

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



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

Réf:.....

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

**MASTER**

*Thème*

**Etude des machines supraconductrices**

Présenté par :  
Taibi Nasserredine  
Soutenu le : 05 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr Rezig Mohamed

(MAA)

Président

Mr Alloui Lotfi

(MCA)

Encadreur

Mr Khene Mohamed Lotfi

(MAA)

Examineur

**Année universitaire : 2013 / 2014**

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



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

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

**MASTER**

*Thème*

**Etude des machines supraconductrices**

**Présenté par :**

**Taibi nasserreddine**

**Avis favorable de l'encadreur :**

**Alloui Lotfi**

.

**Avis favorable du Président du Jury**

**Rezig Mohamed**

**Cachet et signature**

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



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

## *Thème :*

# **Etude des machines supraconductrices**

**Proposé par : Taibi Nasserredine**

**Dirigé par : Alloui Lotfi**

## **RESUMES**

Ce travail est une contribution d'étude et de modélisation des comportements magnétodynamique dans les machines électriques à partir de l'utilisation des matériaux supraconducteurs, cette dernier subit un champ magnétique pulsé, Ces résultats sont obtenues à partir d'un code numérique bidimensionnelle développe et implémente cet environnement FEMM et Flux-2D.

## **تلخيص**

يقدم هذا العمل إسهام في دراسة التغير المغناطيسي لدى الماكينات الكهربائية و هذا في استعمال المواد ذات الناقلية الممتازة للحصول على حقل مغناطيسي كبير, و يتم الحصول على هذه النتائج . من برنامجين ثنائيي البعد FEMM, Flux-2D.

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces années d'études.

Cette thèse doit beaucoup aux nombreuses personnes qui m'ont encouragé, soutenu et conforté au long de cette année. Qu'elles trouvent dans ce travail l'expression de mes plus sincères remerciements.

Je souhaite renouveler mes remerciements à mon encadreur, Alloui Lotfi pour avoir proposé, accepté et encadré cette thèse, qui a fourni des conseils judicieux et qui a largement contribué à la réalisation et à l'achèvement de ce travail ; pour sa disponibilité à comprendre et à communiquer ; il a été pour moi un intermédiaire d'une aide à la fois précieuse et fructueuse en me facilitant l'accès à des documents ; pour la confiance qu'il m'a témoigné du début à la fin du travail, Sincèrement, grâce à lui j'ai pu apprendre beaucoup de choses dont certaines fortes utiles pour mes travaux académiques bien sûr, mais aussi des choses importantes pour mon développement personnel ; sans lui, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Une attention particulière va à l'équipe de laboratoire de Génie électrique pour son aide précieuse, incessante et infinie de soins, d'appui et d'encouragements.

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je tiens tout particulièrement à remercier tous les enseignants de génie électrique à l'université de Biskra et tout le personnel administratif.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, collègues et amis, qui m'ont toujours soutenus et encouragé au cours de la réalisation de la thèse.

*Merci...*

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I :

Figure I.1. Le développement de supraconducteur .....	3
Figure I.2. Caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type I.....	4
Figure I.3. Caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type II.....	5
Figure I.4. Diamagnétisme parfait des supraconducteurs.....	6
Figure I.5. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur: l'effet Meissner.....	8
Figure I.6. Diagramme des phases d'un supraconducteur.....	9
Figure I.7. Répartition du champ magnétique et du courant à l'intérieur du supraconducteur après la disparition du champ extérieur.....	12
Figure I.8. Rotor d'une machine à reluctance variable supraconductrice.....	17

## Chapitre II :

Figure. II.1. Lignes de champs dans un rotor de moteur synchro-réductant .....	24
Figure. II.2. Lignes de champ dans le rotor d'un moteur synchroréductant amélioré par deux écrans supraconducteurs .....	24
Figure. II.3. Moteur synchrone 5MW d'American Superconductor (AMSC) .....	26
Figure. II.4. Illustration de la coupe d'un moteur synchrone supraconducteur de 15kW par Kyushu .....	26
Figure. II.5. Moteur 400kW de Siemens 2002 (à gauche) et stator du moteur 36.5MW 2009 d'American Superconductor (à droite) .....	27
Figure. II.6. Moteur synchrone à flux axial de 22kW par IHI .....	28
Figure. II.7. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5kW par IHI .....	29
Figure. II.8. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs, IHI (gauche) et DEE University of Lisbonne .....	30
Figure. II.9. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs ..	31
Figure. II.10. Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, principe .....	32
Figure. II.11. Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, 15kW 750tr/min et 150kW 400tr/min.....	32
Figure. II.12. Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents et flux axial, 400kW-250tr/min.....	33
Figure. II.13. Moteur synchrone supraconducteur homopolaire, 91-125kW-11700tr/min.....	34
Figure. II.14. Moteur asynchrone supraconducteur, couple en fonction du glissement .....	35
Figure. II.15. Moteur asynchrone supraconducteur, 1.3kW-1800tr/min).....	35

Figure. II.16. Tests RIG.....	36
Figure. II.17. Coupe du moteur synchrone supraconducteur à griffe de Central Japan Railway Compagny.....	37
Figure. II.18. Vue éclatée de l'inducteur à griffe, Sumitomo.....	37
Figure. II.19. Moteur supraconducteur griffe 13.6kW-500tr/min Central Japan Railway Compagny .....	38
Figure. II.20. Moteur supraconducteur griffe, 18kW-4500tr/min, Sumitomo.....	38
Figure. II.21. Voiture électrique supraconductrice.....	39
Figure. II.22. Structure de l'inducteur.....	39
Figure. II.23. Inducteur supraconducteur réalisé.....	40
Figure. II.24. Moteur supraconducteur à concentration de flux, 20kW-750tr/min.....	41
Figure. II.25. Bilan des structures de machines supraconductrices réalisées.....	42

### Chapitre III :

Figure .III.1 : Modèle de Bean.....	43
Figure. III.2. Modèle de Flux Flow et Creep.....	45
Figure. III.3. Maillage du domaine d'étude en volume finis.....	52
Figure. III.4. Volume Elémentaire.....	52
Figure. III. 5. Aires des trapèzes.....	54

### Chapitre IV :

Figure IV.1. La variation de la densité du flux dans un model sans insertion des matériaux supraconducteurs dans la machine .....	57
Figure IV.2. Géométrie de la pastille supraconductrice utilisée pour écrantage .....	58
Figure IV.3. Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine doté de SHTc pour $\theta = 30^\circ$ et pour $\sigma = 1014 \text{ S.m-1}$ , $1015 \text{ S.m-1}$ , $1016 \text{ S.m-1}$ .....	60
Figure IV.4. Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine doté de SHTc pour $\theta = 50^\circ$ et pour $\sigma = 1014 \text{ S.m-1}$ , $1015 \text{ S.m-1}$ , $1016 \text{ S.m-1}$ .....	61
Figure IV.5. La variation da la densité du flux dans le model avec insertion des matériaux supraconducteurs dans la machine pour $\sigma=1016 \text{ S.m-1}$ .....	62
Figure IV.6. Comparaison entre la machine sans (a) et avec (b) SHTc .....	63
Figure IV.7. Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine n'ayant pas de SHTc et la machine doté de SHTc respectivement.....	65
Figure IV.8. Variation temporelle du flux magnétique rotorique de la machine n'ayant pas de SHTc et la machine doté de SHTc respectivement.....	66
Figure IV.9. Variation temporelle de l'énergie stockée dans le rotor de la machine n'ayant pas de SHTc et la machine doté de SHTc respectivement .....	66

# LISTE DES ABREVIATIONS

E: Champ électrique.

K : Constant de Boltzmann.

$\Theta$  : Température.

$\rho_c$  : Résistivité de Flux Creep.

$U_0$  : Potentiel de profondeur.

$\rho_f$ : Résistivité de Flux Flow.

$\rho$  : Densité de charge électrique.

n : Raideur de transition.

B: Champ magnétique.

A : Potentiel vecteur magnétique.

M : Inductance mutuelle.

D: Vecteur de déplacement électrique.

H: Intensité de champ magnétique.

$\mu_r$ : La perméabilité relative du milieu.

$\mu_0$ : La perméabilité vide.

$\mu$  : Perméabilité magnétique.

$\Phi_m$  : potentiel magnétique scalaire.

B: Champ magnétique.

K: Vecteur densité de courant surfacique.

A : Potentiel vecteur magnétique.

M : Inductance mutuelle.

D: Vecteur de déplacement électrique.

H: Intensité de champ magnétique.

$\sigma$  : la conductivité électrique.

$\nu$  : Réductivité magnétique.

$J_c$  : Densité électrique critique.

$E_c$ : Champ électrique critique.

$\varepsilon$ : Force magnétomotrice.

# SOMMAIRE

Introduction générale

## **Chapitre I : Généralité sur les matériaux supraconducteurs**

I.1. Introduction.....	1
I.2. Histoire des supraconducteurs .....	1
I.3. Définition des supraconducteurs.....	3
I.4. Définition de la supraconductivité .....	3
I.5. Types de supraconducteurs .....	3
I.5.1. Supraconducteurs de type I .....	4
I.5.2. Supraconducteurs de type II.....	4
I.6. Propriétés des supraconducteurs .....	5
I.6.1. La supraconductivité .....	5
I.6.2. propriétés générales.....	6
I.7. Effet MEISSNER, supraconducteur et conducteur parfait .....	6
I.8. Diagramme des phases d'un supraconducteur .....	9
I.9. Applications des supraconducteurs en électrotechnique.....	9
I.9.1. Les lignes de transport.....	10
I.9.2. Les transformateurs .....	10
I.9.3. Les limiteurs du courant.....	11
I.9.4. Les systèmes de stockage de l'énergie .....	11
I.9.5. Les aimants permanents supraconducteurs .....	12
I.10. Les machines supraconductrices.....	13
I.10.1. Historique :.....	13
I.11. Intérêts d'utiliser les supraconducteurs dans les machines électriques .....	17
I-12- Conclusion.....	18

## **Chapitre II : Etude des machines supraconductrices**

II.1. Introduction .....	19
II.2. Principe de fonctionnement d'une machine .....	19
II.3. Constitution d'une machine.....	20
II.3.1. Stator .....	20
II.3.2. Rotor bobiné.....	21

II.3.3. Rotor à cage .....	21
II.3.4. Vues en coupe .....	22
II.4. Les machines supraconductrices .....	23
II.4.1. Les machines classiques « cuivre - supraconducteur ».....	23
II.4.2. Amélioration des machines à réluctance variable.....	23
II.5. Machines synchrones.....	25
II.5.1. Moteur Synchrone à pôles saillants .....	25
II.5.2. Moteur synchrone à flux axial .....	27
II.5.3. Moteur synchrone à aimants permanents.....	31
II.6. Moteur homopolaire .....	33
II.7. Moteur asynchrone .....	34
II.8. Moteur à courant continu.....	36
II.9. Machines spéciales .....	36
II.9.1. Moteur à griffe .....	36
II.9.2. Moteur à concentration de flux .....	39
II.10. Répartition des moteurs supraconducteurs .....	41
II-11- Conclusion .....	42

### **Chapitre III : Formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques**

III.1. Introduction .....	43
III.2. Modèles de supraconducteurs .....	43
III.2.1 Modèle de Bean .....	43
III.2. 2 Modèle de Flux Flow et Flux Creep.....	44
III. 2. 3 Modèle de la loi en puissance $E - J$ .....	45
III. 3. Équation de Maxwell. ....	46
III. 4. Formulation des Équations électromagnétiques.....	47
III. 4.1 Modèle électrostatique.....	47
II.4.2. Le modèle électrocinétique .....	48
III. 4.3. Modèle magnétostatique.....	48
III. 4.4. Modèle Magnétodynamique .....	50
III. 5. Différents méthode de résolution des équations aux dérivées partielles.....	51
III. 5. 1. Méthode des Différences Finis (MDF).....	51
III. 5. 2. Méthode des Eléments Finis (MEF).....	51
III. 5.3. Méthode des circuits couplés (MCC) .....	51
III. 5. 4 Méthode des volumes finis (MVF).....	52
III. 6. Méthodes numériques de résolution.....	53
III. 6. 1. La méthode d'Euler .....	53

III. 6. 2. La méthode de Gauss-Seidel .....	53
III. 6. 3 Formule des trapèzes .....	54
III.7.Logiciels utilisés.....	55
III.7.1. Présentation du logiciel FEMM.....	55
III.7.2. Logiciel Flux.....	56
III.9.Conclusion.....	56

## **Chapitre IV : Applications et validations**

IV.1. Introduction : .....	57
IV.2. Résultats et simulations : .....	57
IV.2.1. Résultats des simulations obtenus à partir de FEMM : .....	58
IV.2.1.a. Model de la machine sans SHTc : .....	58
IV.2.1.b. Model de la machine avec SHTc : .....	59
IV.2.2. Résultats des simulations obtenus à partir du Flux 2D : .....	65
IV.3. Conclusion : .....	68

Conclusion générale

Bibliographie

### **Introduction général**

La supraconductivité a été découverte en 1911 par le physicien hollandais Heike Kamerling Onnes après la liquéfaction de l'hélium, il a observé qu'un échantillon de mercure perd toute sa résistance électrique lorsqu'il est refroidi en dessous de  $-269^{\circ}\text{C}$ , cette température est appelée température critique ( $T_c$ ).

Les supraconducteurs se distinguent à partir de leur température critique. En dessous de 30 K, ce sont les basses températures critiques (LTS pour Low Temperature Superconductors) alors qu'au delà ce sont les hautes température critiques (HTS pour High Temperature Superconductors). Les HTS sont de type II.

Les propriétés exceptionnelles de ces matériaux peuvent être utilisées dans les projets électrotechnique est très intéressante pour les fortes puissances et de nombreuses applications telles que les limiteurs de courant, le stockage d'énergie, les lignes de transport, les aimants, les transformateurs et les machines tournantes.

L'utilisation des matériaux supraconducteurs dans les machines a commencé au milieu des années 60, avec comme première réalisation, un alternateur entièrement supraconducteur par l'USA Air Force en 1967, Après ces premiers progrès, les chercheurs se sont intéressés. De plus en plus à ce domaine.

Dans le cadre de notre travail nous présentons une étude théorique sur les machines supraconductrices.

Notre travail sera organisé, dans la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur la supraconductivité, la découverte et la définition, quelque application des matériaux supraconducteurs dans le domaine électrotechnique, ainsi que les différents types des supraconducteurs.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'étude des moteurs supraconducteurs. Nous rappelons les étapes principales du développement de la machine supraconductrice et les différents types.

Dans le troisième chapitre, nous présentons quelques modèles des supraconducteurs et les lois fondamentales de l'électromagnétisme (nous sommes intéressés en particulier aux équations de Maxwell), ainsi que les différentes méthodes

## Introduction général

---

de résolution des équations aux dérivées partielles et les méthodes numériques de résolution.

Dans le dernier chapitre, nous exposerons l'ensemble des résultats obtenus à partir du code numérique développé et implémenté sous l'environnement FEMM et Flux-2D. Les résultats à caractère magnétiques seront largement présentés.

## I.1. Introduction

Ce chapitre est réservé aux différents aspects liés à la conception de la machine supraconductrice en commençant par une rappelle sur l'histoire de la supraconductivité et des définitions des supraconducteurs de type I et de type II puis la citation de quelques applications des supraconducteurs dans le domaine de l'électrotechnique en finalisant avec les intérêts des supraconducteurs dans les machines électriques.

## I.2. Histoire des supraconducteurs

Le phénomène fut découvert en 1911 par un étudiant en physique, Gilles Holst, étudiant sous la direction du physicien néerlandais Kamerlingh Onnes (ce dernier s'étant par la suite approprié cette découverte). Kamerlingh Onnes aurait demandé à son étudiant de surveiller une expérience qu'ils étaient en train de mener sur les propriétés du mercure à très basse température (le domaine d'étude de prédilection de Kamerlingh Onnes). Or, l'étudiant laissa le protocole expérimental s'emballer, et atteindre par hasard des températures que le système ne devait pas atteindre. Cette erreur fut néanmoins fructueuse, puisque Gilles Holst et Kamerlingh Onnes montrèrent que la résistivité électrique (ou résistance électrique) du mercure devient non mesurable en dessous d'une certaine température appelée température critique  $T_c$ . Le terme non mesurable signifie ici que la résistance électrique du mercure chute de façon brutale au-dessous de  $T_c$ , de sorte que l'on ne peut plus la définir de façon conventionnelle. Pour cette découverte, Kamerlingh Onnes a reçu le prix Nobel de physique en 1913.

Des expériences avec de nombreux autres éléments montrèrent que certains possédaient des facultés de supraconductivité, mais d'autres non : Citons en 1913, le plomb à 7K et en 1941, le nitrure de niobium à 16K.

En 1933, Meissner et Ochsenfeld découvrent que les supraconducteurs repoussent le champ magnétique, un phénomène connu sous l'appellation d'effet Meissner.

En 1935, les frères Fritz et Heinz London ont montré que l'effet Meissner est une conséquence de la minimisation de l'énergie libre transportée par le courant supraconducteur. En 1950, une théorie phénoménologique dite de Ginzburg-Landau fut élaborée par Landau et Ginzburg. Cette théorie a été un succès pour expliquer les propriétés macroscopiques des supraconducteurs en utilisant l'équation de Schrödinger. En particulier, Abrikosov montra qu'avec cette théorie on peut prévoir qu'il existe deux catégories de supraconducteurs (appelés type I ou type II). Abrikosov et Ginzburg ont reçu le prix Nobel 2003 pour ce travail (Landau étant décédé en 1968). C'est en 1950 que l'on constate que la température critique dépend de la masse isotopique. Une théorie complète de la supraconductivité fut proposée en 1957 par Bardeen, Cooper et

Schrieffer. Connue sous l'appellation de leurs initiales théorie BCS, elle explique la supraconductivité par la formation de paire d'électrons (paires de Cooper) formant alors des bosons interagissent avec des photons. Pour leur travail, les auteurs eurent le prix Nobel de physique en 1972.

En 1959 Gorkov montra que la théorie BCS se ramène à la théorie de Ginzburg-Landau au voisinage de la température critique d'apparition de la supraconductivité.

En 1962 les premiers fils supraconducteurs (un alliage de niobium-titane) sont commercialisés par Westinghouse. La même année, Josephson prévoit théoriquement qu'un courant peut circuler à travers un isolant mince séparant deux supraconducteurs, ce phénomène qui porte son nom : l'effet Josephson, est utilisé dans les SQUIDS. Ces dispositifs servent à faire des mesures très précises d' $h/e$ , et combiné avec l'effet Hall quantique, à la mesure de la constante de Planck  $h$ . Josephson a reçu le prix Nobel 1973.

En 1986 Bednorz et Muller ont découvert une supraconductivité à une température de 35K dans des matériaux de structure provskite de cuivre à base de lanthane (Prix Nobel de physique, 1987). Très rapidement en remplaçant le lanthane par de l'yttrium, i.e. en produisant de l' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , la température critique est montrée à 92K, dépassant la température de l'azote liquide qui est de 77k. Cela est très important car l'azote liquide est produit industriellement à bas prix et peut même être produit localement. Beaucoup de cuprates supraconducteurs ont été produit par la suite et les mécanismes de cette supraconductivité sont encore à découvrir.

Malheureusement, ces matériaux sont des céramiques et ne peuvent être travaillés aisément. De plus, ils perdent facilement leur supraconductivité à fort champ et donc les applications se font attendre. Les recherches se poursuivent pour diminuer la sensibilité aux champs et pour augmenter la température critique. Après la température de l'azote liquide, atteinte, le seuil psychologique et économique est la glace carbonique ( $-78,5^\circ\text{C}$ ). D'autres composés virent le jour, citons par exemple les familles de supraconducteurs au bismuth ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2(n+2)+\delta}$  avec  $n=1, 2$  ou  $3$ ), au thallium ( $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ) ou au mercure dont le composé  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  détient actuellement le record avec température critique de 133K à 164K selon les pressions appliquées.

En 2006, le premier indice que le système supraconducteur existence probable de nouveaux lorsque trois indépendants proto-composés ont montré une petite résistance 'blip' autour de 160K. les seuls éléments qui sont communs à ces trois matériaux ont été Sn, Ba, Ca, Cu et O. par essai-erreur, que 160K matériel a finalement été identifié sur octobre 4, 2008, comme étant  $\text{Sn}_3\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Cu}_7\text{O}_y$  (voir ci-dessous à gauche) avec la structure 5212/1212 C (voir ci-dessous à droite) [1].

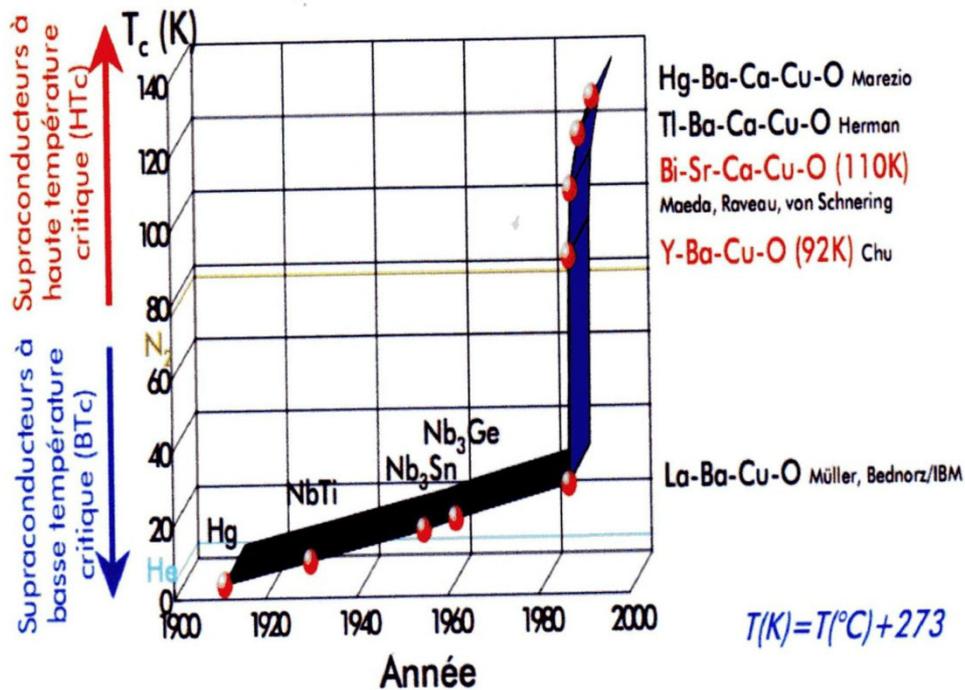


Figure I.1. Le développement de supraconducteur [1].

### I.3. Définition des supraconducteurs

Les supraconducteurs sont des matériaux ont des propriétés électriques et magnétiques assez remarquables. La propriété la plus connue, est celle qui donne la disparition totale de toute résistivité en dessous d'une certaine température critique  $T_c$ . Une autre propriété est le diamagnétisme parfait de ces matériaux de tel façon ces derniers expulsent totalement le champ magnétique de leur volume dans certaines conditions précises du champ [1].

### I.4. Définition de la supraconductivité

La supraconductivité est un phénomène survenant dans certains matériaux dits supraconducteurs. Il est caractérisé par l'absence de résistance électrique et l'annulation du champ magnétique à l'intérieur du matériau (effet Meissner). La supraconductivité conventionnelle se manifeste à des températures très basses, proches du zéro absolu ( $-273,15^{\circ}C$ ) [1].

### I.5. Types de supraconducteurs

Pour qu'un matériau soit supraconducteur il faut que les trois paramètres, température  $T$ , densité de courant  $J$  et champ magnétique  $H$  soient inférieurs à ses paramètres critiques  $T_c$ ,  $J_c$  et  $H_c$ . Cependant tous les supraconducteurs n'ont pas le même comportement en présence d'un champ magnétique, on distingue les supraconducteurs de type I et les supraconducteurs de type II [2].

### I.5.1. Supraconducteurs de type I

Ils ne possèdent qu'un seul champ critique  $H_c$ . Le champ magnétique pénètre sur une épaisseur appelée Longueur de pénétration de London dans laquelle se développent des super-courants.

Le comportement de ce type de supraconducteurs est simple car il n'existe que deux états. L'état normal correspond à une valeur élevée de la résistance du matériau et l'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme presque parfait. Dans la figure I.2, la caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur du type I est présentée. Les supraconducteurs de type I n'ont aucune application industrielle à l'heure actuelle [2].

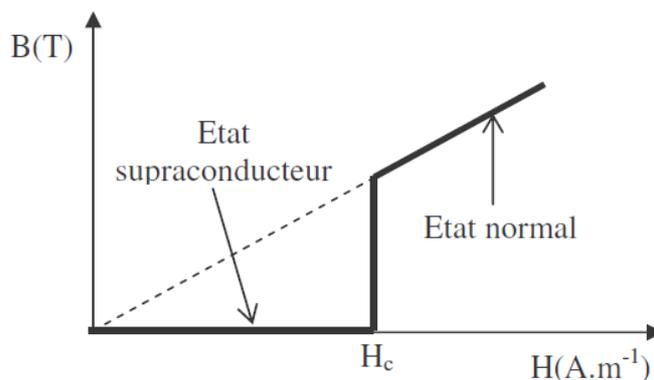


Figure I.2. Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type I [2].

