, nous a permis de constater que les structures axiales présentent un couple massique et volumique plus important que ce que nous avons pour les machines radiales conventionnelles. Cependant ces machines présentent une difficulté à la fois pour la modélisation et la réalisation.

Les expériences que nous avons réalisées sur la machine supraconductrice à flux axial disponible au niveau du laboratoire LESI nous ont permis d'acquérir une expérience sûre en pratique. En effet, nous avons-nous même pu approvisionner de l'azote liquide, modifier la structure initiale de la machine étudiée et réaliser les différents tests.

Dans cette partie, nous présentons les différentes étapes et les dates des tests effectués durant notre étude expérimentale, ainsi que l'état (résultat) de chaque test.

Tests	Date	L'état du test
Mesures des paramètres de l'inducteur	02/03/2017	Validé
Mesures des paramètres de l'induit	02/03/2017	Validé
Tests du système mécanique	09/03/2017	Validé
Mesure de la vitesse	19/03/2017	Validé
Tests l'inducteur avec courant d'excitation	21/03/2017	Validé
Tests de la pompe d'injection	26/03/2017	Ne pas valider (problème de la pompe)
Tests des bains de refroidissement	04/04/2017	Ne pas valider (problème de fuite)
Réalisation des nouveaux bains de refroidissement	10/04/2017	Validé
Placement des bains	11/04/2017	Validé
Test de l'effet de Meissner	16/04/2017	Validé
Tests des nouveaux bains de refroidissement	19/04/2017	Validé
Visualisation des tension	09/05/2017	Validé

Tab(A.1) : Différents étapes des tests effectués avec les dates et l'état de chaque test

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1].**Ben Mebark Fethi** "Modélisation des matériaux supraconducteurs, application à un limiteur du courant " , Mémoire magister de l'université Mohamed Khaider -Beskra 2014.

[2].**BOUZID MOHAMED** "Contribution à l'Étude des Câbles supraconducteurs" Mémoire magister de l'université Mohammed Boudiaf Oran

[3].**Abdenacer Guibadj**" Réalisation de multicouches pour supraconducteurs a haute température critique par méthode chimique". Universities Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français

[4].**Mohamed Lotfi KHENE**" Étude de l'aimantation dans les supraconducteurs" Thèse doctorat de l'université Mohamed- Khaider -Beskra 2015.

[5].**Bastien Dolisy**" Étude d'un moteur supraconducteur à flux axial avec une transmission magnétique supraconductrice intégrée" Thèse doctorat de l'université de Lorraine 2015

[6].**Rada ALHASAN** " Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur". Thèse doctorat de l'université de Lorraine 2015.

[7].**OULDBIH Talha** "Méthode simplifiée pour l'étude des systèmes de lévitation à base de supraconducteur HTc Mémoire magister de l'université Mohamed Khaider - Biskra 2012

[8].**El Hadj AILAM** "Machine synchrone à plots supraconducteurs, Étude et réalisation" Thèse doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I. 2006

[9].<http://www.in2p3.fr/>.pdf

[10].**Henri Godfrin** "Cryogenic Fluids" European Advanced Cryogenics School– Chichilianne 2011.

[11]. **Michael G. Zabetakis, Ph.D** " SAFETY WITH CRYOGENIC FLUIDS " Bureau of Mines U.S. Department of the Interior Pittsburgh, Pennsylvania (livre).

[12].**Abderrezak Rezzoug, Jean-Paul Caron, Jean LEVÊQUE, Denis Netter, Bruno Douine, Kévin Berger, El Hadj Ailam** " les supraconducteurs : des propriétés aux applications électrotechniques supraconductrices" : des Gif-sur-Yvette, France. 2003.

[13]. **Meghatria sofiane, ouzougou abderrahmane** "Conception et réalisation d'un induit triphasé d'une machine axiale supraconductrice", université de khmis miliana 2014/2015.

[14].**Sofiane BENDALI** "Dimensionnement d'un moteur supraconducteur HTc" Université de lorraine 2012.

[15]. <http://www.technobio.fr>.

[16].**Charles-Henri Bonnard, Frédéric Sirois, Gaetan Didier, Bruno Douine, Jean Leveque** " Limiteur de courant de court-circuit supraconducteur résistif : prémices d'un modèle circuit multi-échelle", Université de Lorraine, 2015.

[17]. <http://meteosat.pessac.free.fr/pdf> " les machines synchrone"

[18].**Sami HLIOUI** "Étude d'une machine synchrone a double excitation Contribution a la mise en place d'une plate-forme de logiciels en vue d'un dimensionnement optimal", Thèse de Doctorat, l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'université de Besançon École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechnique, 2008.

[19]. **LATRECHE Mohammed Tahar** "Commande floue de la Machine synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de Sétif 2012.

[20].**Jérôme LEGRANGER** " Contribution à l'étude des machines brushless à haut rendement dans les applications de moteurs-générateurs embarqués", Thèse doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne.2009.

[21].**BOUKAIS Boussad** " Contribution a la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines a aiment permanent (BDCM-PMSM)".Thèse doctorat, université mouloud mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.

[22]. **Olivier De La Barriere** "Modèles analytiques électromagnétiques bi et tri dimensionnels en vue de l'optimisation des actionneurs disques : étude théorique et expérimentale des pertes magnétiques dans les matériaux granulaires", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2010.

[23]. **J. Santiago, H. Bernhoff** " Comparison between axial and radial flux PM coreless machines for flywheel energy storage", division for electricity, dep. of eng. Sciences, uppsala University, 2010.

[24]. **Pul LETELLIER** "les machine à aimant permanent de grandes puissances dans les systèmes de propulsion électrique", le navire tout électrique.

[25]. **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 , université des sciences et de la technologie d'Oran, 2015.

[26]. **Yicheng Chen, Pragasen Pillay, fellow, IEEE, and Azeem Khan, Student Member** " PM Wind Generator Topologies ", IEEE transactions on industry applications, vol. 41, no. 6, November/December 2005.

[27]. **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.

[28]. **Aydin, M., S. Huang, T.A. Lipo** " Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review ", Research Report, University of Wisconsin-Madison, 2004.

[29]. **Dean J Patterson, Jessica L Colton, Brad Mularcik, Byron J Kennedy, Steven Camilleri, Rafal Rohoza** " A Comparison of Radial and Axial Flux Structures in Electrical Machines", Electrical Engineering Department University of Nebraska, Lincoln, NE 68588-0511, USA.

[30]. **MOHAMMED BOUSSETOUA** " Contribution à l'étude et à la conception d'une machine synchrone à flux transverse destinée au dégivrage d'aéronefs en cours de vol", Thèse doctorat de l'Université du QUEBEC A CHICOUTIMI, 2012.

[31]. **Huguette TIEGNA** " Contribution à la modélisation analytique des machines synchrones à flux axial à aimants permanents à attaque directe en vue de leur dimensionnement. Application aux éoliennes".Thèse doctorat de l'université de HAVRE.2013.

[32]. **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

[33]. **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

[34].**Electric Energy Magazine No. 4** " DESIGN OF ELECTRIC MACHINES: Axial Flux Machines", Faculty of engineering-Electric Energy Group, 2013.

[35]. **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.

[36]. www.techniques-ingenieur.fr.

[37]. **W. BAHLOUL, M. OUALI, M. CHAABENE and M.B.A KAMOUN** "Identification des paramètres dynamiques de la machine synchrone par algorithme génétique", international Renewable Energy Congress, novembre 5-7, 2009 - Sousse Tunisia.