### I.5.2. Supraconducteurs de type II

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

Le comportement d'un supraconducteur du type II en présence d'un champ magnétique est décrit sur la figure I.3. On distingue trois zones différentes :

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

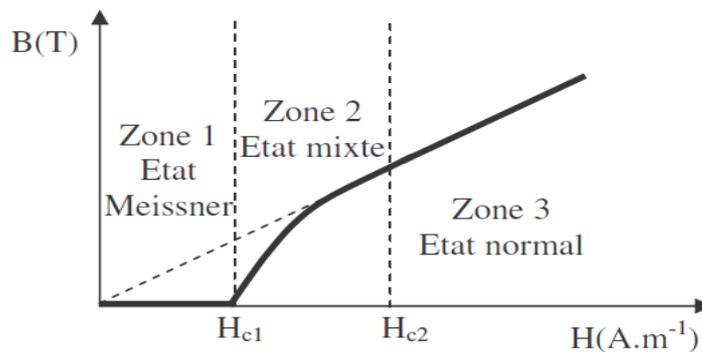


Figure I.3. Caractéristique  $B(H)$  d'un supraconducteur de type II [2].

Entre les deux champs  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$  le champ extérieur pénètre donc le matériau supraconducteur, cette pénétration du champ s'effectue sous la forme de fins tubes microscopiques dénommés vortex. Ils sont tous caractérisés par exactement le même flux magnétique. Le quantum de flux ou fluxoïde, noté  $\phi_0$  est de  $2,07 \cdot 10^{-15}$  Wb.

Un vortex consiste en un cœur à l'état normal qui véhicule le champ magnétique, entouré par une région supraconductrice au sein de laquelle circule un super-courant qui confine le champ dans le cœur du vortex.

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

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

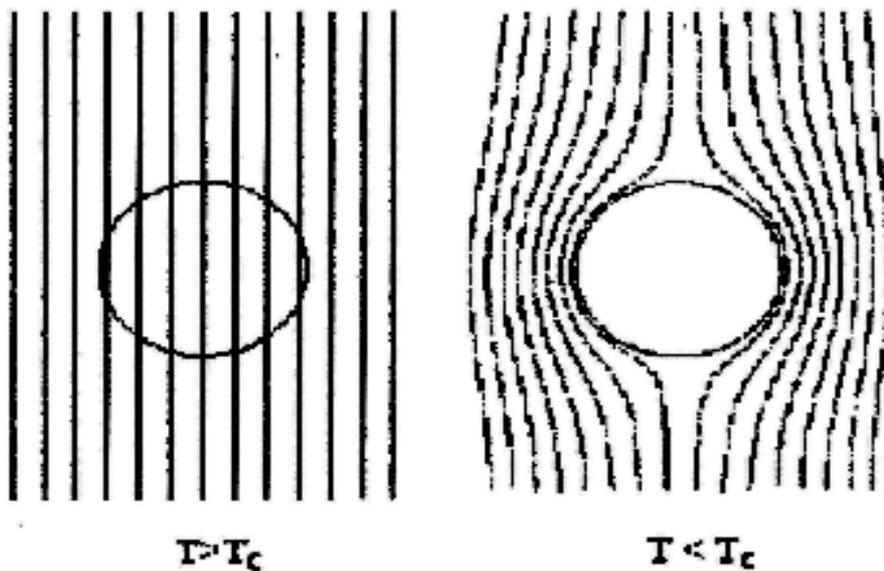
## I.6. Propriétés des supraconducteurs

### I.6.1. La supraconductivité

Dans cette partie nous présentons la supraconductivité. Elle est caractérisée par certaines propriétés et grandeurs critiques, que l'on retrouve dans tous les types des matériaux supraconducteurs [1].

### I.6.2. propriétés générales

La supraconductivité, qui n'apparaît qu'en dessous d'une certaine température critique et d'un certain champ magnétique appliqué, est caractérisée quelques propriétés spécifiques tel que la température critique  $T_c = -25^\circ\text{C}$ , L'absence de résistivité ( $<10 \text{ m}\Omega$ ) en courant continu, est le phénomène le plus intéressant pour ce qui concerne le transport de l'énergie électrique. Le diamagnétisme parfait est un autre aspect important. Quand un échantillon supraconducteur est refroidi en dessous de sa température critique puis placé dans un champ magnétique, celui-ci est éjecté de l'échantillon (figure I-4). La susceptibilité dans l'échantillon est égale a -1 (diamagnétique parfait). C'est l'effet Meissner. C'est l'apparition de courant supraconducteur de surface qui empêche le champ magnétique de pénétrer à l'intérieur du matériau [1].



Figure

I.4. Diamagnétisme parfait des supraconducteurs [1].

### I.7. Effet MEISSNER, supraconducteur et conducteur parfait

La conductivité parfaite ( $R=0$ ) implique qu'un changement de l'induction magnétique dans le matériau n'est pas possible  $dB/dt = 0$ , ainsi, lorsqu'un conducteur parfait, sous champ nul à température ambiante, est refroidi en dessous de  $T_c$  puis soumis à un champ magnétique, alors des courants d'écrantage vont être induits pour conservé  $B=0$  à l'intérieur du matériau voir figure I.5(a). Si au contraire, le conducteur parfait est soumis à un champ magnétique avant être refroidi, alors, lorsque le champ extérieur est ramener a zéro,  $dB/dt=0$  doit être conservé et des courants de piégeage seront induits pour piéger l'induction magnétique à l'extérieur voir figure I.5(b). Il en va tout à fait différemment dans le cas supraconducteur [3]:

- Dans le première cas, quand le champ magnétique est appliqué après refroidissement le conducteur parfait et le supraconducteur se comportent de manière identique car l'induction magnétique est toujours nulle dans le matériau voir figure I.5(a).
- Dans le second cas, l'induction magnétique est expulsée de l'intérieur du supraconducteur ( $B=0$ ) dès qu'il est refroidit en dessous de sa température critique voir figure I.5 ©.

Ce comportement est connu sous le nom l'effet Meissner, il s'agit de l'expulsion de tout induction magnétique de l'intérieur du supraconducteur, qu'elle soit la avant que le spécimen soit devenu supraconducteur ou pas. Le diamagnétisme parfait est une propriété intrinsèque d'un supraconducteur, qui n'est cependant valable que si la température et le champ magnétique sont en tout points inférieurs à leur valeur critique  $T < T_c$ ,  $H < H_c$ .

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

(b) Un conducteur parfait piège le flux magnétique appliquée avant refroidissement  $B = dB/dt = 0$ .

(c) Le flux magnétique est toujours exclu par un conducteur en dessous de  $T_c$ , qu'un champ magnétique soit appliqué avant refroidissement ou non,  $B=0$ .

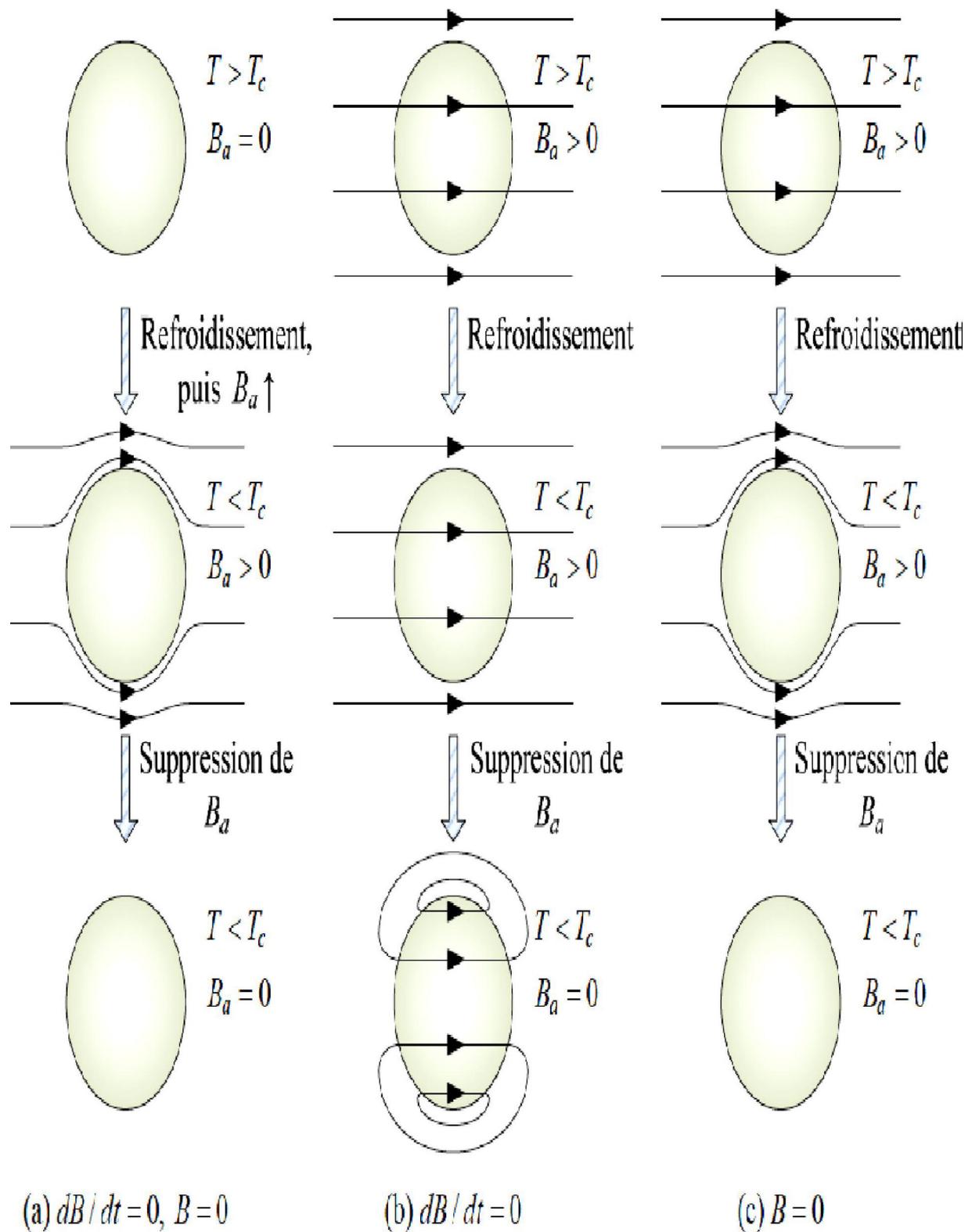


Figure I.5. Différence entre un conducteur parfait et un supraconducteur: l'effet Meissne [3].

### I.8. Diagramme des phases d'un supraconducteur

Toutes les caractéristiques précédentes sont cependant détruites quand la température du supraconducteur dépasse ( $T_C$ ) ou quand le champ magnétique critique dépendant de la température  $H_C(T)$ , il existe en pratique un autre paramètre important, la densité de courant critique ( $J_C$ ) qui définit la transition vers un état normal et dissipatif. Ces grandeurs critiques sont toutes reliées et forment une surface dans le repère.

On regroupe les quatre grandeurs critiques des supraconducteurs précédant, nous obtenons le diagramme de phase d'un supraconducteur suivant [1]:

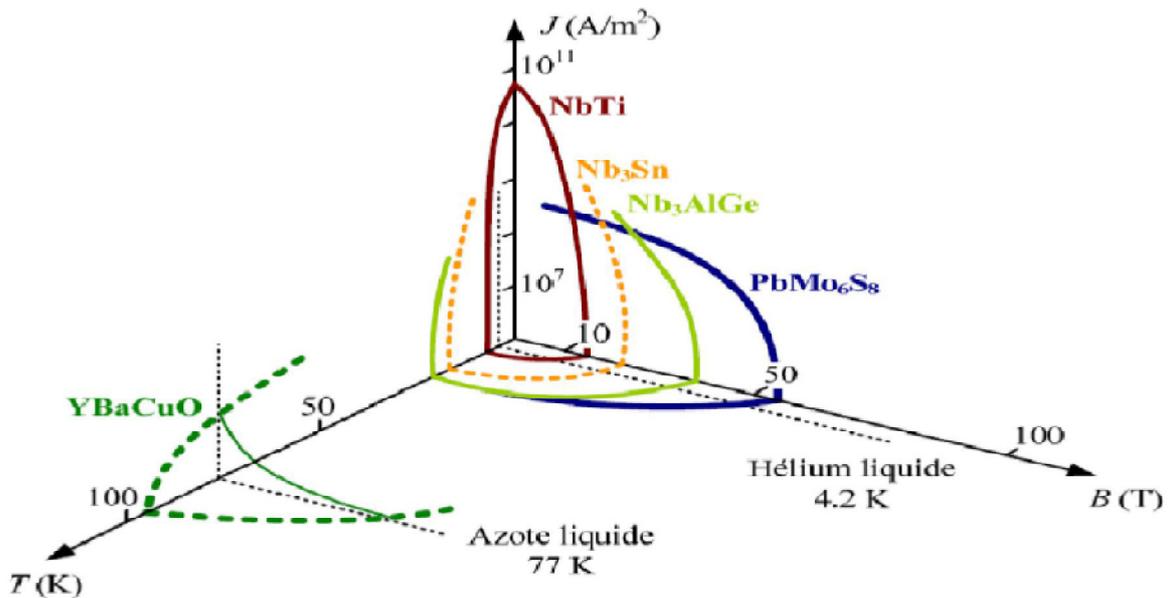


Figure I.6. Diagramme des phases d'un supraconducteur.

### I.9. Applications des supraconducteurs en électrotechnique

On distingue trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique suivant la valeur utile de l'induction magnétique générée par le bobinage supraconducteur :

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

La découverte en 1986 des supraconducteurs à haute température critique a encouragé l'application des supraconducteurs en électrotechnique. Ce changement est dû à la capacité de ces matériaux à conduire du courant électrique de très forte densité pour des températures assez élevées par rapport aux supraconducteurs à basse température critique.

Nous présentons ci-dessous quelques applications majeures des supraconducteurs en électrotechnique. Pour les machines tournantes supraconductrices nous consacrerons un paragraphe plus important par la suite [2].

### **I.9.1. Les lignes de transport**

Les câbles supraconducteurs de transport intéressent de plus en plus les chercheurs et les industriels. En effet, avec ce type de lignes, on peut augmenter la puissance transmise avec des niveaux de tensions faibles par rapport à ceux permis par les lignes conventionnelles.

Le paramètre le plus compliqué à réaliser dans ce type de lignes est l'isolation diélectrique. Cette isolation, qui est un paramètre important en haute tension, devient difficile à réaliser en milieu cryogénique. Au Japon, la compagnie Furukawa Electric a installé en mars 2004 un câble, refroidi à l'azote, de 500 m de longueur, de 77 kV et 1 kA dans le réseau électrique pour le tester pendant une année. Un autre projet ambitieux de câble supraconducteur est à sa phase finale, il concerne la réalisation d'une ligne de 610 m, 138 kV et 2,4 kA. Ce projet entre dans le cadre d'une coopération entre Nexans et ASC.

La plupart des études effectuées sur les câbles supraconducteurs de transport concernent des tensions alternatives, qui entraînent des pertes dans le supraconducteur. Le transport en continu a aussi été étudié. Pour les deux cas, continu et alternatif, les performances par rapport aux câbles conventionnels sont meilleures. Les pertes peuvent être réduites de moitié en utilisant un câble de transport supraconducteur pour la même puissance transitée.

En Chine, un programme ambitieux concerne l'introduction de lignes supraconductrices pour le réseau de transport Est-Ouest. Actuellement, une ligne en supraconducteur à haute température critique de 33,5 m de longueur, de 35 kV et 2 kA fonctionne déjà [2].

### **I.9.2. Les transformateurs**

L'une des applications des supraconducteurs en électrotechnique concerne les transformateurs. Pour cette application les pertes en régime alternatif des supraconducteurs restent un inconvénient majeur.

Les études effectuées ont montré des performances remarquables de ce type de transformateurs. En effet, par rapport à un transformateur conventionnel, les pertes peuvent diminuer de 30%, le volume de 50% et le poids de 70%. La société Siemens a réalisé et testé avec succès un transformateur de 1 MVA [2].

### **I.9.3. Les limiteurs du courant**

Le fonctionnement des limiteurs supraconducteurs est basé sur la transition de l'état supraconducteur vers l'état normal de ces matériaux. Cette transition en un temps très bref fait des supraconducteurs de bons limiteurs. En présence d'un court-circuit dans le réseau électrique, le courant augmente rapidement et dépasse le courant critique du supraconducteur.

Ce dernier en transitant à l'état normal voit sa résistance augmenter ce qui entraîne une limitation du courant du court-circuit. La puissance dissipée dans le matériau supraconducteur juste après la transition est considérable et qui peut entraîner la destruction du dispositif.

L'avantage des limiteurs supraconducteurs par rapport aux dispositifs conventionnels de protection est leur temps de réponse et la possibilité d'être utilisés pour des niveaux de tensions très élevées. Plusieurs travaux ont été effectués sur les limiteurs supraconducteurs. Au laboratoire CNRSCRTBT/LEG, un limiteur a été réalisé pour une tension de 1 kV.

Le limiteur testé a montré l'intérêt de l'YBaCuO mono domaine dans ce type d'application, et les performances peuvent encore être améliorées. Une étude sur les limiteurs de courant continu et une comparaison avec les limiteurs en courant alternatif a été établie [2].

### **I.9.4. Les systèmes de stockage de l'énergie**

Le stockage d'énergie est l'une des applications industrielles les plus mures des supraconducteurs. L'énergie est stockée sous forme magnétique dans une bobine supraconductrice. Cette énergie est le résultat de la circulation, pratiquement sans diminution dans le temps, du courant dans la bobine. Les avantages de tels systèmes sont surtout le rendement très élevé en comparaison avec les systèmes conventionnels de stockage d'énergie et la rapidité à restituer de l'énergie. En effet, le rendement d'un système supraconducteur de stockage d'énergie peut atteindre 97% alors que ce rendement ne dépasse pas 70% pour un système de barrage à pompe. Avec tous ces avantages, il faut noter que la densité volumique l'énergie stockée n'est pas très importante, 4kWh/m<sup>3</sup> pour une valeur d'induction de 6 T.

L'un des problèmes rencontrés dans ce type d'installations est dû aux forces très élevées que subit le bobinage. Les systèmes utilisés pour stocker de l'énergie peuvent être sous forme de solénoïdes, de tores ou de structures intermédiaires entre les deux (bobines à système de forces équilibrées).

L'utilisation de ce dernier type de bobines peut réduire jusqu'à 4 fois les dimensions de la bobine par rapport à un tore et à 2 fois par rapport à un solénoïde pour la même valeur d'énergie stockée [2].

### I.9.5. Les aimants permanents supraconducteurs

Un supraconducteur massif peut aussi être utilisé comme aimant permanent. En refroidissant à champ nul un supraconducteur à haute température critique, puis en l'exposant à une variation rapide du champ magnétique, il va piéger le champ magnétique. Le champ piégé dans le supraconducteur est lié à des courants induits par la loi de Lenz. Ces courants se développent comme dans un métal normal, à partir de la surface extérieure, mais contrairement aux matériaux résistifs, 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  $H_p$ .

L'exemple suivant concerne une plaque supraconductrice de largeur  $2a$ , infiniment longue suivant les axes  $y$  et  $z$ , soumise à un champ extérieur  $H_e$  suivant l'axe  $y$ .

Après l'annulation de l' $H_e$  la plaque piège un champ magnétique, dont la répartition dépend de la valeur du champ extérieur appliquée. Nous présentons sur la figure I.7 la répartition du courant et du champ magnétique à l'intérieur de la plaque.

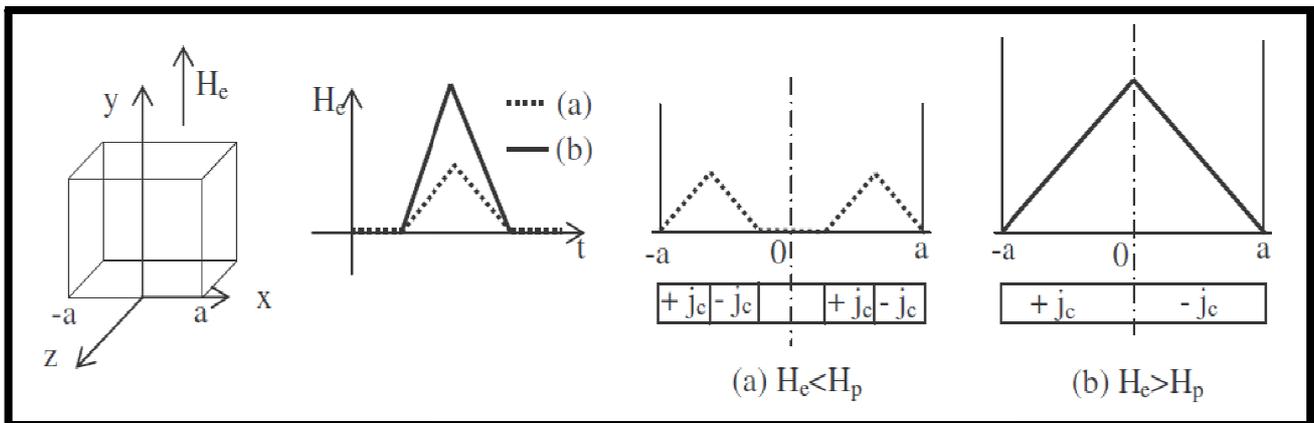


Figure I.7. Répartition du champ magnétique et du courant à l'intérieur du supraconducteur après la disparition du champ extérieur [2].

Cette propriété de piégeage du champ magnétique a été utilisée pour réaliser un moteur à 8 pôles. L'inducteur du moteur est composé de 8 disques en BSCCO, jouant le rôle d'aimants permanents, placés sur un cylindre non ferromagnétique. Cet inducteur est refroidi à l'azote. Le refroidissement des disques supraconducteurs se fait sans champ magnétique.

Les disques supraconducteurs seront magnétisés à l'aide d'une bobine en cuivre. En appliquant une impulsion du courant de 7620 A durant 2 ms, une induction magnétique de 1,6 T sera générée près de la surface du disque. Cette valeur va diminuer pour se stabiliser à 0,6 T après 20 ms.

D'autres études ont montré qu'on peut avoir des aimants permanents supraconducteurs avec des valeurs très élevées d'induction magnétique pouvant atteindre 11,4 T à 17 K pour un disque en YBaCuO de 26 mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur [2].

### **I.10. Les machines supraconductrices**

#### **I.10.1. Historique :**

En fonction du type de supraconducteur utilisé, on a deux générations différentes de machines supraconductrices. Jusqu'à la fin des années 90 ce sont les supraconducteurs à basse température critique qui étaient les plus utilisés dans la réalisation de ces machines. Après la découverte des supraconducteurs à haute température critique et le développement de ces matériaux, une autre période a commencé. Actuellement la quasi-totalité des machines, réalisées ou étudiées, contiennent des supraconducteurs à haute température critique. Les supraconducteurs à basse température critique sont néanmoins encore très présents, notamment dans le domaine médical pour réaliser les systèmes d'imagerie à résonance magnétique IRM ou dans le domaine des grands instruments de la physique (accélérateurs de particules, générateurs de fusion...).

L'histoire des machines supraconductrices a commencé à la fin des 60 et au début des années 70, où plusieurs travaux ont été menés notamment aux USA, en Allemagne, en URSS, en France et au Japon. Un alternateur entièrement supraconducteur a été conçu et réalisé par l'US Air Force en 1967. Les tests de cet alternateur entièrement supraconducteur ont échoué, et ont montré les pertes importantes dans un supraconducteur en présence d'un champ magnétique variable. Depuis, presque toutes les machines réalisées ont un induit résistif. Une des toutes premières machines supraconductrices avait été réalisée au MIT aux USA en 1969.

Cette machine de 45 kVA avait un induit sans fer et un inducteur supraconducteur, et c'est la première machine supraconductrice à inducteur tournant. Cela n'était pas possible avant à cause des difficultés rencontrées pour réaliser un cryostat tournant. Après ces premiers progrès, les chercheurs se sont intéressés de plus en plus à ce domaine, et des études ont été menées un peu partout dans le monde. Suite à l'apparition de multi-filamentaires ultrafins d'Alcatel Alsthom Recherche et GEC Alsthom, la première machine entièrement supraconductrice testée avec succès a été mise au point à Grenoble en 1987. Quelques exemples d'étude ou réalisation de machines supraconductrices sont présentés dans le tableau I.1 [2].

**Tableau I.1** : Histoire du développement des machines supraconductrices.

Période	Pays	Organisme	Puissance	Commentaires
Avant 1970	Etats-Unis	AVCO	8 kVA	Conception d'une machine entièrement supraconductrice (1965)
	France		1 kW	
	Etats-Unis	MIT	40 kVA	1ère machine à inducteur tournant (1969)
Avant 1986	Etats-Unis	WH	5 MVA	
	Japon	Toshiba	3 MVA	Conception seulement
	Etats-Unis	MIT	3 MVA	1er alternateur supraconducteur testé en réseau
	Etats-Unis	WH	10 MVA	
	Allemagne	Munich Institut of Technology	320 kVA	
	Japon	Mitsubishi & Fuji	6,25 MVA	
	URSS		1,5 MVA	
	Etats-Unis	WH et EPRI	300 MVA	Etablissement d'une méthode d'analyse
	Japon	Hitachi & Central Lab for Power research	50 MVA	Mesures de paramètres et obtention d'une fem à vide importante
	Etats-Unis	GE	20 MVA	Tests en moteur et en générateur, court-circuit 3-ph brusque
	URSS		20 MVA	
	Japon	Mitsubishi & Fuji	30 MVA	Mesures de paramètres et obtention d'une fem à vide importante
	Etats-Unis	MIT	10 MVA	Tests à vide
	France	EDF-Alsthom	250 MVA	Rotor modèle
France	Univ. de Nancy		Structure disque basée sur un solénoïde supraconducteur pour saturer les dents d'un rotor magnétique	

	Allemagne	KWU-Siemens	120/400 MVA	Test d'un inducteur fixe
	Japon	Toshiba	3 MVA	Conception seulement
	France	CNRS-Alsthom	18 kVA	1ère machine entièrement supraconductrice testée avec succès
	Russie	Electro-Sila	300 MVA	Refroidissement à LN2
	Russie	Electrical Machinery Union Lab	20 MVA	Tests en réseau
	Russie		1200 MVA	Une étude sans Réalisation
	France	CNRS/CRTBT/LEG	150 kW	Induit supraconducteur et inducteur à aimants permanents
Avant 2000	Allemagne	KWU/Siemens	850 MVA	Une étude sans Réalisation
	Japon	Kyoto Univ, Seik Univ & Saga Univ	20 kVA	Fonctionnement en parallèle avec un alternateur conventionnel
	Japon	Yokohama Natl. Univ. & Central Lab for Power Research	30 kVA	Alternateur entièrement supraconducteur, tests du stator
	Japon	Kyoto Univ, Toshiba & KEPCO	100 kVA	Tests en réseau
	Japon	Super-GM	70 MW	Prototype d'un alternateur à 200 MW. Fonctionnement pendant 1500 heures en réseau
	Etats Unis	AFRL & AMSC	1 MVA	Supraconducteur à haute température critique
	Corée	KERI	30 kVA	
	Après 2000	Allemagne	Siemens	400 kW
Etats Unis		AMSC	5 MW	Un moteur pour la propulsion

				maritime. Rotor supraconducteur à haute température critique
	Japon	Sumitomo	800 kW	Un moteur pour la propulsion maritime avec du supraconducteur à haute température critique

Les trois dernières lignes du tableau I.1 présentent les réalisations les plus récentes de machines supraconductrices.

Pour la machine de 400 kW réalisée par Siemens, la température de fonctionnement de l'inducteur est de 30 K. Les performances ont montré la validité du concept, et ont conduit à la réalisation d'une machine à 4 MVA et  $3600 \text{ tr.min}^{-1}$ . Même si le rendement de la machine réalisée n'est pas beaucoup plus important par rapport à celui d'une machine synchrone classique, 96,8% contre 96%, cette machine a pu fonctionner jusqu'à 700% de sa capacité nominale contre 130% seulement pour une machine classique. Une étude de la pollution en harmonique a permis de déterminer un THD de 0,15% contre 3% pour une machine classique. La machine, en fonctionnement alternatif, a pu produire 600 kW pendant 15 minutes, ce qui représente un pic de production de 150% de sa puissance nominale. Pour le rapport puissance/poids, la machine réalisée est deux fois plus intéressante qu'une machine synchrone non supraconductrice.

Le moteur réalisé par AMSC est destiné à la propulsion maritime. L'induit du moteur est en cuivre et sans fer. L'inducteur est en supraconducteur à haute température critique BSCCO refroidi à 31 K. Le moteur a une puissance de 5 MW, une vitesse de  $230 \text{ tr.min}^{-1}$ , une tension aux bornes d'une phase statorique de 2,4 kV et un courant statorique de 715 A.

Les tests ont été effectués pour 4 vitesses entre 60 et  $230 \text{ tr.min}^{-1}$ . Le courant inducteur relevé en fonctionnement en plein couple et en pleine vitesse est 3% plus important que celui relevé pendant l'essai à vide. Les pertes mesurées à vide sont proportionnelles au carré du courant inducteur. Le test à pleine charge et à vitesse nominale a été effectué pendant presque 3 heures. La température du bobinage induit relevée pendant le test est de 90 °C. Le moteur a un rendement de 96%. Cette réalisation est le prototype d'un autre moteur de 36,5 MW.

La structure des machines supraconductrices réalisées comprend souvent un induit conventionnel sans fer et un inducteur supraconducteur. Néanmoins, on peut rencontrer des machines avec des structures très originales.

Un moteur à flux axial du type hystérésis a été conçu et réalisé à l'université de Kyoto. Le rotor est un disque en BSCCO, supraconducteur à haute température critique refroidi à l'azote. Ce rotor est mis entre deux demis stator triphasés à 4 pôles chacun.

L'entrefer du moteur est de 0,7 mm. Une analyse du fonctionnement a été faite pour établir un schéma équivalent. Les pertes dues à la variation du champ magnétique dégradent énormément les performances de ce type de moteur.

En Russie, différentes structures de moteurs supraconducteurs ont été étudiées. Des moteurs, du type hystérésis, de puissances entre 50 W et 4k W ont été réalisés et testés.

Ces moteurs sont constitués d'un rotor massif en YBaCuO ou en BSCCO et un induit en cuivre. Le rotor est refroidi à l'azote. Une autre série de moteurs supraconducteurs à reluctance variable ont été fabriqués et testés également. Le rotor dans ce type de moteur est constitué de plusieurs couches en interposant des couches ferromagnétiques et des couches en supraconducteur à haute température critique YBaCuO ou BSCCO. Cette configuration permet d'avoir une différence de reluctance suivant les axes d et q du rotor (figure I.8) [2].

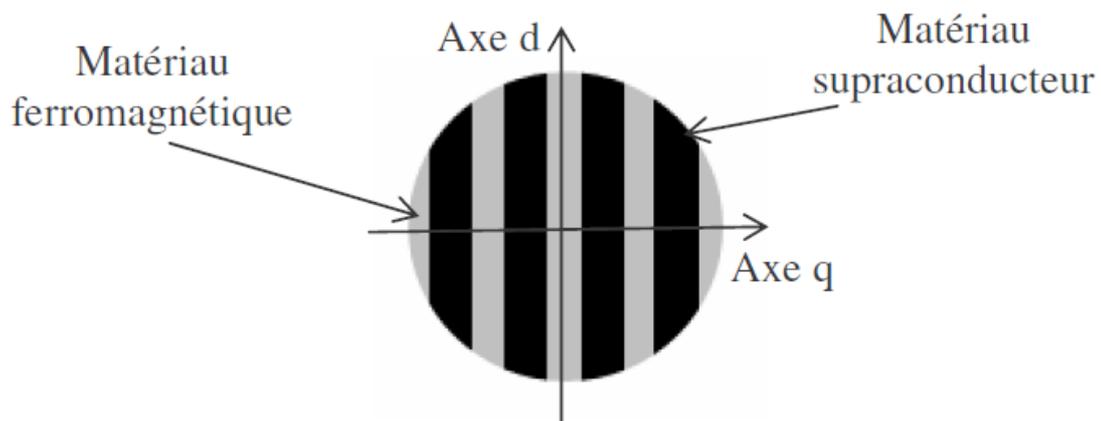


Figure I.8. Rotor d'une machine à reluctance variable supraconductrice [2].

Le rotor est refroidi à l'azote. La puissance des moteurs à reluctance variable réalisés et testés varie entre 0,75 et 10 kW. Ces moteurs ont une densité de puissance volumique 4 à 7 fois supérieure à celle des moteurs à reluctance variable non supraconducteurs [2].

### I.11. Intérêts d'utiliser les supraconducteurs dans les machines électriques

La puissance d'un alternateur conventionnel est limitée pour les raisons suivantes :

- La force centrifuge qui s'exerce sur les éléments du rotor en limite le diamètre (environ 1,25 m pour 3000 tr.min<sup>-1</sup>).
- Les pertes par effet Joule malgré l'amélioration des techniques de refroidissement imposent une limite à la densité de courant dans l'inducteur.
- 2000 MW semble être la puissance limite que l'on peut atteindre avec la technologie conventionnelle.

Les machines supraconductrices pourraient permettre de reculer cette limite. En effet, les travaux réalisés jusqu'à maintenant ont montré que l'utilisation des supraconducteurs à haute température critique dans l'inducteur des machines synchrones réduit les dimensions et le poids de la machine. Cela réduit également les pertes et augmente le rendement de la machine. Ces machines ont une réactance synchrone faible par rapport à ce qu'on a dans les machines non supraconductrices ce qui renforce la stabilité du réseau.

Le développement des machines supraconductrices se fait en parallèle avec l'amélioration des performances des fils supraconducteurs à haute température critique. Ces fils sont déjà commercialisés, en longueur de plus en plus importante, en Europe par European Advanced Superconductor et Trithor, au Japon par Sumitomo Electric Industries et aux Etats Unis par American Superconductor (AMSC). AMSC a amélioré son produit, déjà sur le marché, pour avoir un fil YBaCuO de 2 à 5 fois moins cher que le fil actuel [2].

### **I-12- Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à l'étude des matériaux supraconducteurs, les différents types des matériaux (type I et type II) des supraconducteurs ainsi que le diagramme de phase de supraconducteur, effet de MEISSNER et les diverses applications des supraconducteurs dans le domaine de l'électrotechnique.

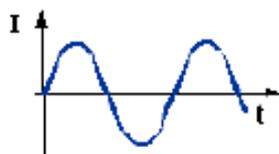
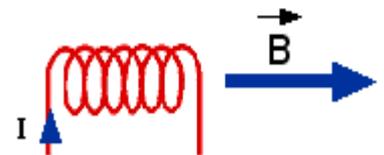
## II.1. Introduction

Depuis la découverte de la supraconductivité, de très nombreux moteurs supraconducteurs ont été construits. Cette partie présente un aperçu des différents types de moteurs supraconducteurs existants.

## II.2. Principe de fonctionnement d'une machine

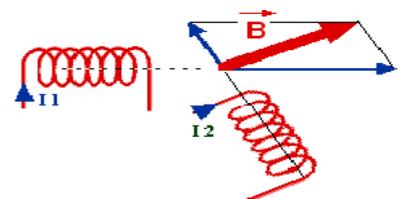
Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives.

La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique  $\mathbf{B}$ . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant  $\mathbf{I}$ . C'est une grandeur vectorielle.

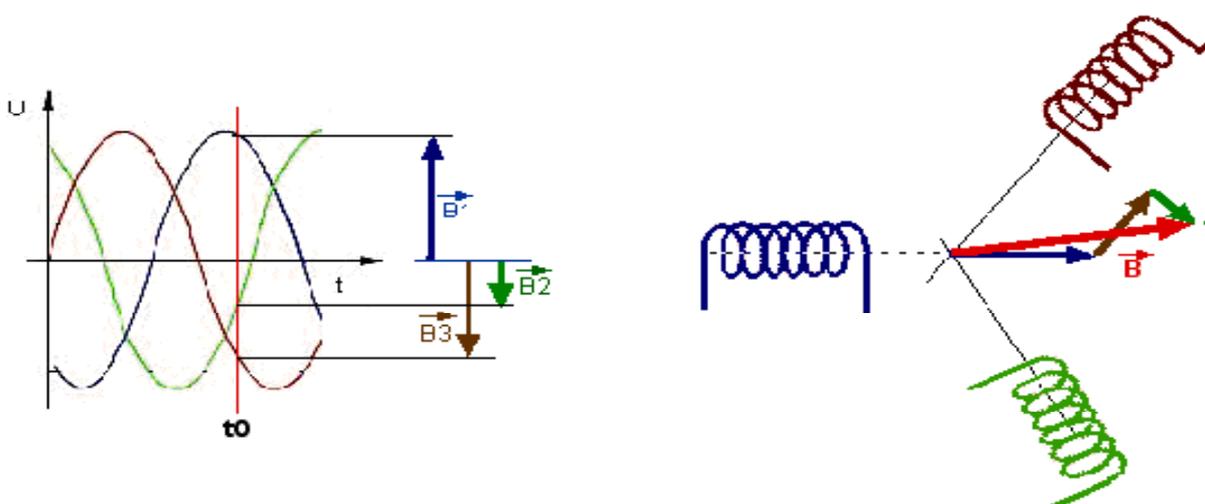


Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant.

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres.



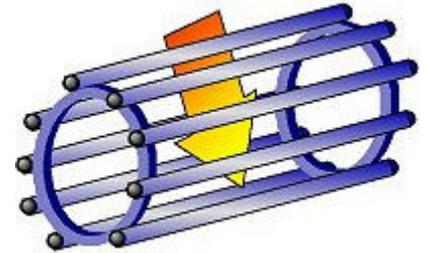
Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à  $120^\circ$  les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit 50 tr/s.



Les 3 enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme.

Le stator est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une (cage d'écureuil). Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance.

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier.



Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone.

Prenons l'exemple d'un moteur dont la fréquence de rotation nominale relevée sur la plaque signalétique est de 2840 tr/mn, ce moteur étant alimenté en courant de 50Hz, la fréquence de rotation du champ magnétique est donc de 50 tr/s soit 3000 tr/mn. Le rotor est donc balayé par un champ magnétique qui tourne à une fréquence de rotation relative de  $3000 - 2840 = 160$  tr/mn [4].

### II.3. Constitution d'une machine

L'organisation d'une machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous ensembles.

#### II.3.1. Stator

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné

réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

### II.3.2. Rotor bobiné

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux ; en effet les pertes rotor pendant la phase de démarrage valant approximativement  $\frac{1}{2} J\omega^2$  ne sont pas toujours supportées par les cages.

### II.3.3. Rotor à cage

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

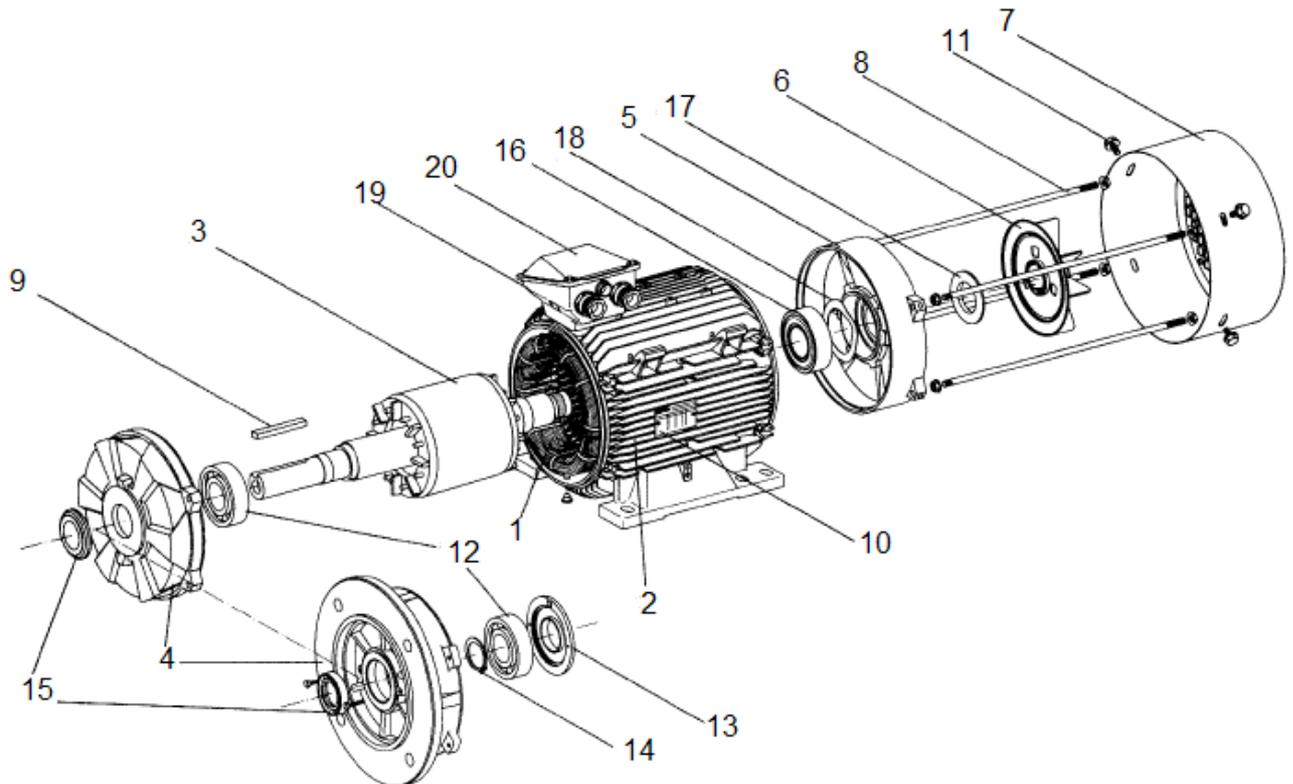
Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique,  $N_b \geq 8x_p$ ), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) [5].

### II.3.4. Vues en coupe [5]



- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| 1 : Stator bobiné             | 11 : Vis de fixation du capot                |
| 2 : Carter                    | 12 : Roulement côté accouplement             |
| 3 : Rotor                     | 13 : Chapeau intérieur côté accouplement     |
| 4 : Flasque côté accouplement | 14 : Circlips de roulement côté accouplement |
| 5 : Flasque arrière           | 15 : Joint côté accouplement                 |
| 6 : Ventilateur               | 16 : Roulement arrière                       |
| 7 : Capot de ventilation      | 17 : Joint arrière                           |
| 8 : Tiges de montage          | 18 : Rondelle de pré-charge                  |
| 9 : Clavette                  | 19 : Corps de boîte à bornes                 |
| 10 : Plaque signalétique      | 20 : Couvercle de boîte à bornes             |

## **II.4. Les machines supraconductrices**

### **II.4.1. Les machines classiques « cuivre - supraconducteur »**

Les supraconducteurs étant capables de transporter le courant électrique sans dissipation d'énergie, la première idée a été de remplacer les fils de cuivre par des fils supraconducteurs. Dans un premier temps, les câbles à basse température critique ne supportant pas les variations du champ magnétique, ces derniers ont été utilisés pour générer les champs d'inducteur des machines synchrones.

L'arrivée du fil alternatif a permis la réalisation de machines synchrones entièrement supraconductrices avec inducteur supraconducteur ou à aimants permanents.

Ces machines fonctionnent comme des machines traditionnelles, le supraconducteur sert à augmenter les performances, car, grâce à son absence de résistance électrique, des courants très élevés peuvent être utilisés.

Le refroidissement des éléments supraconducteurs nécessite l'utilisation d'un cryostat qui augmente la taille de l'entrefer. L'induction au niveau de l'entrefer reste aux alentours du tesla. Le gain de performance provient du fort taux de remplissage des conducteurs de l'induit [6].

### **II.4.2. Amélioration des machines à réluctance variable**

Dans les machines synchro-réductantes, le rotor se place dans la direction favorisant une valeur de flux maximum. Le couple produit par ces moteurs est proportionnel à la différence des inductances d'axe d et d'axe q. Il est possible d'amplifier cette différence, donc le couple, en plaçant un matériau ferromagnétique dans un axe et un matériau diamagnétique dans l'autre axe. Cette amélioration permet un gain conséquent au niveau du couple électromagnétique. La figure suivante présente un rotor de machine synchro-réductante à deux pôles avec un induit sans fer [6].

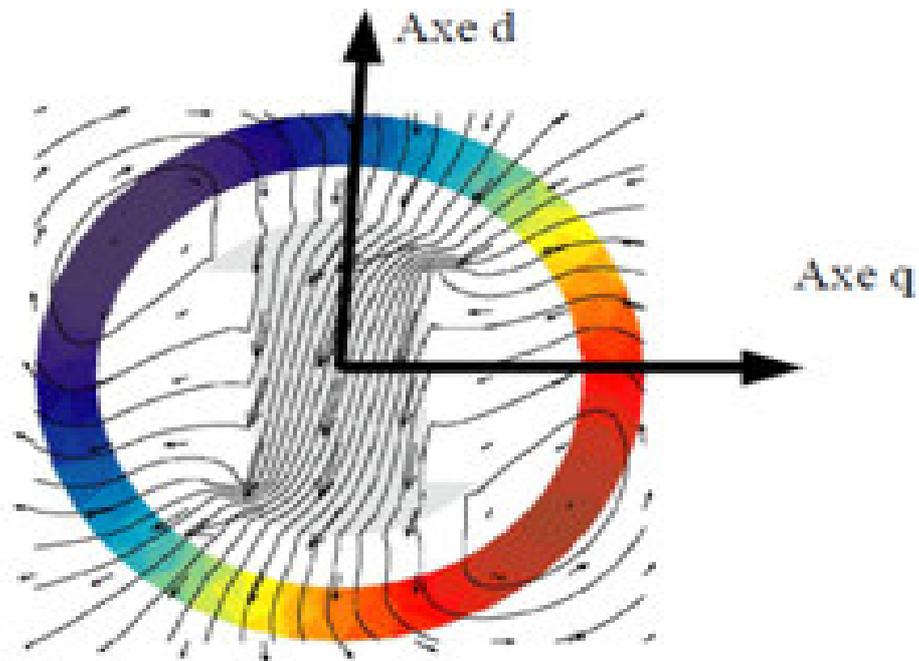


Figure. II.1. Lignes de champs dans un rotor de moteur synchro-réductant [6].

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

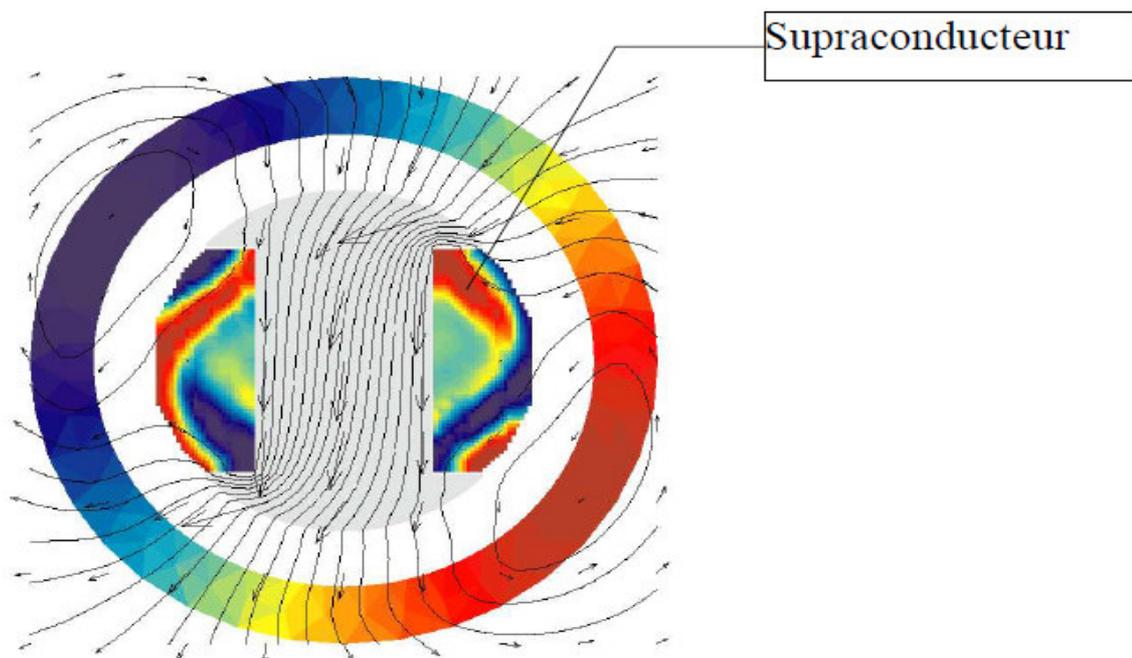


Figure. II.2. Lignes de champ dans le rotor d'un moteur synchroréductant amélioré par deux écrans supraconducteurs [6].

De nombreuses autres structures découlent de ce type de machine. Par exemple, au lieu de placer les écrans supraconducteurs entre les pôles magnétiques, on peut créer un rotor à pans coupée comme celui présenté précédemment, ou à pôles lisses, mais un réalisant un feuilletage de celui-ci en alternant un couche de matériau ferromagnétique et une couche de matériau supraconducteur [6].

## **II.5. Machines synchrones**

Cette catégorie de machines supraconductrices regroupe près de 90% des machines réalisées, avec une structure dominante de moteur synchrone à pôles saillants, où la partie supraconductrice concerne un inducteur tournant. On pourrait appeler ces machines des « cryo-copies », consistant à reprendre un moteur classique cuivre et à remplacer la partie enroulement à courant continu par des bobines supraconductrices.

### **II.5.1. Moteur Synchrone à pôles saillants**

On y retrouve en particulier les moteurs réalisés par American Superconductor et Siemens, avec des réalisations pouvant atteindre 36.5MW pour la dernière, principalement pour des applications dédiées à la marine.

Le choix d'une structure classique à inducteur supraconducteur demeure la plus répandue pour les machines de forte puissance, proposant ainsi un cryostat mobile et la nécessité d'utiliser des joints tournants de type ferrofluide. Cependant des laboratoires, universitaires ou industriels Japonais proposent des machines avec une cryogénie fixe, à structure inversée : à induit tournant et inducteur fixe externe, cela simplifie considérablement la conception du cryostat ainsi que l'alimentation des bobines supraconductrice, mais l'inconvénient majeur est la réduction la puissance maximale disponible.

On relève aussi la volonté de travailler à des inductions radiales dans l'entrefer de l'ordre de 1 Tesla, tout comme les machines classiques. Certaines structures proposent des dents statoriques en fibre de verre pour limiter la saturation de la culasse externe (Fig. II.3), mais également associées à un refroidissement à l'huile des enroulements d'induit. Ce qui permet d'augmenter le couple massique.



Figure. II.3. Moteur synchrone 5MW d'American Superconductor (AMSC) [7].

La majorité des machines de ce type a un système de refroidissement réalisé par une circulation de gaz via le coeur du rotor (Fig. II.3), avec un refroidissement des bobines par conduction. Procédé efficace mais condamnant une sortie d'arbre du moteur. Le type de supraconducteur privilégié est le BSCCO sous forme de pancake, permettant de grandes longueurs grâce à une bonne homogénéité du fil. Des premières études avec des fils de seconde génération (YBCO) concernent actuellement beaucoup de projet, même si de premiers essais sont positifs, il est actuellement difficile d'obtenir une bobine avec un fil long et d'envisager ainsi des moteurs de fortes puissances.

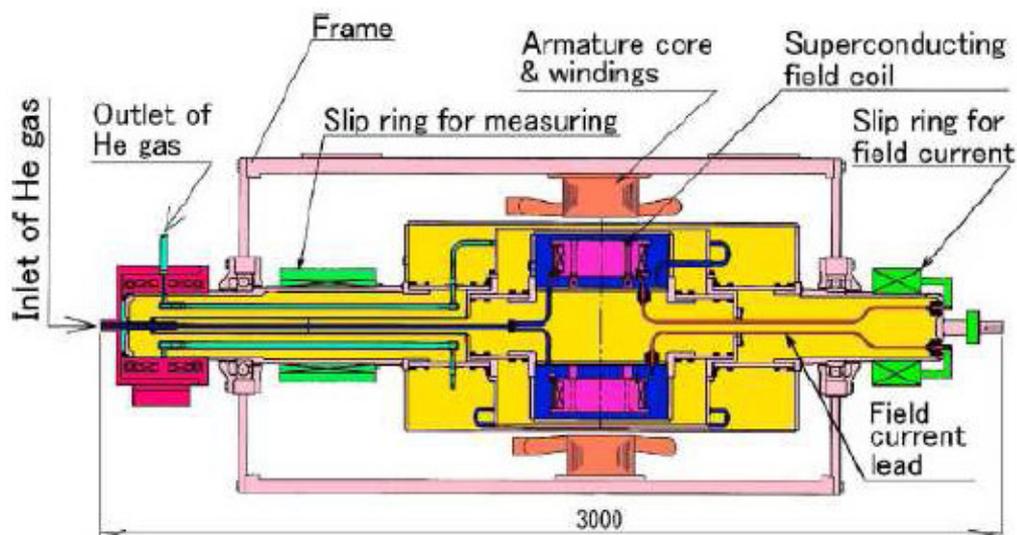


Figure.II.4. Illustration de la coupe d'un moteur synchrone supraconducteur de 15kW par Kyushu.

La découverte récente du MgB<sub>2</sub> et son bon comportement sous forme de bobine en font un supraconducteur intéressant pour ces moteurs. De plus, l'amélioration des cryocoolers permet

d'envisager des puissances cryogéniques importantes à basse température, ici au environ de 20 K [7].

Quelques réalisations marquantes :



Figure. II.5. Moteur 400kW de Siemens 2002 (à gauche) et stator du moteur 36.5MW 2009 d'American Superconductor (à droite) [7].

### II.5.2. Moteur synchrone à flux axial

Les machines synchrones à flux axial consistent en une structure dite discale, où le stator et le rotor sont en vis-à-vis. Le champ magnétique est alors créé suivant l'axe avec des enroulements en « pétales de fleurs ».

Cette topologie permet d'envisager des machines à double rotor, on peut ainsi augmenter la puissance de la machine en disposant de deux inducteurs et d'un induit central (ou inversement), sans doubler l'encombrement global.

Plusieurs structures ont été proposées, la répartition des recherches sur ce type de structures concerne le Japon, l'Espagne et le Portugal. On distingue deux catégories :

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

### A- Bobines supraconductrices :

Au Japon, IHI Corporation est porteur de plusieurs projets, de la machine à inducteur supraconducteur de 22kW refroidis à l'azote liquide par un cryocooler (fig. II.6), à la machine composée seulement d'enroulements supraconducteurs de 12.5kW (Fig. II.7). Le moteur de 22kW comporte un inducteur supraconducteur fixe et un induit tournant, l'avantage est de disposer d'un système cryogénique simple. Le cryocooler, utilisé à une température de 77 K avec de l'azote liquide, fonctionne donc avec une puissance cryogénique importante. La structure détaillée figure 1.17, montre un inducteur supraconducteur central, composé de 8 bobines à supraconducteur à haute température critique contenant du Ho123, un cryostat, le tout placé sur un axe fer en tôle laminé. Deux induits extérieurs tournants permettent de transmettre le couple.

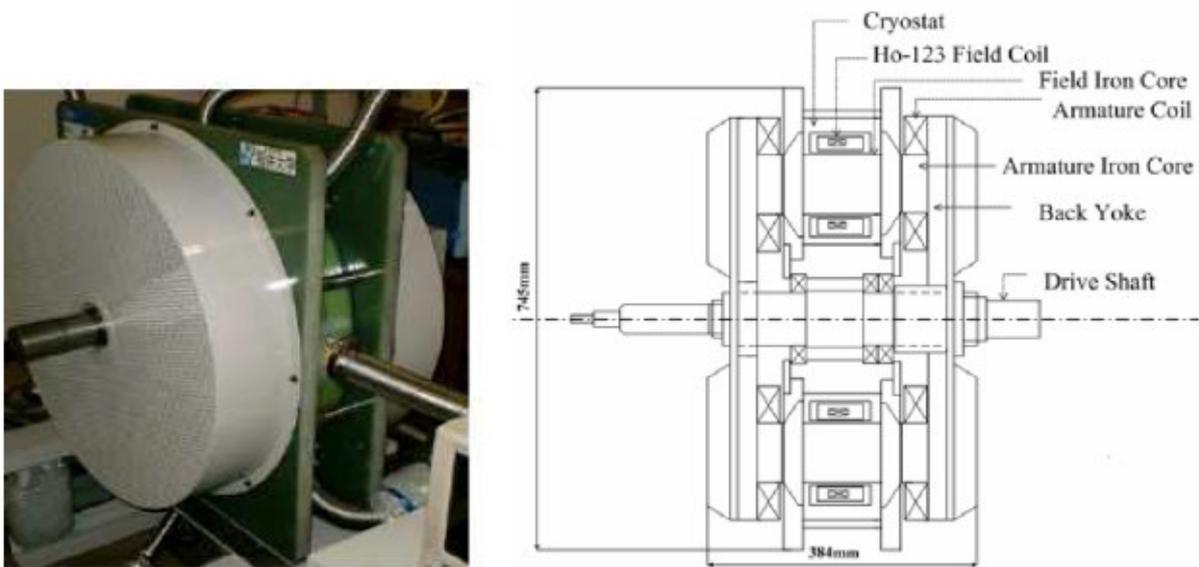


Figure. II.6. Moteur synchrone à flux axial de 22kW par IHI [7].

Suite à ces travaux, une machine entièrement supraconductrice de 12.5kW a été réalisée.

Refroidie à l'azote liquide par le centre de l'axe, elle se compose de deux inducteurs fixes extérieurs et d'un induit supraconducteur central également fixe (Fig. II.7), ainsi toutes les parties supraconductrices sont fixes. La transmission du couple se fait par deux pièces polaires situées dans le double entrefer, qui se magnétisent et tournent par répulsion et attraction dues aux champs magnétiques axiaux créés et au champ magnétique tournant de l'induit. Ce moteur est envisagé pour des POD en propulsion marine.

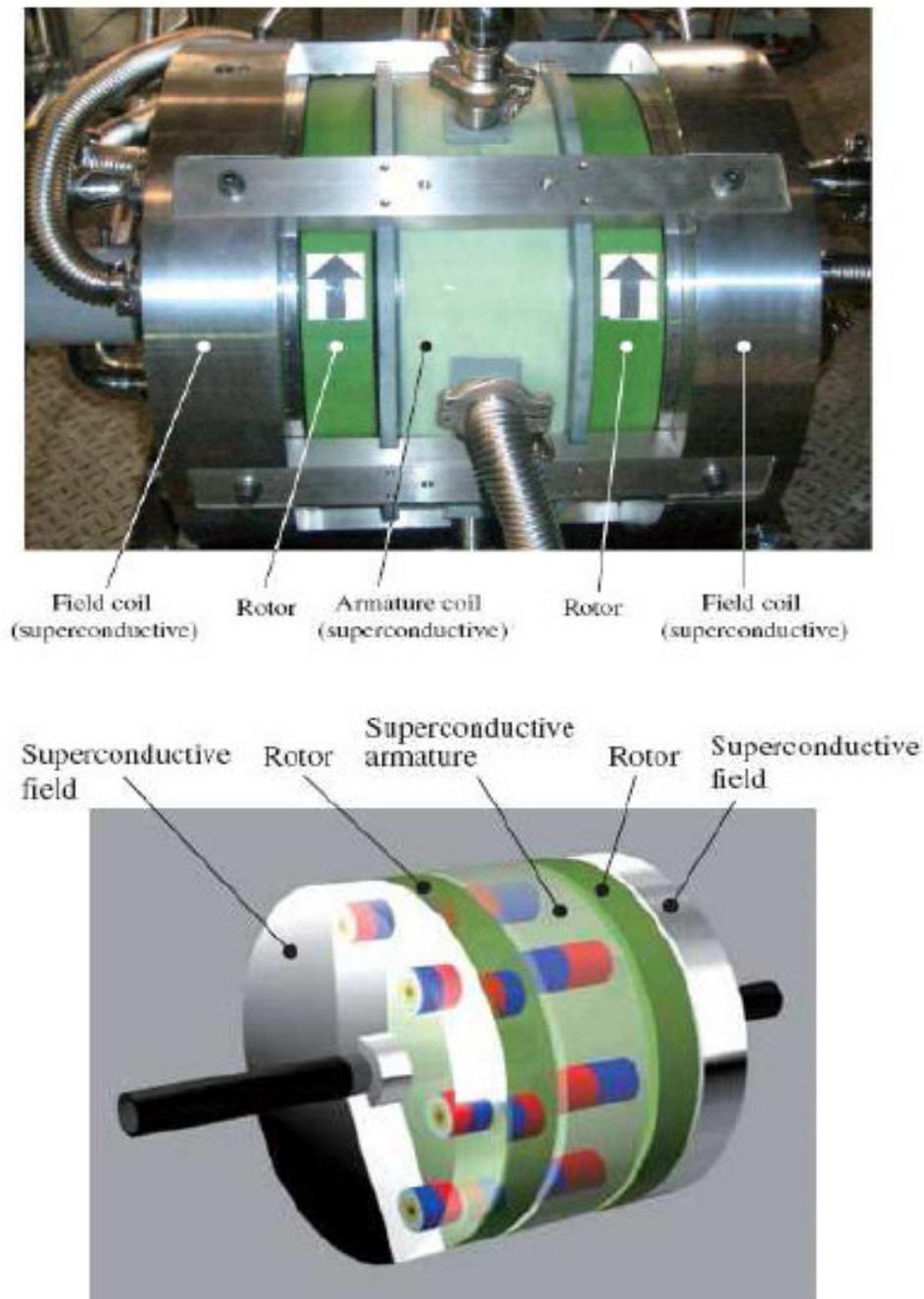


Figure. II.7. Moteur synchrone à flux axial tout supraconducteur de 12.5kW par IHI [7].

### **B- Bulk :**

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

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

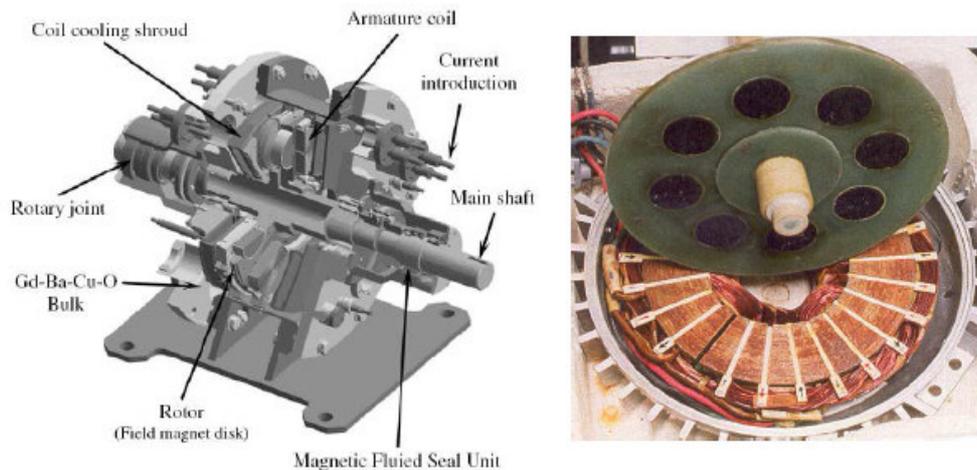


Figure. II.8. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs, IHI (gauche) et DEE University of Lisbonne [7].

Des applications à faible puissance et haute vitesse de rotation ont été envisagées, en particulier une pompe pour transfert cryogénique à grande fiabilité (pompe immergée dans l'azote liquide), solution sans roulement, et un servomoteur fonctionnant avec des pastilles supraconductrices à flux piégé. Ces moteurs sont composés aux extrémités d'un double inducteur, deux pastilles supraconductrices en YBCO (fig. II.9), permettant une structure 2 pôles. Afin d'augmenter la puissance du moteur, il est envisagé d'assembler plusieurs rotors sur le même axe [7].

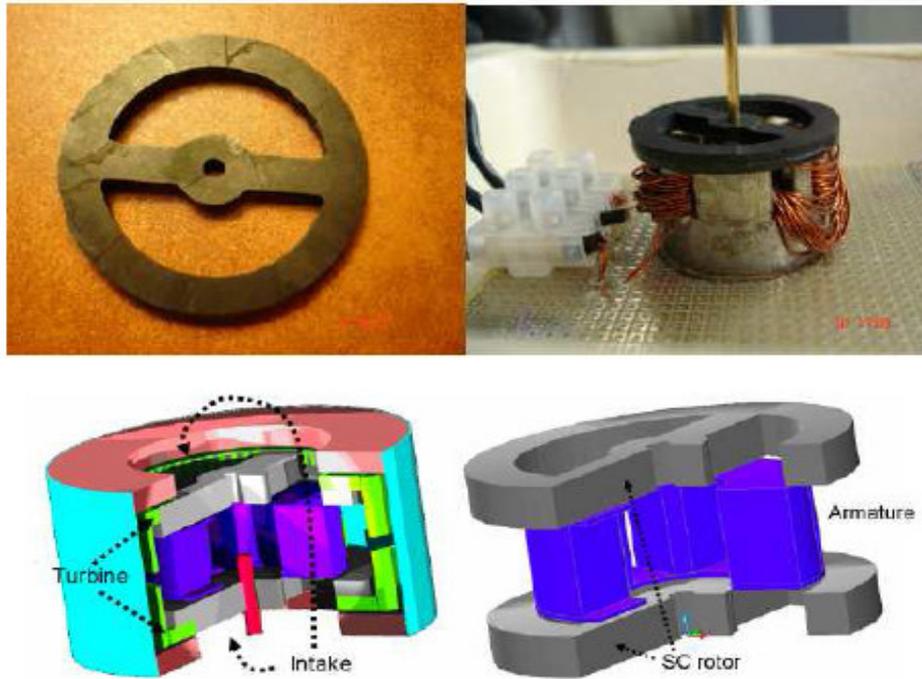


Figure. II.9. Moteur synchrone à flux axial composé de matériaux supraconducteurs massifs [7].

### II.5.3. Moteur synchrone à aimants permanents

Les premiers moteurs synchrones supraconducteurs à aimants permanents ont été réalisés par le G2Elab (anciennement LEG) sous la direction de Pascal Tixador. Ces machines proposaient une structure à inducteur tournant composé d'aimant en Néodyme Fer Bore, et un induit fixe supraconducteur en Niobium Titane élaboré de bobines supraconductrices sur plusieurs diamètres (Fig. II.10). L'induit ainsi façonné permet, grâce à une alimentation adéquate, de créer un champ magnétique tournant.

A la fin des années 90, deux réalisations ont été testées dans les locaux de l'institut Néel (CRTBT) à Grenoble, une première maquette de 15kW a apporté des résultats intéressants. Ainsi un second moteur a été conçu, avec des aimants permanents refroidis à 150K. Une puissance de 150kW a été atteinte avec cette machine en 1999 [8,9].

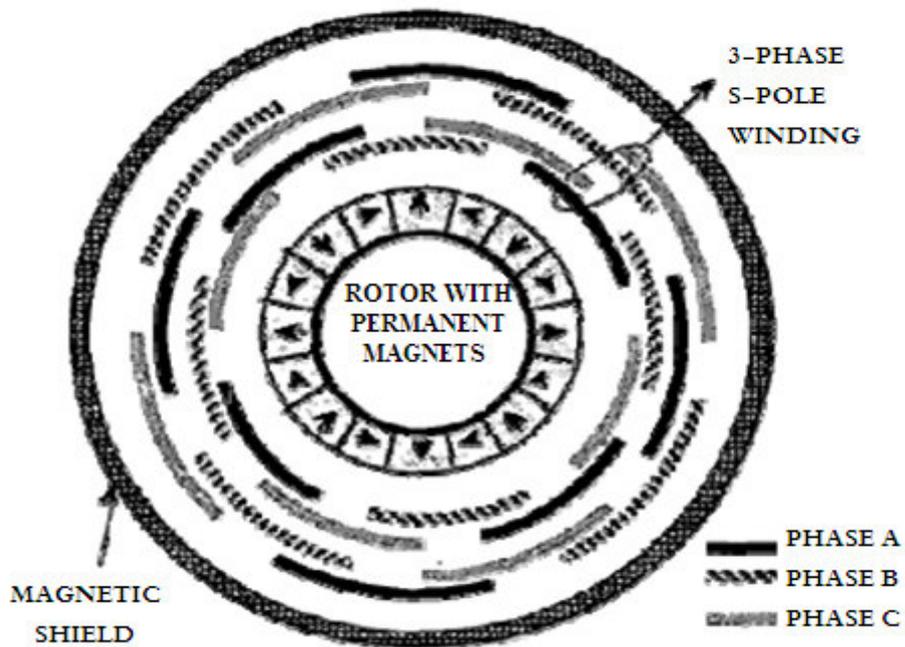


Figure. II.10. Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, principe [8].

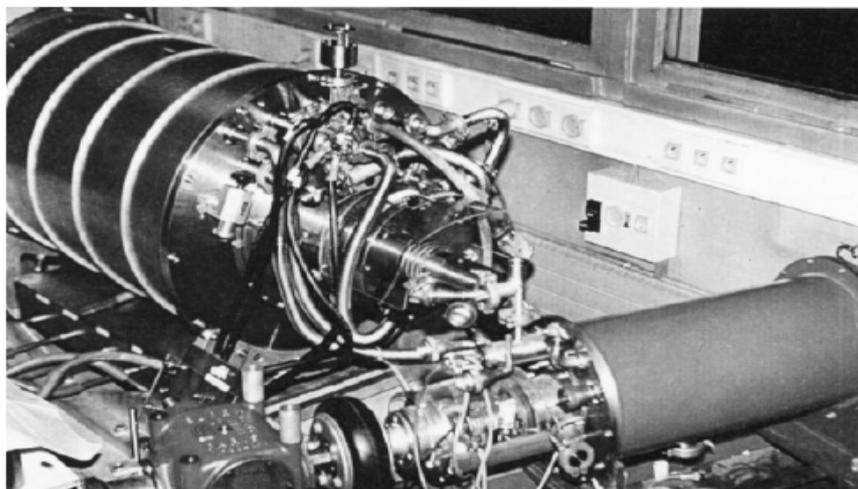


Figure. II.11. Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, 15kW 750tr/min et 150kW 400tr/min [9].

Les activités de recherches sur ce type de machines ont peu à peu été délaissées pour celles sur les moteurs à flux piégé, permettant d'envisager des puissances plus élevées, intéressantes dans le domaine de la propulsion marine. Cependant en 2008, un moteur synchrone à aimant permanent à flux axial de 400kW-250tr/min a été réalisé et testé, proposant une solution supraconductrice fixe à l'azote liquide. Les bobines en BSCCO sont alimentées en basse fréquence, ce qui permet de créer

le champ magnétique tournant tout en limitant les pertes en courant alternatif. Comme pour une structure classique, les bobines supraconductrices composant le stator sont insérées dans un corps ferromagnétique laminé, afin de réduire les courants de Foucault, de minimiser les pertes de flux magnétique et de maintenir les efforts appliqués sur les « pancakes ». Ce démonstrateur (Fig. II.12) offre des résultats attrayants, avec notamment un couple volumique important de  $14.8\text{kN.m/m}^3$ . Les perspectives d'avenir s'orientent vers des applications pour la propulsion marine [10].

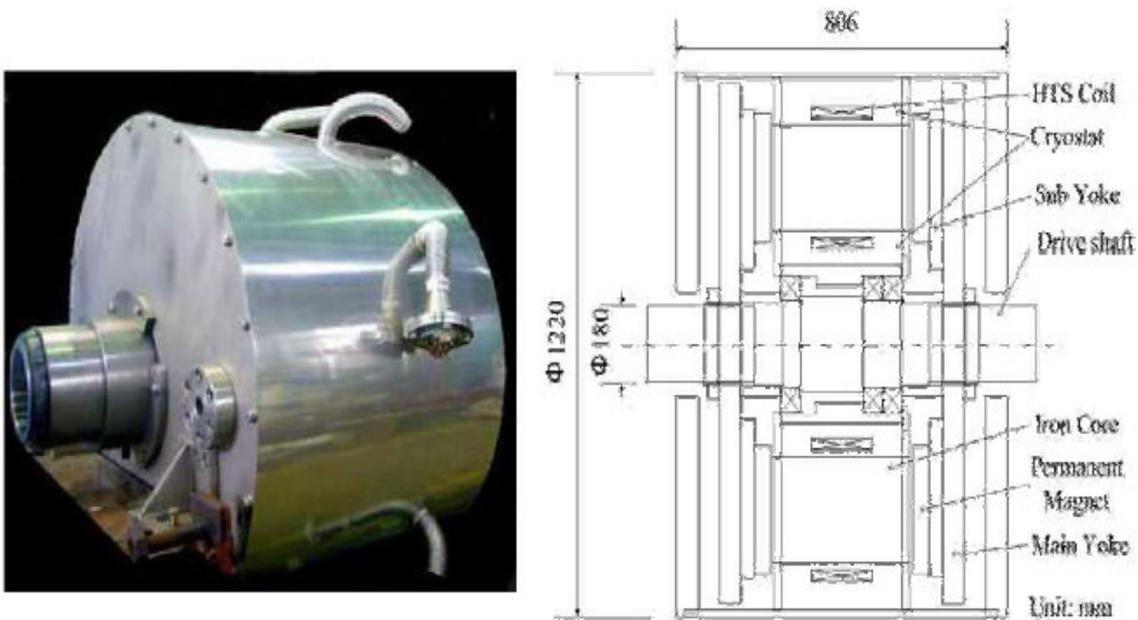


Figure. II.12. Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents et flux axial, 400kW-250tr/min [10].

## II.6. Moteur homopolaire

Le Naval Surface Wave Center a proposé un moteur synchrone supraconducteur homopolaire, réalisé dans un premier temps en NbTi en 1995, les bobines furent modifiées en 1997 avec du BSCCO. Une conception simple des bobines supraconductrices (solénoïdes), permet de créer deux champs magnétiques opposés élevés, ce qui s'ajoute de façon importante au champ magnétique radial générant le couple moteur (Fig. II.13).

Cette machine électrique a été réalisée dans un premier temps en NbTi à l'hélium liquide, avant d'être envisagée en fils HTS pour des gaz cryogéniques à différentes températures (4.2K, 28K). Les bobines en BSCCO reprenaient les mêmes dimensions que le fil LTS, le moteur restant identique. La première configuration en NbTi à 4.2K permet d'atteindre une puissance de 125kW, alors que la seconde en BSCCO offre 91kW à 28K.

Cette machine a été développée pour des applications mettant en oeuvre des machines rapides comme les turbines, elle permet de travailler à haute vitesse, ici 11700tr/min. Afin de ne pas

perturber l'environnement l'ensemble du moteur est confiné dans un tube en cuivre qui sert d'écran magnétique. De plus, afin d'avoir de bonnes connexions électriques, les contacts du stator sont alimentés en courant continu et transmis grâce à un contact fluide composé de potassium et de sodium.

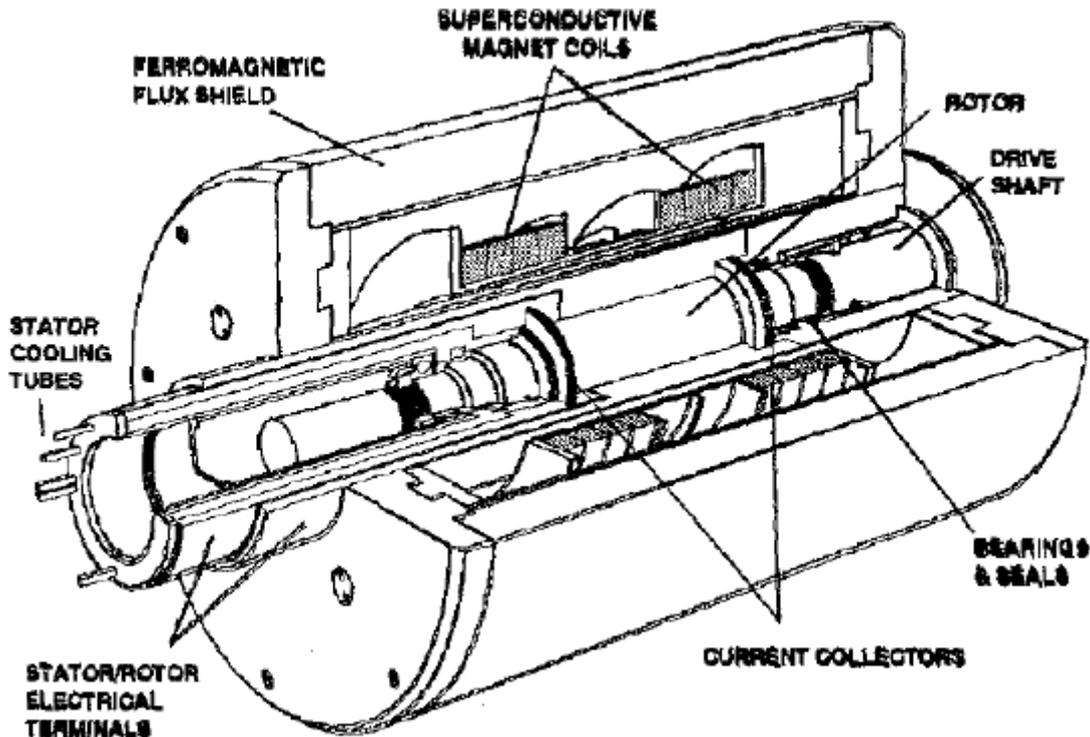


Figure. II.13. Moteur synchrone supraconducteur homopolaire, 91-125kW-11700tr/min [7].

## II.7. Moteur asynchrone

Plusieurs solutions de moteurs asynchrones à cage à supraconducteurs ont été envisagées, la structure imaginée proposant une cage d'écureuil HTS. Korea Electric Power Research Institute a conçu le premier rotor type de machine asynchrone supraconductrice, en assemblant deux couronnes d'un alliage aluminium cuivre par des barres en BSCCO, ils ont ainsi développé un moteur de 750W à 1710tr/min. Les moteurs asynchrones fonctionnant grâce aux pertes rotoriques, dues à sa résistance, au démarrage les barres supraconductrices transitent à l'état normal, ce qui crée un fort couple (grande variation de résistance du BSCCO). Une fois l'état supraconducteur recouvré, l'avantage principal de ce moteur est de permettre de fort courant induit dans les barres supraconductrices. On a ainsi un démarrage en deux temps, dépendant de la valeur de la résistance de la partie supraconductrice (Fig. II.14).

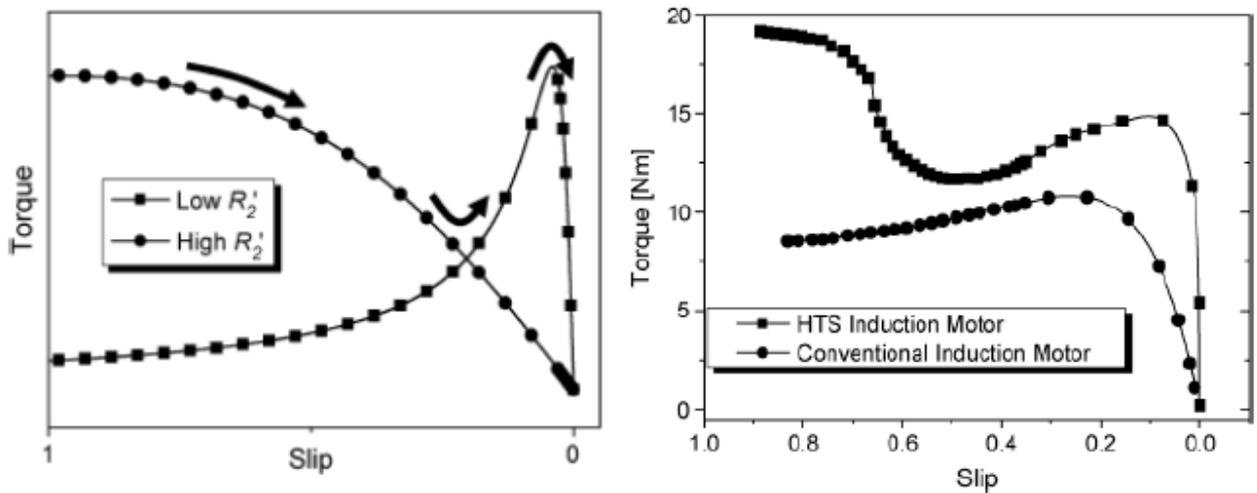


Figure. II.14. Moteur asynchrone supraconducteur, couple en fonction du glissement [7].

L'université de Fukui a également proposé un moteur asynchrone supraconducteur avec une cage entièrement supraconductrice. Deux structures ont été réalisées : une cage d'écureuil entièrement en BSCCO, puis un second rotor à barres massives en YBCO et deux solénoïdes en BSCCO dans le rôle des couronnes de court circuit (Fig. II.15). Afin d'éviter un emballement thermique lors du démarrage du moteur et l'apparition de « quench », ils proposent de contrôler la température jusqu'au point de fonctionnement nominal. Ces deux prototypes sont utilisés dans un environnement entre 65K et 77K, à l'azote liquide et offre des caractéristiques respectives de 1.5kW-1720tr/min et 1.3kW-1800tr/min. Contrairement aux machines synchrones supraconductrices, ces moteurs ont un facteur de puissance relativement faible.



Figure. II.15. Moteur asynchrone supraconducteur, 1.3kW-1800tr/min) [7].

## II.8. Moteur à courant continu

Une première étude a été menée par IRC Supraconductivity à Cambridge sur la possibilité de concevoir un moteur supraconducteur à courant continu, en utilisant des pastilles en YBCO comme des aimants permanents. Un banc d'essai (Fig. II.16) a été réalisé pour étudier l'interaction, dans un plan, entre des bobines supraconductrices et des supraconducteurs massifs ayant un flux piégé. Des résultats intéressants sur les efforts appliqués sur l'aimant supraconducteur ressortent de ces essais, avec un flux piégé de 0.5T sous 77K.

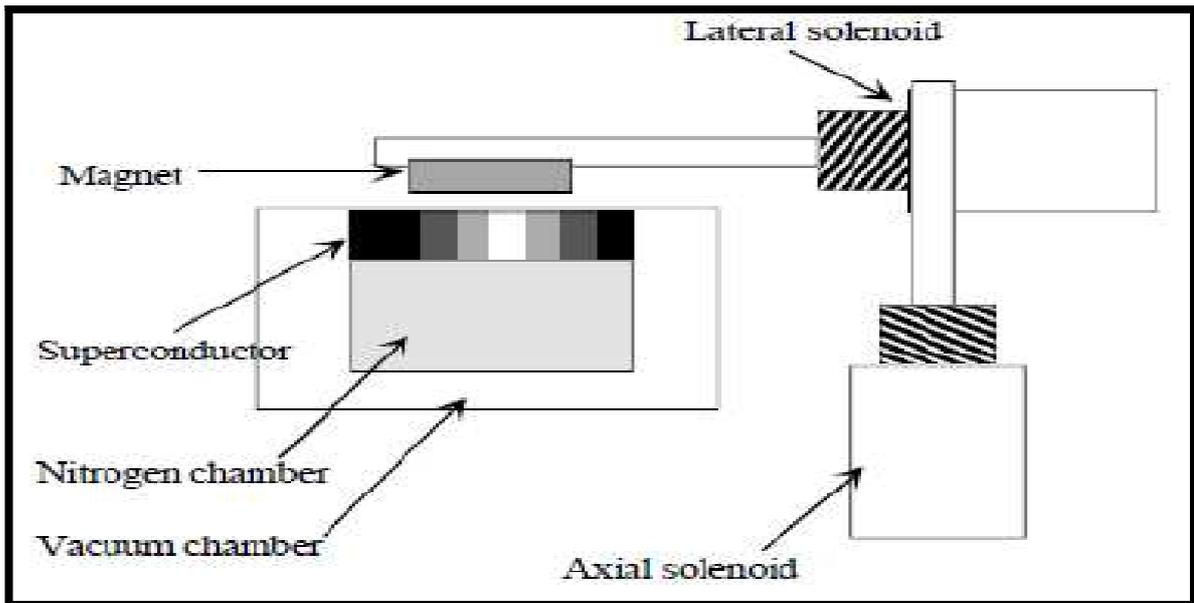


Figure. II.16. Tests RIG.

## II.9. Machines spéciales

### II.9.1. Moteur à griffe

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

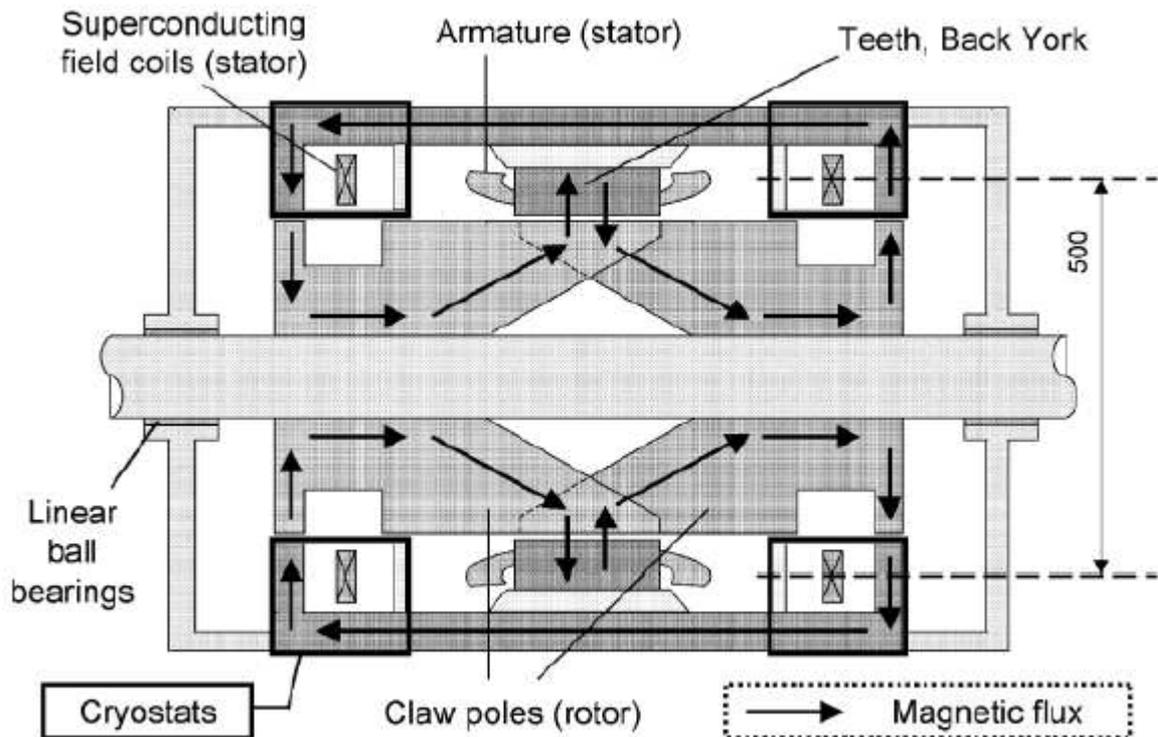


Figure. II.17. Coupe du moteur synchrone supraconducteur à griffe de Central Japan Railway Compagny [7].

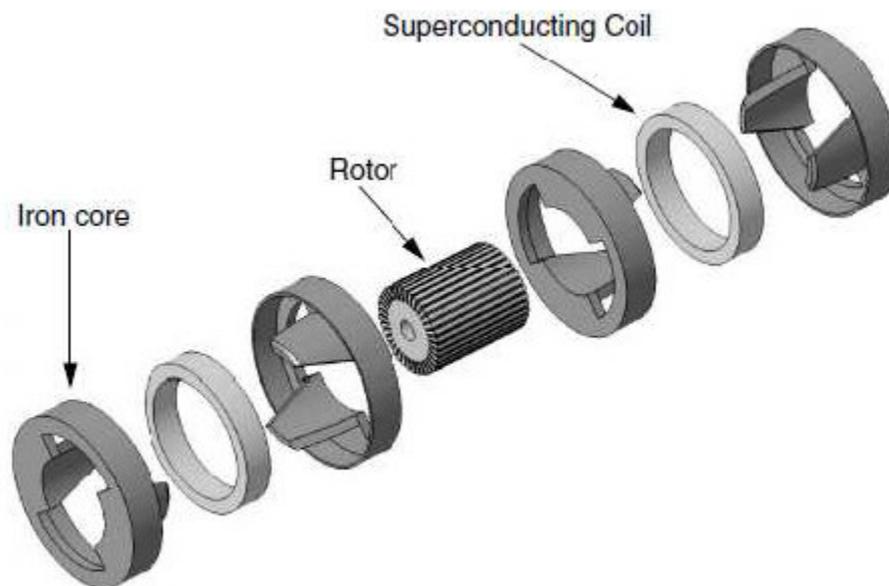


Figure. II.18. Vue éclatée de l'inducteur à griffe, Sumitomo [7].

Le premier moteur à griffes, conçu dans un partenariat entre Central Japan Railway Compagny et Musashi Institute of Technology, est envisagé pour des applications en moteur roue. Les solénoïdes sont réalisés avec du BSCCO utilisés à 40K. Il a été testé à une vitesse réduite de 300tr/min.

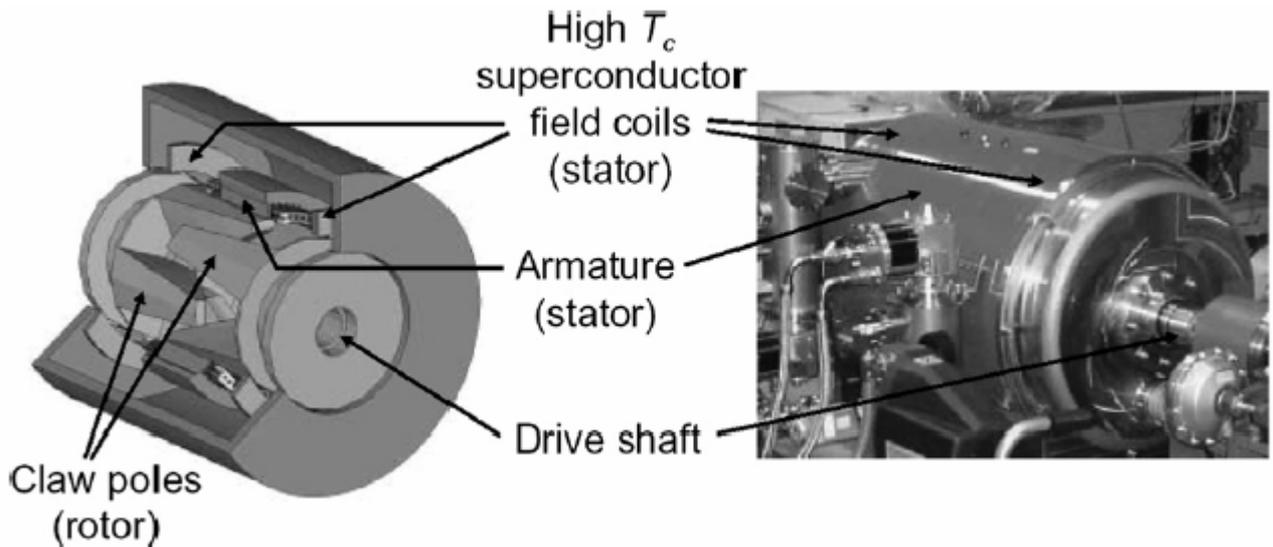


Figure.II.19.Moteur supraconducteur griffe 13.6kW-500tr/min Central Japan Railway Compagny[7]

La machine griffe conçue par Sumitomo a été réalisée dans un projet de voiture électrique supraconductrice (Fig. II.20), un condensé de technologie proposant une belle vitrine aux moteurs supraconducteurs. Une utilisation des dernières générations de BSCCO (Di-BSCCO) refroidis à l'azote liquide a permis de dimensionner un moteur de 18kW à 4500tr/min. La voiture « supraconductrice » a roulée 36km à 30km/h (Fig. II.21).

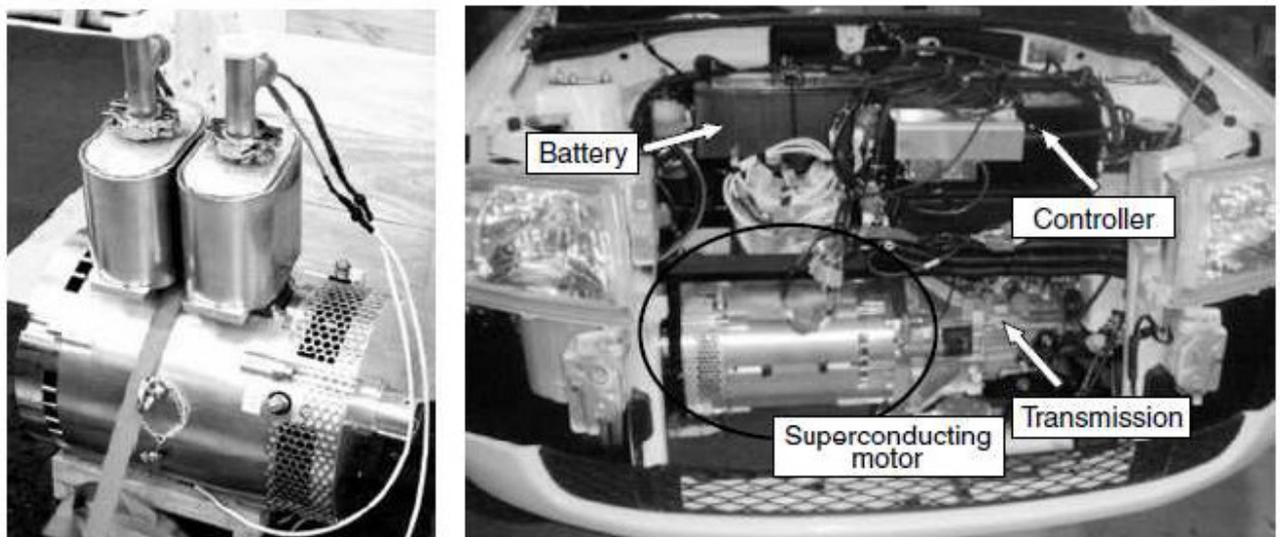


Figure. II.20. Moteur supraconducteur griffe, 18kW-4500tr/min, Sumitomo [7].



Figure. II.21. Voiture électrique supraconductrice [7].

### II.9.2. Moteur à concentration de flux

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

Les travaux menés par P. Masson, ont permis, après une étude sur la concentration de flux magnétique entre des écrans supraconducteurs, de proposer une géométrie de machine à 8 pôles (Fig. II.22).

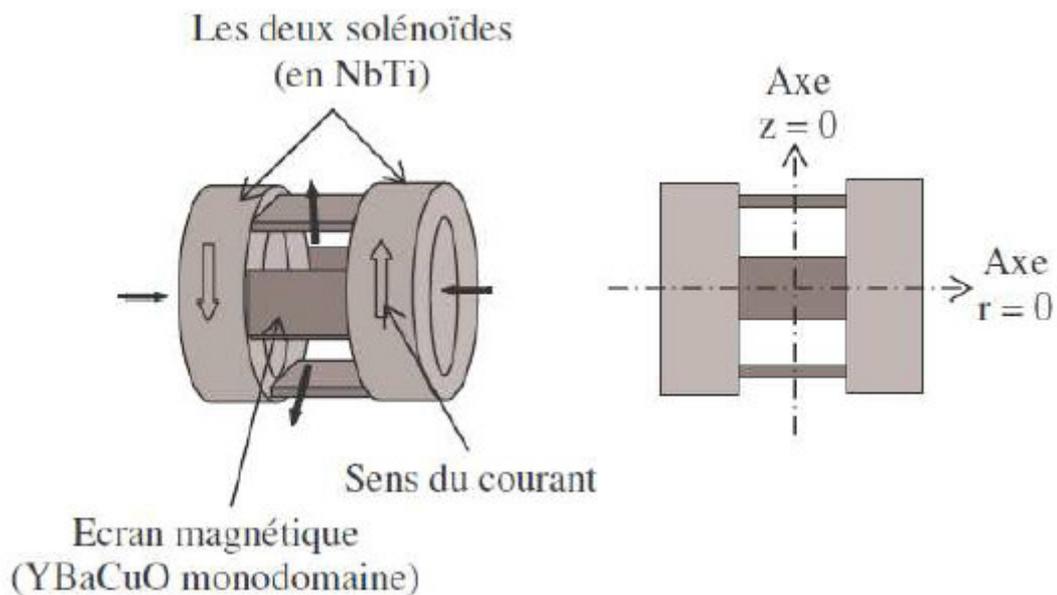


Figure. II.22. Structure de l'inducteur [7].

Les solénoïdes, bobinés en sens inverses, permettent de créer un flux magnétique axial important, qui se trouve concentré entre les plaques supraconductrices et génère une induction magnétique à forte composante radiale dans l'entrefer, supérieure à la valeur sans écrans magnétiques. Le choix des matériaux a été effectué selon les facilités du laboratoire à les obtenir. Le moteur a été totalement étudié au GREEN, du dimensionnement, à la conception pour aboutir aux essais. Ainsi, le choix s'est porté sur des bobinages en NbTi et des écrans en YBCO (Fig. II.23), l'ensemble fonctionnant à l'hélium liquide, ce qui permet d'utiliser aux mieux les propriétés de ces supraconducteurs. Ce moteur à concentration de flux magnétique a été réalisé sous forme de machine inversée, de manière à avoir une partie cryogénique fixe. Les essais moteurs (Fig. II.24) ont permis de valider ce principe, et de faire apparaître un couple massique des plus élevés en machine supraconductrice.

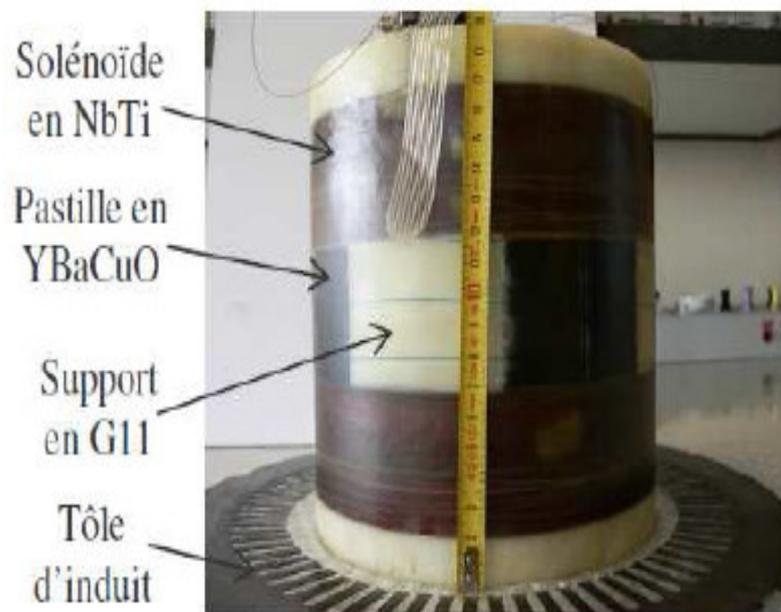


Figure. II.23. Inducteur supraconducteur réalisé [7].



Figure.II.24. Moteur supraconducteur à concentration de flux, 20kW-750tr/min [7].

Une structure utilisant des matériaux supraconducteurs massifs à flux piégé a également été proposée. Elle permet d'utiliser cette structure avec une variation « bipolaire » du champ magnétique, de l'aimantation présente dans les pastilles, au champ magnétique concentré entre ces plaques supraconductrices (de valeur opposée).

## II.10. Répartition des moteurs supraconducteurs

Pour les machines supraconductrices réalisées depuis 1990, on observe sur la figure. II.25 que les machines synchrones à pôles saillants sont le type le plus représenté, ce constat est encore plus frappant quand la puissance dépasse 100kW. Ceci s'explique par une simplicité de réalisation et de mise en oeuvre des matériaux supraconducteurs, mais également une facilité de conception qu'on peut caractériser de « cryo-copies ».

On remarque également une grande proportion des moteurs supraconducteurs à réluctance, ce chiffre élevé n'est pas à prendre en référence, les laboratoires russes ayant réalisé une gamme restreinte en puissance (500W à 10kW) comportant plusieurs rotors supraconducteurs sur une même géométrie, mais de dimensions différentes [7].

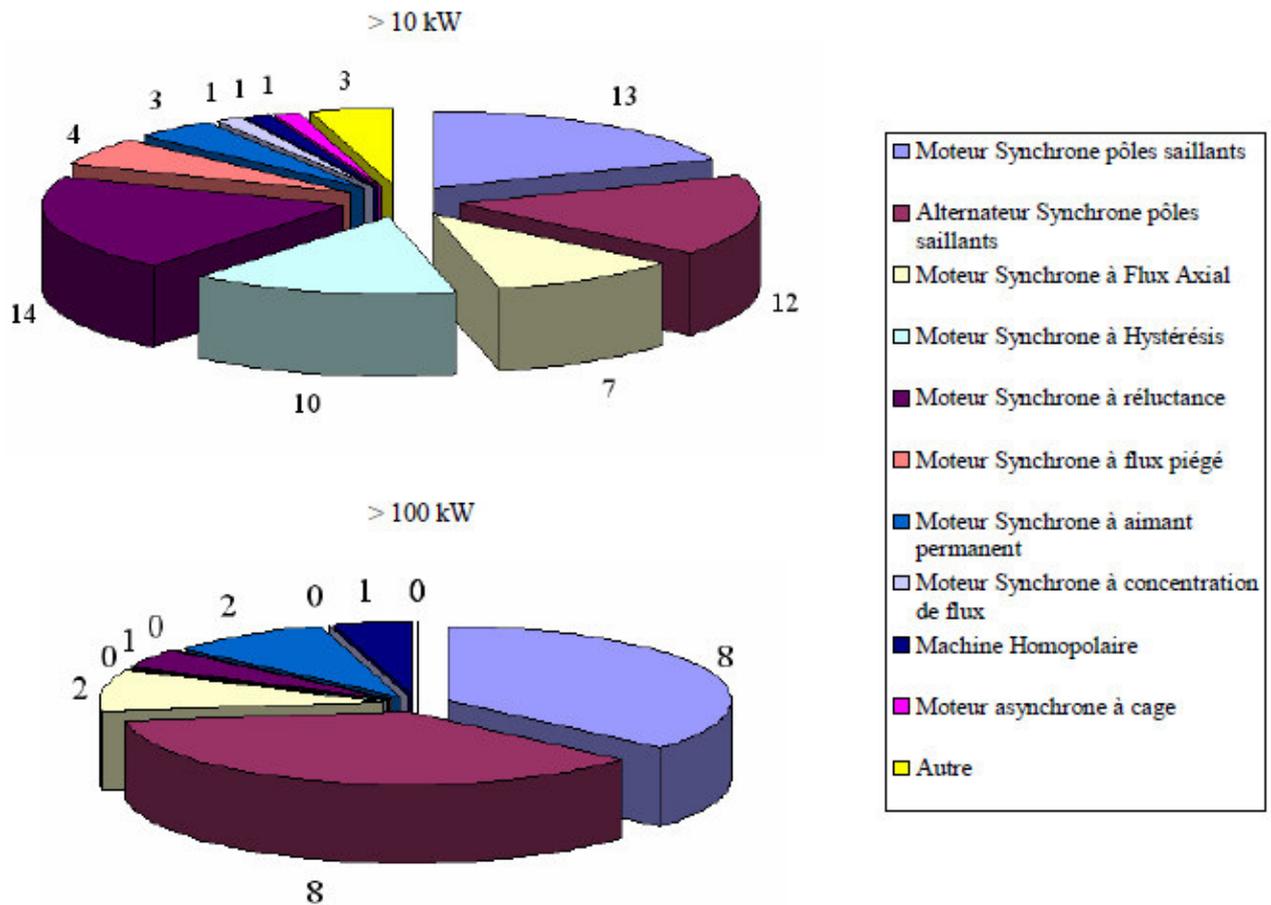


Figure. II.25. Bilan des structures de machines supraconductrices réalisées.

## II-11- Conclusion

La supraconductivité, lors de sa découverte à ouvert une nouvelle voie en ce qui concerne la conception de machines tournantes. Elle permet donc d'améliorer le rendement des machines, d'augmenter leurs couple et de démineur leur poids et volume.

### III.1. Introduction

Les dispositifs de lévitation que nous avons étudiée sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations sont de vieux concepts de la physique. Dans ce chapitre, nous allons exposer les modèles mathématiques qui caractérisent l'évolution spatio-temporelle du champ électrique, la densité de courant dans un matériau supraconducteur et nous allons exposer aussi le modèle magnétodynamique qui l'intéresse à nos études.

### III.2. Modèles de supraconducteurs

#### III.2.1 Modèle de Bean

Plusieurs modèles existent pour décrire la relation entre la densité du courant et le champ électrique dans les supraconducteurs. Le plus connu est certainement le modèle de Bean, appelé aussi le modèle d'état critique [11]. C'est au début des années 60 que C. Bean introduit ce nouveau modèle basé sur l'existence d'une densité de courant macroscopique limite, notée  $J_c$  et indépendante du champ magnétique, que le supraconducteur peut transporter.

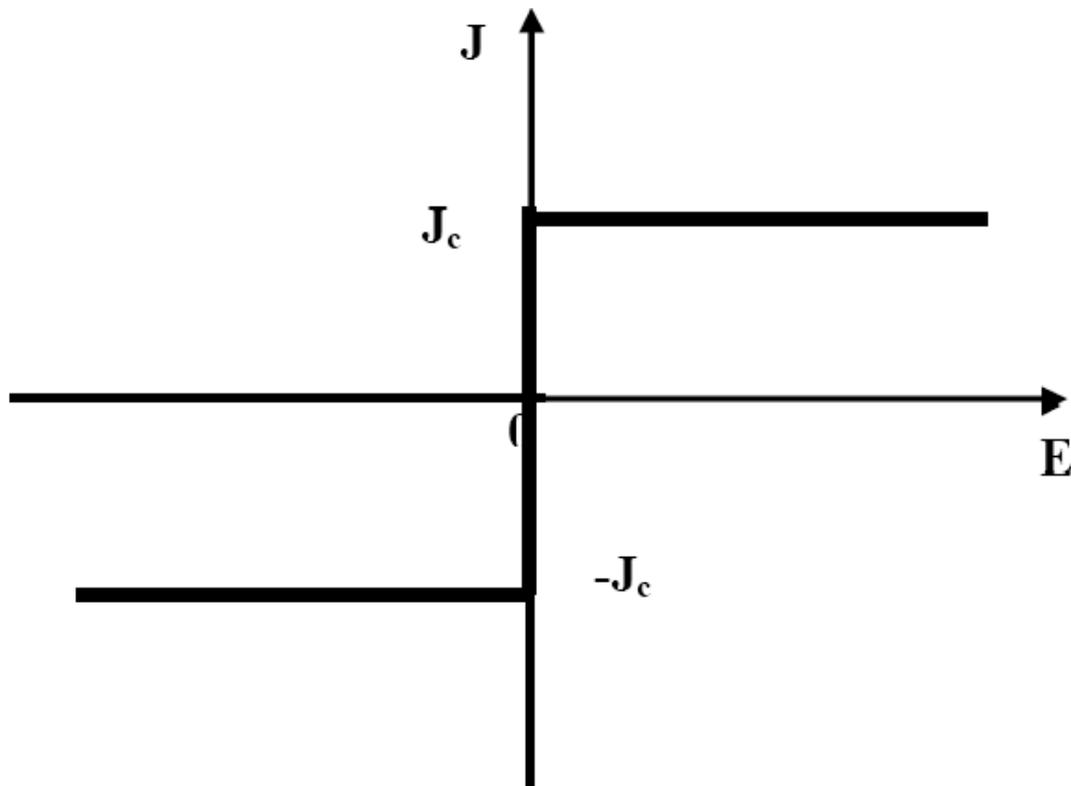


Figure .III.1 : Modèle de Bean [11].

Dans le modèle de Bean, il existe seulement deux états possibles dans le supraconducteur : un état normal où la densité de courant est nulle pour les régions où le champ magnétique ne varie pas, et une densité de courant  $\pm \mathbf{J}_c$  dans les régions qui s'opposent aux variations du champ magnétique.

Le modèle de Bean connaît un grand succès auprès des supraconducteurs à basse température et l'on y fait souvent référence dans la littérature [11].

### III.2. 2 Modèle de Flux Flow et Flux Creep

Nous pouvons définir deux modes de fonctionnement pour le supraconducteur, selon la valeur de la densité de courant critique  $\mathbf{J}_c$  :

- Si  $|\mathbf{J}| \leq \mathbf{J}_c$ , le réseau de vortex est ancré, néanmoins, des vortex passent d'un site d'ancrage à un autre sous l'action de l'agitation thermique. Ce phénomène dissipatif est appelé régime de « flux Creep » [11].

$$E = 2\rho_c J_c \sin h\left(\frac{U_0}{k\theta} \frac{J}{J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{k\theta}\right) \quad (\text{III.1})$$

$k$  : Constant de Boltzmann.

$\theta$  : Température.

$\rho_c$  : Résistivité de Flux Creep.

$U_0$  : Potentiel de profondeur.

- Si  $|\mathbf{J}| > \mathbf{J}_c$  le réseau de vortex se déplace et génère des pertes faisant apparaître une résistance électrique dans le matériau supraconducteur. Ce phénomène est appelé régime de « flux flow ».

$$E = \pm(E_c + \rho_f \cdot J_c \left(\frac{|J|}{J_c} - 1\right)) \quad (\text{III.2})$$

$\rho_f$  : Résistivité de Flux Flow.

La densité de courant critique peut alors être définie comme étant la limite entre le régime de flux creep et le régime de flux flow. Cette limite étant très floue, la densité critique de courant est souvent déterminée par la valeur d'un champ électrique critique  $\mathbf{E}_c$  [11].

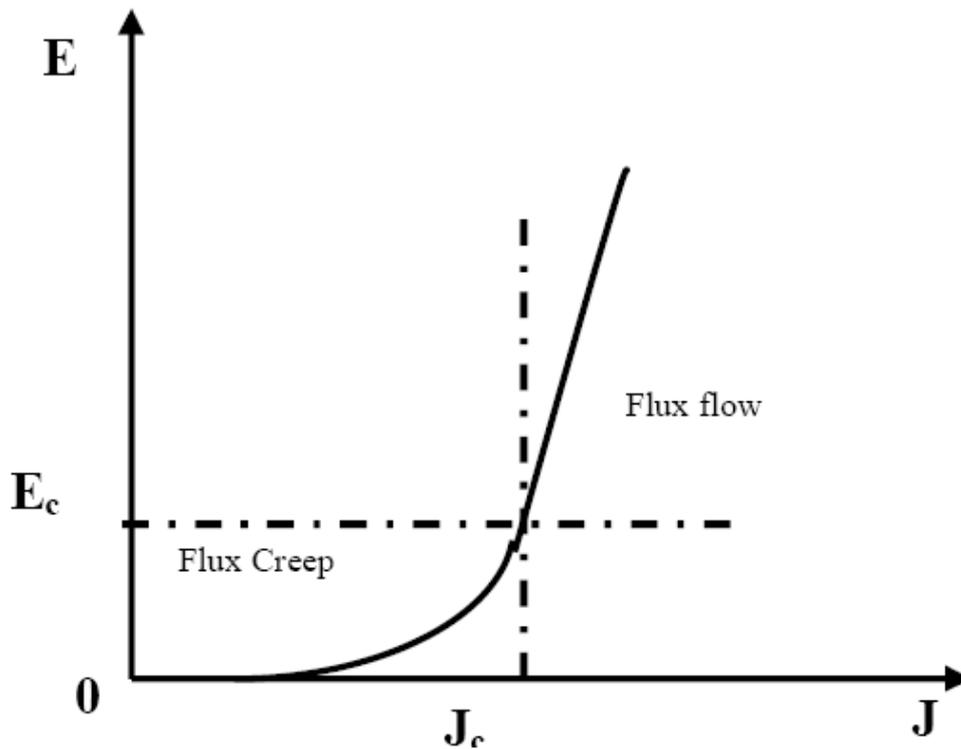


Figure. III.2. Modèle de Flux Flow et Creep [11].

### III. 2. 3 Modèle de la loi en puissance E – J

La relation qui lie la densité de courant et le champ électrique est souvent écrite sous la forme de la loi d'Ohm, c'est-à-dire  $\mathbf{E} = \boldsymbol{\rho}\mathbf{J}$ , où  $\boldsymbol{\rho}$  est la résistivité du matériau. Le principal problème dans la modélisation des SHT est la définition de la résistivité, qui n'est pas constante et engendre une loi d'Ohm non linéaire.

Le modèle de Bean et toutes ses variantes ne correspondent pas parfaitement aux caractéristiques expérimentales  $\mathbf{E}(\mathbf{J})$  des matériaux SHT, qui sont mieux décrites par des relations du type loi en puissance.

Dans ce modèle de loi en puissance, le champ électrique  $\mathbf{E}$  est proportionnel à la densité de courant  $\mathbf{J}$  élevée à la puissance  $n$  de la façon suivante :

$$E = E_c \left( \frac{|j|}{j_c} \right)^n \frac{J}{|J|} \quad (\text{III.3})$$

$n$  : Raideur de transition (varie entre  $n = 1$  et  $n \rightarrow \infty$ ).

Il faut rappeler que dans le cas des applications du génie électrique, les matériaux supraconducteurs utilisés sont caractérisés par des densités de courant critique  $\mathbf{J}_c$  élevées, alors il s'agit du régime flux creep. Dans ce cas, on a tendance à utiliser ce modèle qui décrit bien ce régime, d'ailleurs c'est la confrontation de ce modèle avec des relevés expérimentaux de la caractéristique  $\mathbf{E}-\mathbf{J}$  des SHTc qui a confirmé l'exactitude de ce modèle. De plus, ce modèle peut

prendre en compte l'effet thermique sur le comportement magnétique des SHTc par la dépendance en température de diverses grandeurs caractéristiques du SHTc, tels que, la densité de courant critique  $J_c$  et l'exposant en puissance  $n$  [11].

### III. 3. Équation de Maxwell.

Michael Faraday fait plusieurs travaux sur le champ électromagnétique, après ça en (1831-1879) J. C. Maxwell apporté ces travaux à l'aide d'un formalisme mathématique abstrait, il pose les quatre équations différentielles qui décrivent l'évolution mutuellement dépendante des champs électriques et magnétiques dans l'espace et dans le temps. Et il établit la relation mathématique qui décrit les propriétés physiques communes aux champs électrique et magnétique. Aujourd'hui ces équation est la base de l'électromagnétisme :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lois de Faraday}) \quad (\text{III.4})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Lois d'Ampère}) \quad (\text{III.5})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Lois de la convection}) \quad (\text{III.6})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{Théorème de Gauss}) \quad (\text{III.7})$$

Tels que :

$\vec{E}$  : Champ électrique en  $[V \cdot m^{-2}]$ .

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

$\vec{B}$  : Induction magnétique en  $[T]$ .

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  : Vecteur densité de courant de déplacement, négligeable aux basses fréquences  $[A \cdot m^{-2}]$

$\vec{J}_c$  : Densité de courant de conduction en  $[A \cdot m^{-2}]$

$\rho$  : Densité de charge électrique en  $[C \cdot m^{-2}]$

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leurs joindre des relations qui traduisent le rendement des milieux à étudier [3]:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Ou} \quad \vec{H} = \nu \vec{B} \quad (\text{III.8})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{III.9})$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.10})$$

$\sigma$  : Conductivité électrique en  $[\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$ .

$\mu$  : Perméabilité magnétique en  $[\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$ .

$\varepsilon$  : Permittivité en  $[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$ .

$\nu$  : Réductivité magnétique en  $[\text{m} \cdot \text{H}^{-1}]$ .

L'équation (III.9) est définie dans un milieu diélectrique et l'équation (III.10) est définie dans un milieu conducteur, mais dans un milieu supraconducteur la relation entre le champ électrique et la densité du courant électrique est non linéaire, c'est-à-dire

$$\vec{J}_c = \sigma(\mathbf{E}) \vec{E} \quad (\text{III.11})$$

### III. 4. Formulation des Équations électromagnétiques

Les modèles de J. C. Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables.

Les équations se découpent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons: le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique magnétodynamique. Dans le cadre de notre travail, seul le modèle magnétodynamique seront considérés [3].

#### III. 4.1 Modèle électrostatique

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas de temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce faite le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps [3].

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{III.12})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{III.13})$$

$$\text{rot } \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{III.14})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{III.15})$$

On a :

$$\vec{E} = \overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{III.16})$$

$$\text{div}(\epsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{III.17})$$

#### II.4.2. Le modèle électrocinétique

Il est utilisable lorsque l'on veut étudier la répartition du courant électrique dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues.

Le modèle est défini par les équations suivantes :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (\text{III.19})$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.20})$$

L'équation (III.18) implique qu'il existe un potentiel électrique scalaire  $V$  tel que :

$$\vec{E} = \overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{III.21})$$

Ce potentiel est appelé la tension électrique, on aura donc à résoudre :

$$\text{div}(\sigma \overrightarrow{\text{grad}} V) = 0 \quad (\text{III.22})$$

Ce modèle pose peu des problèmes et la technique actuelle permet de le traiter même dans les cas tridimensionnels complexes.

Dans le cas où le conducteur n'est plus soumis à des différences de potentiel continu, ce modèle n'est plus valable, car la variation du champ magnétique crée des courants induits qui modifient la répartition du courant global dans le conducteur.

#### III. 4.3. Modèle magnétostatique

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  Dans ce modèle, le terme est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent [3]:

##### **Modèle magnétostatique scalaire**

Dans ce cas, les courants électriques sont nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps, on obtient [3]:

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{0} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.24})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.25})$$

$\vec{H}$  Dérive d'un potentiel scalaire magnétique  $\Phi$ , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que :  $\vec{H} = -\overrightarrow{\text{grad}}\Phi$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{div} (\mu \overrightarrow{\text{grad}}\Phi) = 0 \quad (\text{III.26})$$

### Modèle magnétostatique vectorielle

Dans ce modèle, les courants électriques ne sont pas nuls. Il vient alors que [3]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.27})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.28})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.29})$$

La relation  $\text{div} \vec{B} = 0$ , permet de définir une fonction vectorielle  $\vec{A}$  appelée potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{III.30})$$

D'où le système d'équation :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\mu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{j} \quad (\text{III.31})$$

En tenant compte des relations de l'analyse vectorielle l'équation (III.31) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\mu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}}v \times \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} + \mu \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} = \overrightarrow{\text{grad}}v \times \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} + \mu(-\Delta \vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}} \text{div} \mu \vec{A})$$

Dans notre travail on utilise la Jauge de coulomb ( $\text{div} \vec{A} = 0$ ) on obtient alors :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\mu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}}v \times \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} - \mu \Delta \vec{A} = \overrightarrow{\text{grad}}v \times \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} - \mu(\text{div} \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{A}$$

L'équation précédente devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\mu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = -(\text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}})) \vec{A} = \vec{j} \quad (\text{III.32})$$

### III. 4.4. Modèle Magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme qui représente la variation temporelle de vectrice induction magnétique est non nul, ainsi, les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants de Foucault [3].

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques, des dispositifs de chauffage par induction, des transformateurs, ... etc.

En se basant sur les équations de J. C. Maxwell, on peut formuler l'équation qui décrit l'évolution spatiale - temporelle des phénomènes électromagnétiques.

Il existe plusieurs formulations en électromagnétisme. Parmi ces formulations, on a choisie la formulation en champ électrique  $\vec{E}$  [3].

En termes d'équations, nous avons :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.33})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.34})$$

A ces équations, nous ajoutons les lois caractéristiques du milieu :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.35})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{III.36})$$

Pour les milieux conducteurs :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Avec } \sigma = \text{cte} \quad (\text{III.37})$$

Et pour les milieux supraconducteurs, il existe plusieurs modèles qui lient le champ électrique avec la densité du courant électrique. Parmi ces modèles, nous avons utilisé le modèle en puissance  $E(J)$ .

Le modèle magnétodynamique est défini par l'équation suivante dans un milieu supraconducteur (il existe plusieurs formulations en électromagnétisme). Parmi ces formulations on choisit la formulation en potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  .

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\mu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{J} \quad (\text{III.38})$$

$$\text{Avec : } \vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_S \text{ et } \vec{J}_S = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}} v \right)$$

Donc (III.18) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\mu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{J}_C - \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}} v \right) \quad (\text{III.39})$$

### **III. 5. Différents méthode de résolution des équations aux dérivées partielles**

#### **III. 5. 1. Méthode des Différences Finis (MDF)**

C'est la méthode la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage des nœuds dont la finesse permet de donner approximation des contours du domaine. En suite en appliquant le développement limité de série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égale au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

La solution par une des méthodes connues permet la connaissance, en chaque maille du domaine, la valeur de la variable étudiée.

Cependant, les méthodes utilisées dans la résolution des systèmes d'équations issus de la méthode des différences finies ne s'adaptent pas très bien à la modélisation de système de francs complexes et sont toujours obérées par la nécessité de prendre en compte les conditions d'interfaces. Elle est petite à petite supplantée par la méthode des éléments finis [12].

#### **III. 5. 2. Méthode des Eléments Finis (MEF)**

Cette méthode, utilisée depuis longtemps en mécanique. Elle a été introduite en électromagnétisme par P. Silvestre et M.V.K. Chari en 1970.

Elle a connu depuis, un développement considérable dans ce domaine, grâce aux rapports successifs des équipes universitaires de MC Gill au Canada, Rut Herford en grande Bretagne et Grenoble en France et par quelques grands laboratoires industriels de recherches.

Le principe fondamental de cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en régions élémentaires (élément finis) et à représenter l'inconnue par une approximation polynomiale dans chacun de ces régions, l'erreur due à approximation doit être minimisé.

La MEF est actuellement utilisé avec succès pour résoudre les problèmes électromagnétiques parce qu'elle est très puissante et s'adapte aux géométries complexes. Par contre sa mise en œuvre est assez compliquée et demande une place mémoire assez importante [12].

#### **III. 5.3. Méthode des circuits couplés (MCC)**

Deux systèmes sont dits être analogiques lorsqu'ils obéissent aux mêmes équations et aux conditions aux limites identiques. Cela signifie que l'équation traduisant un des systèmes peut être transformée, pour exprimer le deuxième système, par simple changement des symboles et des différentes variables.

La base de la méthode des circuits couplés, est de faire l'analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques. Elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en spires élémentaires. Par application des lois de Kirchhoff à ces circuits élémentaires, on peut calculer la distribution des variables en question [12].

### III. 5. 4 Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation. Elle est utilisée, en particulier en mécanique des fluides où elle est apparue il y a une vingtaine d'années. Depuis, la méthode des volumes finis a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme ...etc.

La méthode des volumes finis se déduit à partir de la méthode des éléments finis. Le domaine d'étude ( $\Omega$ ) est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (Fig. III.3). L'EDP est intégrée sur chacun des volumes élémentaires.

Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire (Fig. III. 4), la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle,...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

Après la discrétisation des EDP, on arrive à construire un système d'équation algébrique qui va être résolu par une des méthodes connues [12].

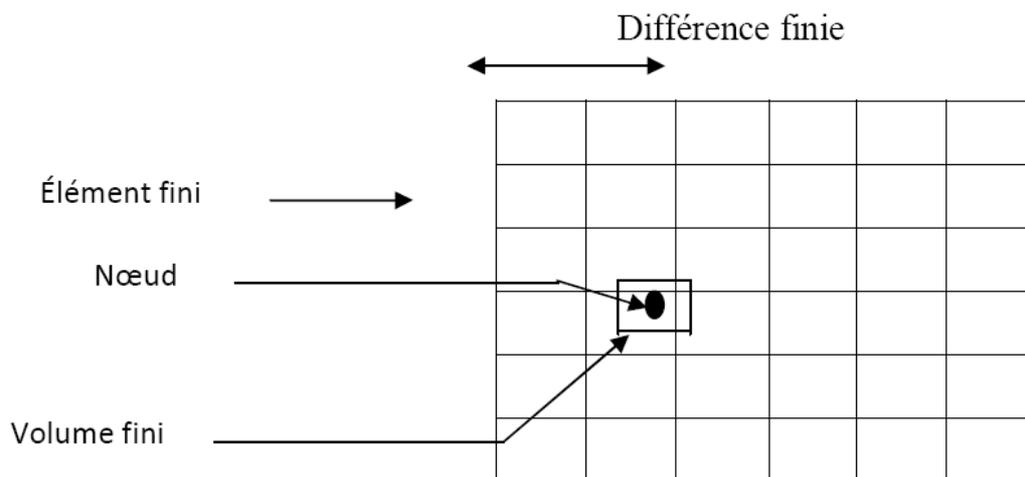


Figure. III.3. Maillage du domaine d'étude en volume finis [12].

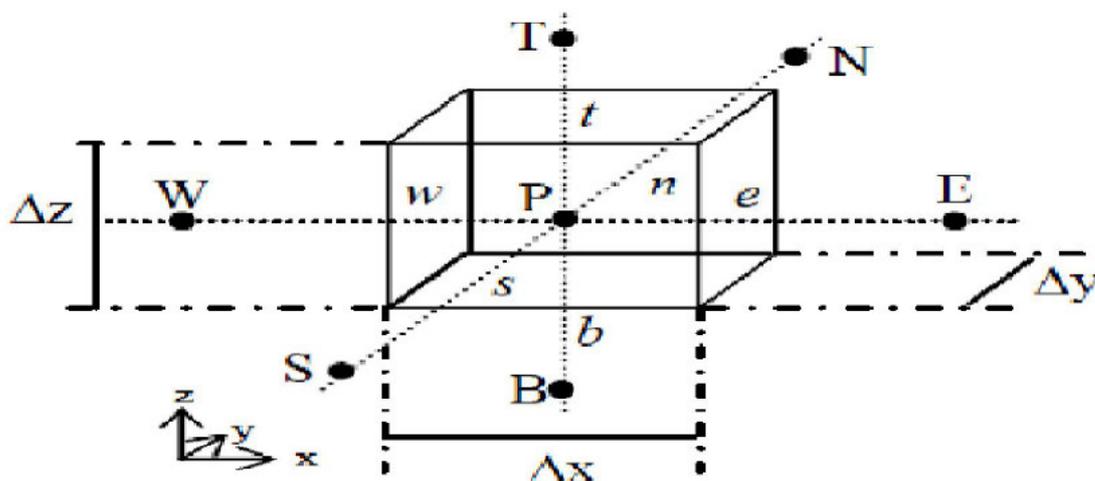


Figure. III.4. Volume Elémentaire [12].

### III. 6. Méthodes numériques de résolution

#### III. 6. 1. La méthode d'Euler

La méthode la plus simple, à laquelle nous nous limiterons, est la méthode d'Euler. Cette méthode fait intervenir un paramètre  $\theta$  compris entre 0 et 1 [13].

Pour  $\theta = 0$ , la méthode est explicite. Elle nécessite de choisir un pas de temps  $\Delta t$  suffisamment petit sinon la solution devient instable. Pour  $\theta = 1$ , la méthode est implicite, elle est inconditionnellement stable [14]. Pour cette raison et après plusieurs tests numériques, elle semble être un bon compromis entre rapidité de convergence du processus itératif et stabilité numérique. Avec cette méthode ( $\theta = 1$ ), la solution est obtenue implicitement comme solution d'un système non linéaire que l'on va résoudre par la méthode de Gauss-Seidel non linéaire.

Ce système est tel que :

$$[M] \begin{bmatrix} \frac{A^{m+1} - A^m}{\Delta t} \\ \frac{V^{m+1} - V^m}{\Delta t} \end{bmatrix} + [N] \begin{bmatrix} A^{m+1} \\ V^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s((m+1)\Delta t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

$$[C] \begin{bmatrix} \frac{T^{m+1} - T^m}{\Delta t} \end{bmatrix} + [K] [T^{m+1}] = [Q((m+1)\Delta t)] \quad (III.41)$$

#### III. 6. 2. La méthode de Gauss-Seidel

Après discrétisation des équations aux dérivées partielles des phénomènes électromagnétiques et thermiques par la méthode des volumes finis, le problème se ramène à l'inversion de systèmes d'équations matricielles (III.40) et (III.41). Du fait que ces systèmes sont souvent de grandes tailles, il devient alors impossible de les inverser par une méthode directe. D'où la nécessité d'utiliser des méthodes de résolution itératives. Ces méthodes sont particulièrement utilisées pour la résolution des systèmes ayant des matrices de rang élevé, comportant de nombreux éléments nuls (matrice creuses), ils font passer d'un estimé  $X(k)$  de la solution à un autre estimé  $X(k+1)$  de cette solution.

Parmi ces méthodes nous avons utilisée la méthode de Gauss-Seidel. Cette méthode consiste à transformer le système algébrique, comme par exemple,  $[B] [X] = [D]$  en :

$$X_i^{(k+1)} = \left[ d_i - \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} X_j^{(k+1)} - \sum_{j=(i+1)}^n b_{ij} X_j^k \right] / b_{ij} \quad (III.42)$$

$i=1, \dots, n$

En donnant aux inconnues des valeurs arbitraires initiales  $X_i^0$  Le processus sera arrêté si

$$|X_i^{k+1} - X_i^k| < \varepsilon \quad (III.43)$$

Dans le cas d'une précision absolue est :

$$\frac{|x_i^{K+1} - x_i^K|}{|x_i^K|} < \varepsilon \quad (\text{III.44})$$

Dans le cas d'une précision relative. ( $\varepsilon$  est la précision imposée par l'utilisateur).

### III. 6. 3 Formule des trapèzes

Il est naturel d'espérer une valeur plus exacte de l'intégrale définie si l'on remplace la courbe donnée par une ligne brisée inscrite [15]. On prend alors au lieu de l'aire des trapèzes curviligne  $aABb$  la somme des aires des trapèzes rectangles dont les cordes  $AA_1, AA_2, \dots, A_{m-1} B$  figurant parmi les côtés. Les aires de ces trapèzes étant successivement :

$$\frac{y_0 + y_1}{2} \Delta x, \frac{y_1 + y_2}{2} \Delta x, \dots, \dots, \frac{y_{m-1} + y_m}{2} \Delta x$$

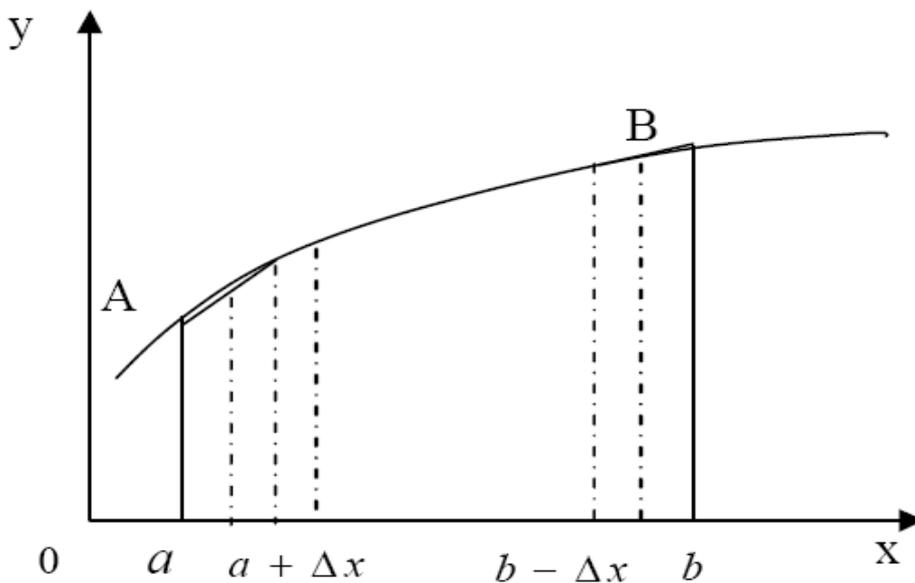


Figure. III. 5. Aires des trapèzes [15].

$$\int_a^b f(x) \approx \frac{b-a}{m} \left( \frac{y_0 + y_m}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_m \right) \quad (\text{III.44})$$

La formule (III.44) est la formule des trapèzes.

Le nombre  $m$  est pris arbitrairement. Plus  $m$  est grand alors, les segments  $\Delta x$  sont petits, plus est précise l'approximation fournie par l'expression du second membre de l'égalité approchée.

Nous utilisons cette méthode pour déterminer les intégrales des formules de l'induction et le potentiel de l'aimant dans l'espace sans obtenir leurs solutions analytiques.

### III.7. Logiciels utilisés

#### III.7.1. Présentation du logiciel FEMM

##### **Définition :**

FEMM (Finite Element Method Magnetics) est un logiciel des éléments finis 2D cartésien et 2D axisymétrique dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques dans le domaine des basses fréquences.

##### **Constitution :**

Il est constitué de trois modules principaux :

- Un module "Pré-processeur et Post-processeur". Ce module permet, au travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points clefs que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au format DXF. Ce module intègre également des outils de post-traitement : visualisation et différents calculs inhérents au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc...)
- Un module de maillage (logiciel Triangle) qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.
- Un module de résolution par éléments finis : ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique linéaires et non linéaires, de magnétodynamique en régime harmonique linéaires et non linéaires et de thermique en stationnaire.

Il peut être utilisé sans interface graphique au travers du langage script "LUA".

##### **Autres fonctionnalités :**

Ce logiciel est dédié aux problématiques du génie électrique : ses menus utilisent le vocabulaire du domaine et il possède un ensemble de pré et de post-traitement dédié à ces problématiques (introduction de la courbe  $B(H)$  pour les matériaux magnétiques non linéaires, conditions de périodicité, calcul des pertes par effet Joule, visualisation des champs électromagnétiques, calcul de forces électromagnétiques, etc ....). Il est possible de mettre en place un couplage magnétique-thermique via le langage script LUA. Par contre il ne possède pas de techniques permettant la prise en compte du mouvement dans les actionneurs électro-mécaniques (par exemple mouvement du rotor par rapport au stator). Il contient une bibliothèque de matériaux magnétiques [16].

### III.7.2. Logiciel Flux

#### Présentation du logiciel Flux

Le logiciel « Flux », développé par la société Cedrat, et distribué en Suisse par la société Applied Magnetics, est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.) destiné à l'électrotechnique, permettant de modéliser des phénomènes électromagnétiques bidimensionnels ou tridimensionnels par la méthode des éléments finis [17]. Il comprend :

- un descripteur géométrique.
- un descripteur des propriétés physiques.
- un mailleur automatique.
- un solveur.
- un module d'exploitation des résultats.

#### Flux-2D :

Le logiciel Flux-2D a été conçu et réalisé en 1981 par le laboratoire d'électrotechnique de Grenoble. Il est utilisé par les principaux constructeurs de matériel électrique. Développé au départ pour les applications électrostatiques et magnétostatiques, il comprend aujourd'hui 20 modules qui permettent d'aborder l'ensemble des problèmes qui se posent lors de la conception d'un appareil électromagnétique. En particulier, la notion de couplage entre les équations de champ et les équations de circuit extérieur permettent de simuler le fonctionnement d'un moteur alimenté sous une tension donnée au stator et tenir compte de l'effet de fermeture des anneaux de court circuit au rotor. La possibilité de simuler également le mouvement du rotor en fonction du temps et de la tension d'alimentation permet d'étudier l'effet des couples instantanés au-delà du couple moyen calculé par les méthodes classiques [18].

### III.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des modèles utilisés dans un milieu supraconducteur, et nous avons travaillé dans le modèle magnétodynamique et leur équation.

Dans ce qui suit nous passerons à la modélisation d'une machine asynchrone par les logiciels Femm 4.2 et Flux-2D 11.2.

### IV.1. Introduction :

Les matériaux supraconducteurs peuvent être utilisés dans le domaine génie électrique pour les différentes applications, tel que lévitation magnétique, la création d'un champ magnétique. Dans cette dernière application, on utilise ce type de matériaux dans les champs magnétique élevé. Les résultats à caractère magnétique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir d'un code numérique bidimensionnel développé et implémenté sous l'environnement machines électriques grâce à propriété remarquable des supraconducteurs est celle du pouvoir piégé un champ magnétique élevé. Cette propriété remarquable permet d'envisager l'utilisation des supraconducteurs dans les machines électriques.

Le chapitre suivant a pour objectif de modéliser le comportement magnétodynamique un matériau supraconducteur utilisé dans la machine électrique comme isolant magnétique. Ce dernier qui permet de canaliser les lignes de champ pour subir un FEMM et Flux-2D.

L'objectif principal de ce chapitre est de montrer la valeur du champ d'induction magnétique créée par insertion des matériaux supraconducteurs dans la machine d'une part et d'autre part de montrer l'influence de l'effet magnétique sur le comportement magnétique de la machine. Cette étude est appliquée sur la machine asynchrone qui possède 4 pôles.

### IV.2. Résultats et simulations :

Afin de montrer l'influence des matériaux supraconducteurs (Effet diamagnétique des supraconducteurs) sur la répartition du champ magnétique au sein de la machine, ainsi sur le comportement de la machine. Nous avons modélisé l'ensemble des phénomènes électromagnétique produites au sein de la machine dans les deux cas suivants :

- La machine n'ayant pas de supraconducteurs à haute température critique (SHTc),
- La machines est doté de supracondcuteurs à haute température critique.

La comparaison entre la répartition des champ au sein de la machine dans les deux cas, permet de vérifié l'intérêt des supracondcuteurs dans les machines électriques.

Dans la partie ci-dessous nous présentons les résultats de simulation de la machine obtenus à partir du FEMM et du Flux 2D. Des résultats à caractère électromagnétique seront largement présentés.

### IV.2.1. Résultats des simulations obtenus à partir de FEMM :

Dans son origine, le FEMM est un logiciel dédié à la modélisation des phénomènes électromagnétique aux seins des machines électrique. Dans ce type de problème, l'ensemble des matériaux sont soit à caractère magnétique ou à caractère amagnétique. Pour traiter notre problème qui contient aussi des matériaux diamagnétique, nous avons supposé que le supraconducteur est caractérisé par une conductivité ( $\sigma$ ) très élevé. Ceci peu traduire de façon satisfaisante le rôle du diamagnétisme parfait. Différentes valeurs de  $\sigma$  a été introduites dans nos simulation, ces valeurs sont respectivement :  $10^{14} \text{S.m}^{-1}$ ,  $10^{15} \text{S.m}^{-1}$ ,  $10^{16} \text{S.m}^{-1}$ .

#### IV.2.1.a. Model de la machine sans SHTc :

La figure IV. 1 représente la répartition spatiale du champ d'induction magnétique **B** au sein de la machine.

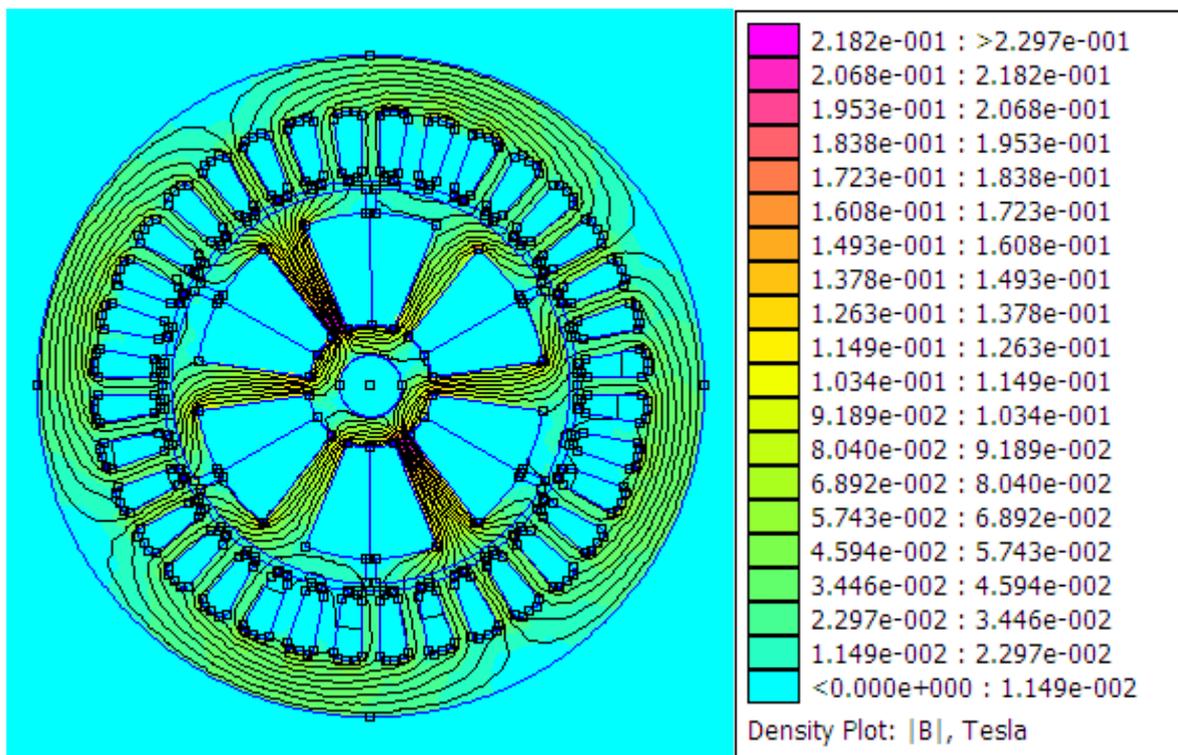


Figure IV.1 Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine n'ayant pas de SHTc

**IV.2.1.b. Model de la machine avec SHTc :**

De même et dans le but de mener une étude comparative entre les deux modèles, nous avons modélisé le comportement de la machine doté de SHTc. La pastille supraconductrice ayant une forme qui doit s'adapté à la forme du stator et du rotor, celle-ci est représentée dans la figure IV.

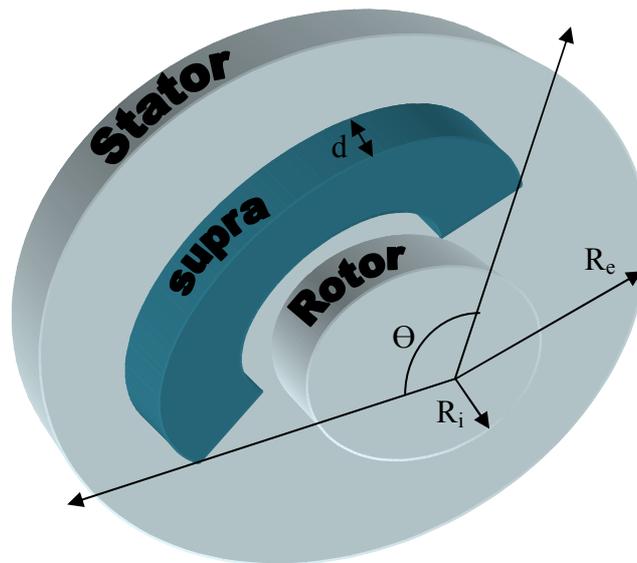


Figure IV.2. Géométrie de la pastille supraconductrice utilisée pour écrantage.

Les propriétés magnétiques, électriques et géométriques sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau. IV.1. Propriétés magnétiques, électriques et géométrique de la pastille supraconductrice.

Les propriétés géométriques	Les propriétés électriques	Les propriétés magnétiques
$R_i = 23 \text{ mm}$	$U = 380 \text{ V}$	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$
$R_e = 24.5 \text{ mm}$	$I = 1 \text{ A}$	$\mu = 1 \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$
$d = 1 \text{ mm}$	$P = 450 \text{ W}$	$\mu_r = 1500 \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$
		$\sigma = 10^{14} \text{ [S.m}^{-1}\text{]}$

Les figures ci-dessous représentent la variation spatiale du champ d'induction magnétique  $B$  au sein de la machine doté de SHTc.

Différentes valeurs de la conductivité électriques ont été introduites, ceci pour voir à partir de quelle valeur l'effet diamagnétique apparait. Les valeurs prises sont respectivement

$$\sigma = 10^{14} \text{ S.m}^{-1}, 10^{15} \text{ S.m}^{-1}, 10^{16} \text{ S.m}^{-1}.$$

Aussi, pour étudier l'effet des propriétés géométriques sur le comportement magnétique de la machine, nous avons pris différentes valeurs de l'angle  $\theta$  (voir Figure IV.2). Trois valeurs ont été prises en compte qui sont respectivement,  $\theta = 30^\circ, 50^\circ$  et  $80^\circ$ .

La figure IV.3. Représente la variation spatiale du champ d'induction magnétique  $B$  au sein de la machine pour une conductivité électrique  $\sigma = 10^{14} \text{ S.m}^{-1}$  et pour un angle  $\theta = 30^\circ, 50^\circ$  et  $80^\circ$ . De même, nous avons représenté cette répartition du champ  $B$  au sein de la machines mais pour  $\sigma = 10^{15} \text{ S.m}^{-1}$  et  $\sigma = 10^{16} \text{ S.m}^{-1}$ , avec les mêmes angles que précédemment qui sont respectivement,  $\theta = 30^\circ, 50^\circ$  et  $80^\circ$  présentés dans les figures IV.4 et IV.5.

On comparant les résultats présentés dans les figures IV.3, IV.4 et IV.5, on peut dire qu'il n'existe pas une différence entre les résultats obtenus pour les différentes valeurs de  $\sigma$ , cela veut dire que la valeur de  $\sigma = 10^{14} \text{ S.m}^{-1}$  suffit pour traduire l'effet diamagnétique des supraconducteurs.

Selon les résultats présentés dans les figures IV.3, IV.4 et IV.5, la répartition du champ magnétique ne semble pas influée par l'angle  $\theta$ . Cela veut dire que les dimensions de la pastille supraconductrice n'influent pas sur la répartition du champ magnétique.

Pour vérifier l'efficacité d'implémenté des pastilles supraconductrices au sein de la machine, nous avons comparé la répartition du champ magnétique à l'intérieur de la machine dans les deux cas, avec et sans pastille. Cette comparaison est présentée dans la figure IV.6. La comparaison entre les résultats mène à dire qu'il n'existe pas vraiment une différence entre la machine dotée de pastille supraconductrice ou non, en effet le maximum du champ magnétique à l'intérieur de la machine n'ayant pas de supraconducteur atteint la valeur de  $2.182 \times 10^{-1} \text{ T}$  alors qu'il est presque de  $2.187 \times 10^{-1} \text{ T}$  dans la machine doté de SHTc.

Nous concluons alors (selon les résultats obtenus à partir du logiciel FEMM), qu'il n'existe pas une différence entre la machine n'ayant pas de pastille supraconductrice et une machine dotée de supraconducteur. Ceci peut vraiment traduire la réalité physique de la chose, où bien cela est du au modèle choisi. Celui-ci suppose que le supraconducteur se comporte comme un matériau diamagnétique.

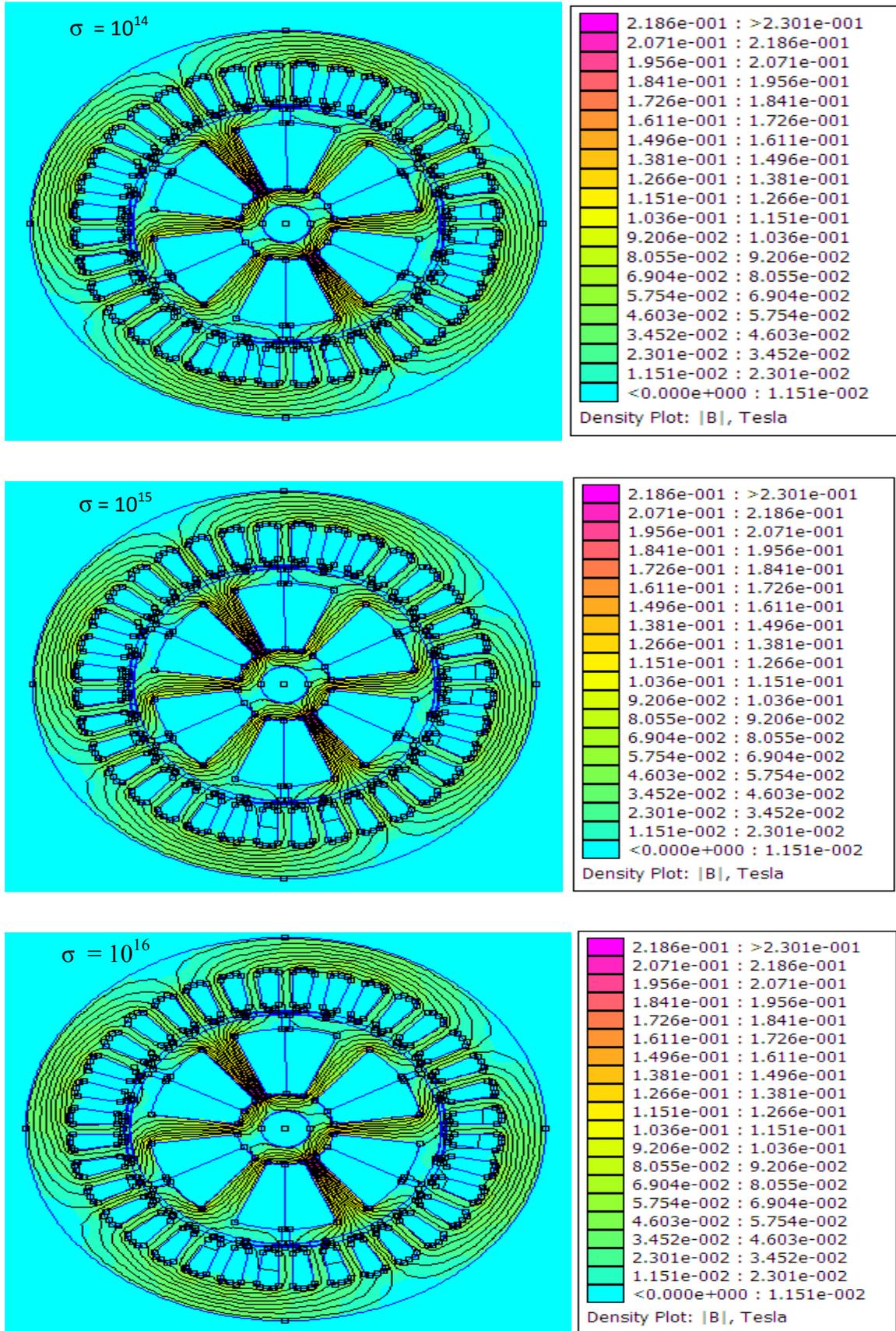


Figure IV.3. Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine doté de SHTc pour  $\theta = 30^\circ$  et pour  $\sigma = 10^{14}$  S.m<sup>-1</sup>,  $10^{15}$  S.m<sup>-1</sup>,  $10^{16}$  S.m<sup>-1</sup>.

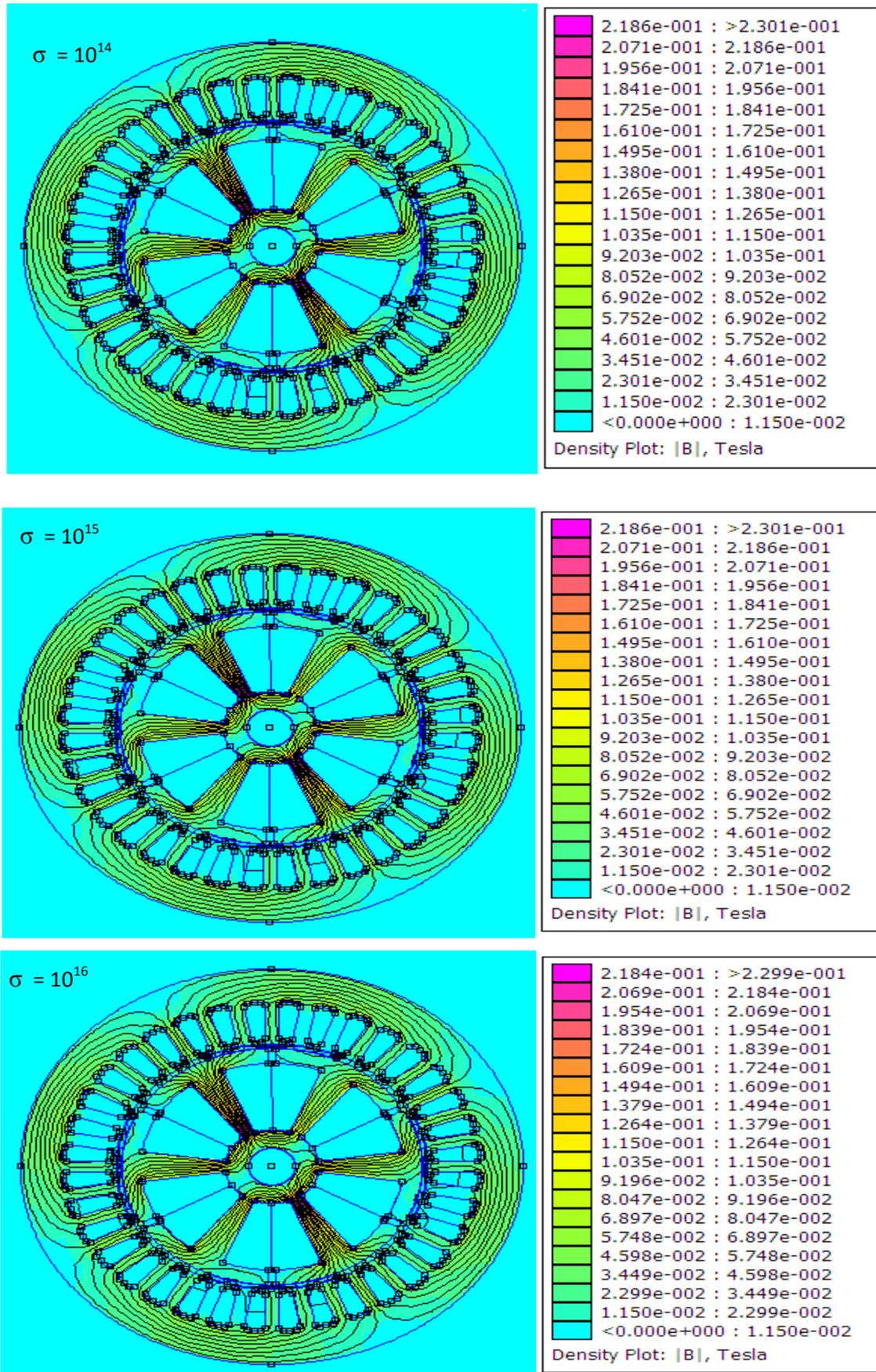


Figure IV.4. Variation spatiale du champ d'induction magnétique  $B$  au sein de la machine dotée de SHTc pour  $\theta = 50^\circ$  et pour  $\sigma = 10^{14} \text{ S.m}^{-1}$ ,  $10^{15} \text{ S.m}^{-1}$ ,  $10^{16} \text{ S.m}^{-1}$ .

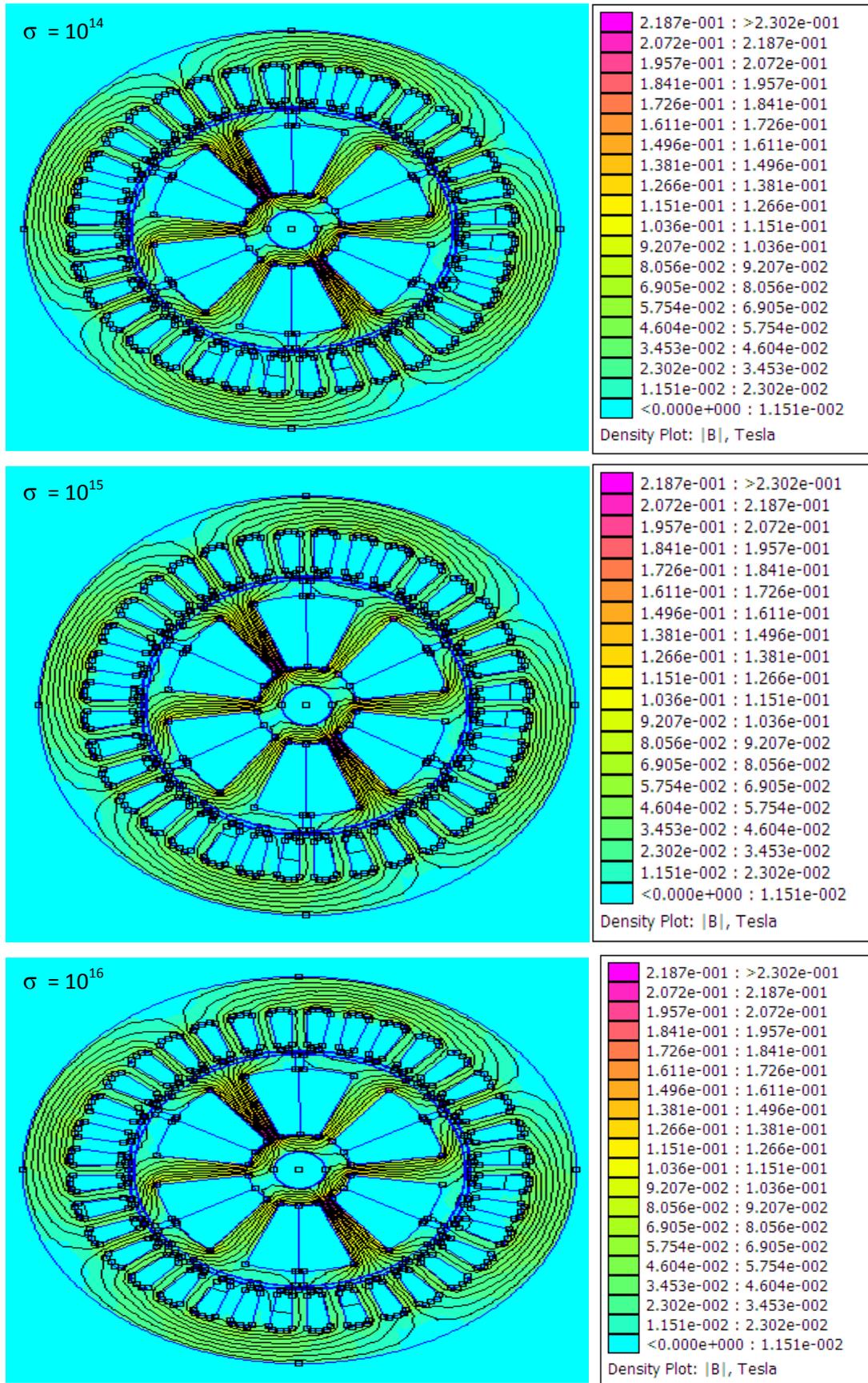
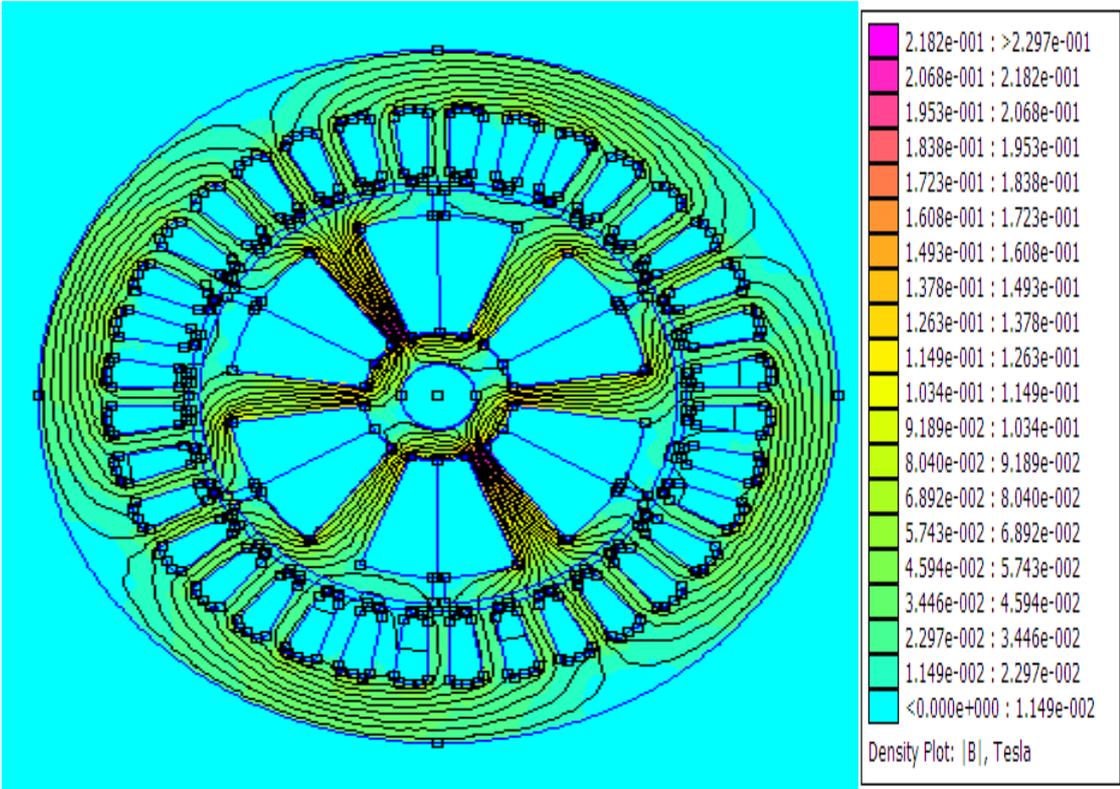
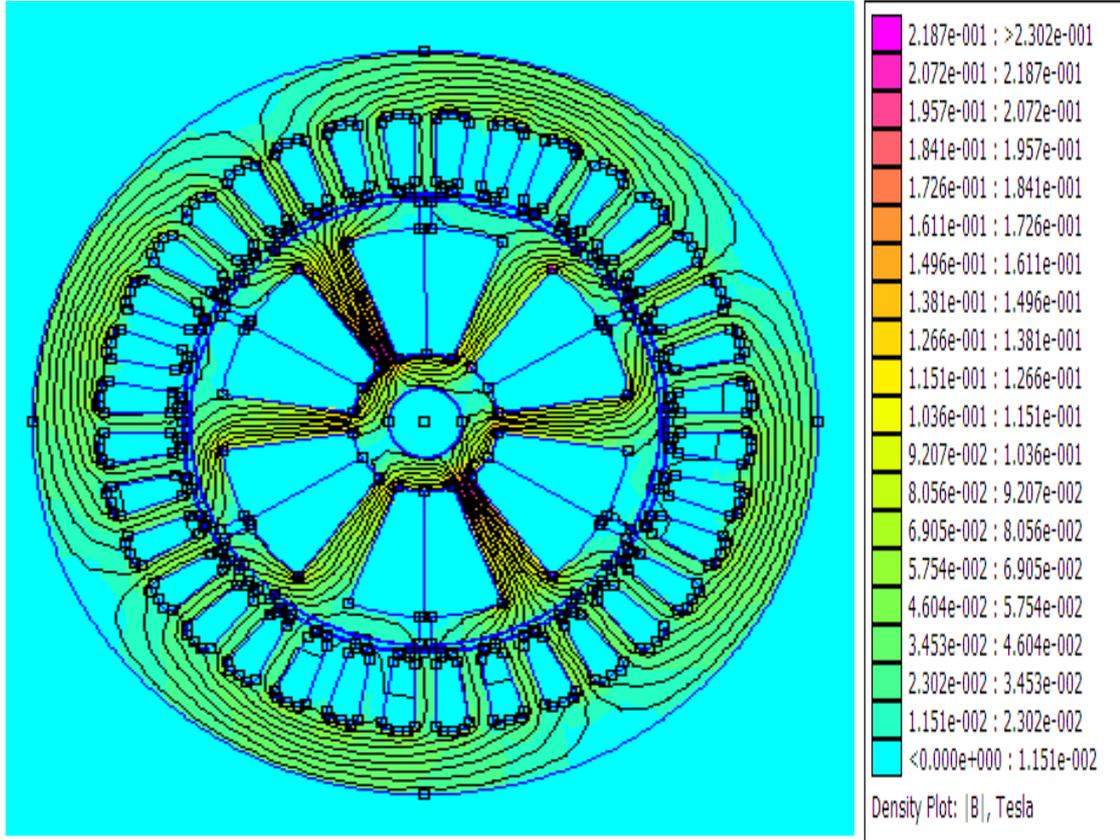


Figure IV.5. Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine doté de SHTc pour  $\theta = 80^\circ$  et pour  $\sigma = 10^{14} \text{ S.m}^{-1}$ ,  $10^{15} \text{ S.m}^{-1}$ ,  $10^{16} \text{ S.m}^{-1}$ .



-a-



-b-

Figure IV.6. Comparaison entre la machine sans (a) et avec (b) SHTc.

Réellement, le supraconducteur utilisé est de type II (voir titre I.5.2). Celui-ci est utilisé dans la région dite intermédiaire. Dans cette région, le supraconducteur se comporte comme un matériau où le champ peut pénétrer partiellement le supraconducteur. En effet, la valeur du champ magnétique à l'intérieur dépasse la valeur limite de champ  $H_{c1}$  qui sépare les deux zones : zone intermédiaire et zone supraconductrice. Pour vérifier ces constatations, nous avons opté à l'utilisation d'un logiciel plus performant et qui peut traiter de façon plus satisfaisante la modélisation des machines électriques, de plus il peut traiter les machines dans le cas de la présence des supraconducteurs de type II. Il s'agit du Flux 2D. Celui-ci doté d'un bloque spécifique à l'étude des supraconducteurs où le modèle en puissance est utilisé pour décrire la relation entre le champ électrique et la densité du courant au sein des supraconducteurs.

#### IV.2.2. Résultats des simulations obtenus à partir du Flux 2D :

De même, nous avons mené une étude comparative entre les résultats de simulation du comportement magnétique de la machine n'ayant pas des SHTc et une machine dotée de matériaux SHTc. Les propriétés géométriques, physiques et magnétiques sont résumées dans le tableau ci-dessous. Sachant que le modèle en puissance a été adopté, il est nécessaire aussi de définir le coefficient  $n$  dans la loi en puissance, la valeur de la densité du courant critique  $J_c$  et enfin la valeur du champ critique  $E_c$ . Ces valeurs ont été extraites à partir de la littérature.

Tableau.IV.2. Propriétés magnétiques, électriques et géométrique de la pastille supraconductrice.

Les propriétés géométriques	Les propriétés électriques	Les propriétés magnétiques
$R_i = 23 \text{ mm}$	$U = 380 \text{ V}$	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$
$R_e = 24.5 \text{ mm}$	$I = 1 \text{ A}$	$\mu = 1 \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$
$d = 1 \text{ mm}$	$P = 450 \text{ W}$	$\mu_r = 1500 \text{ [H.m}^{-1}\text{]}$
	$E_c = 1e^{-4} \text{ v/m}$	
	$J_{c0} = 10^8 \text{ A/mm}^2$	

Afin de mener une étude comparative entre les deux types de machines, nous avons tracé la répartition spatiale du champ d'induction magnétique  $B$  au sein de la machine (Figure IV. 7). Selon les résultats présentés, il est clair que l'implantation des pastilles supraconductrices a augmenté la valeur du champ d'induction magnétique à l'intérieur de la machine. En effet, la valeur maximale du champ d'induction magnétique  $B$  atteinte à l'intérieur de la machine est de 707.61 mT dans le cas de la machine sans SHTc et elle est de 995.41 mT dans le cas de la machine dotée de SHTc.

Pour voir l'effet de cette augmentation du champ d'induction magnétique de la machine sur la valeur du flux rotorique et de l'énergie magnétique rotorique stockée, nous avons présenté la variation temporelle de chacune dans les figures IV.8 et IV.9.

Selon les résultats présentés, nous pouvons dire que le flux rotorique et l'énergie magnétique rotorique augmente avec l'implantation des SHTc.

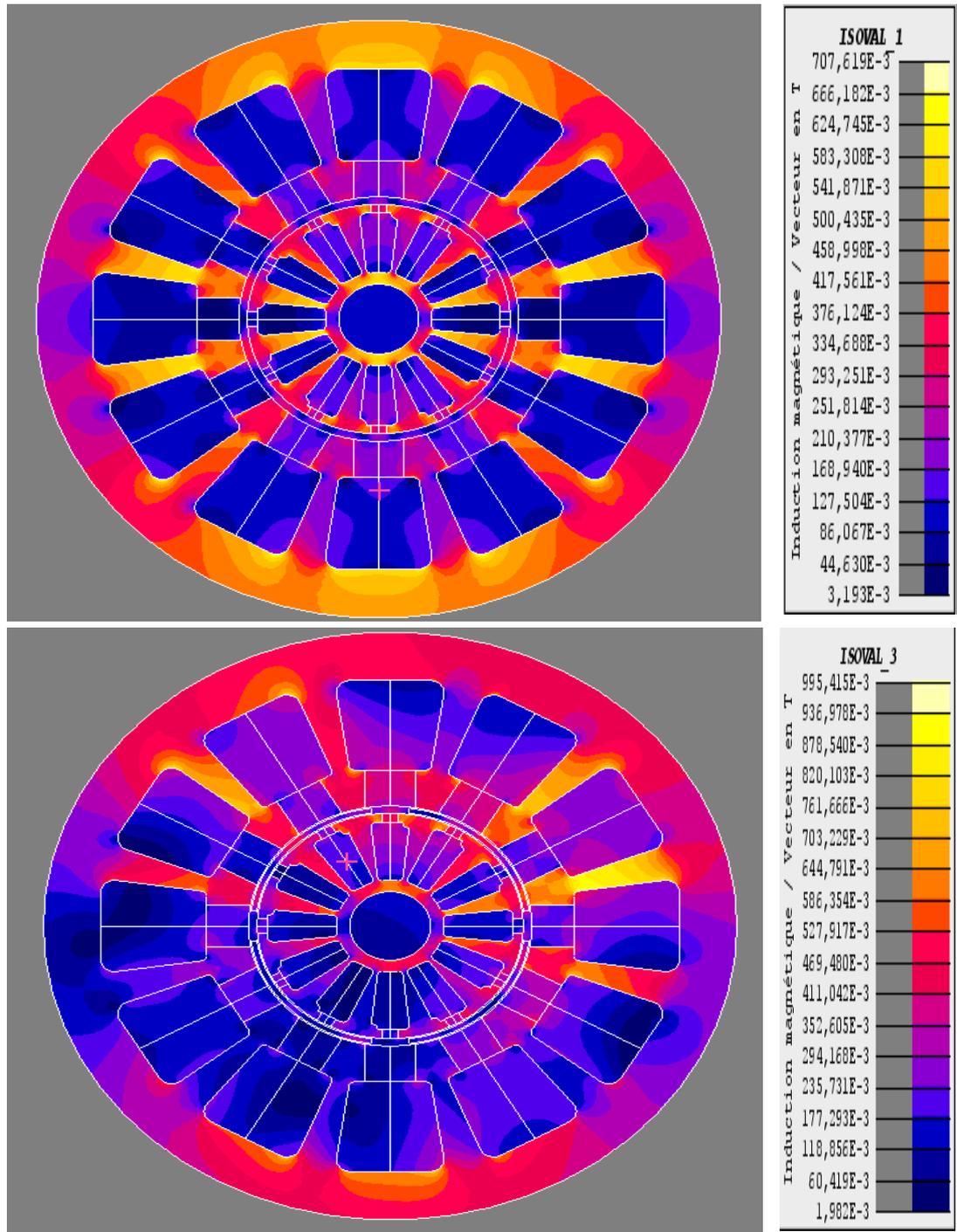


Figure IV.7. Variation spatiale du champ d'induction magnétique B au sein de la machine n'ayant pas de SHTc et la machine doté de SHTc respectivement.

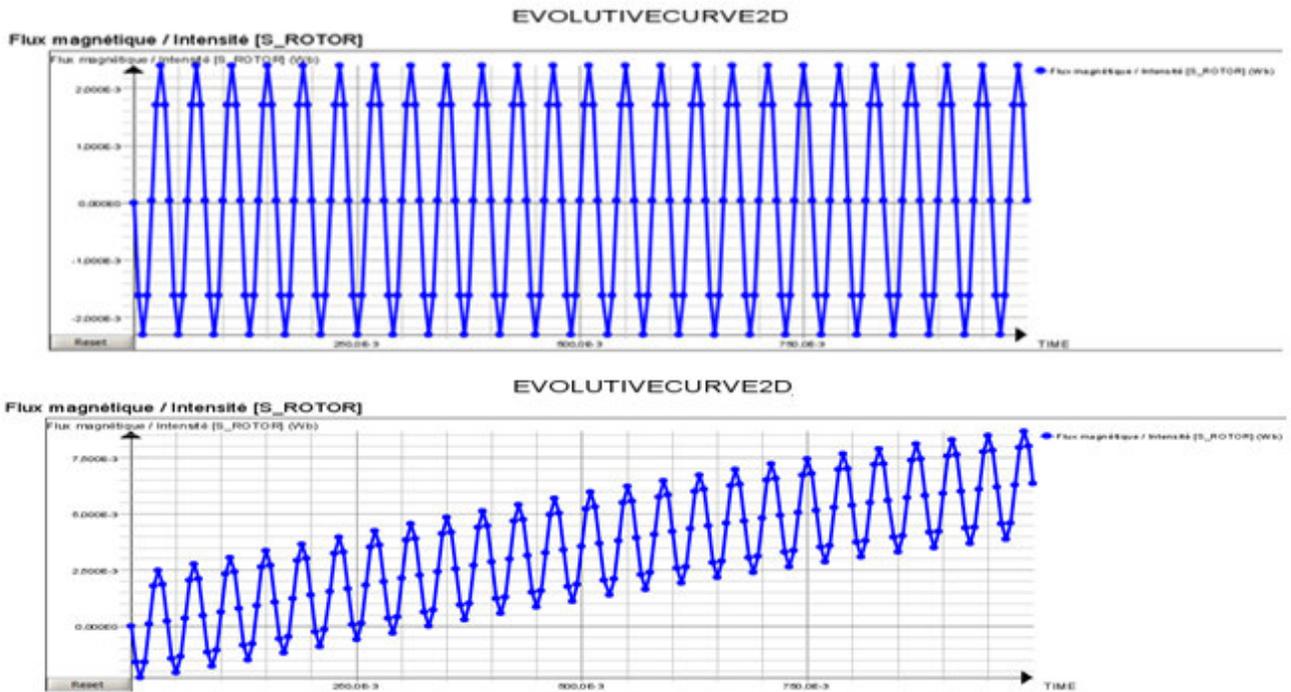


Figure IV.8. Variation temporelle du flux magnétique rotorique de la machine n'ayant pas de SHTc et la machine doté de SHTc respectivement.

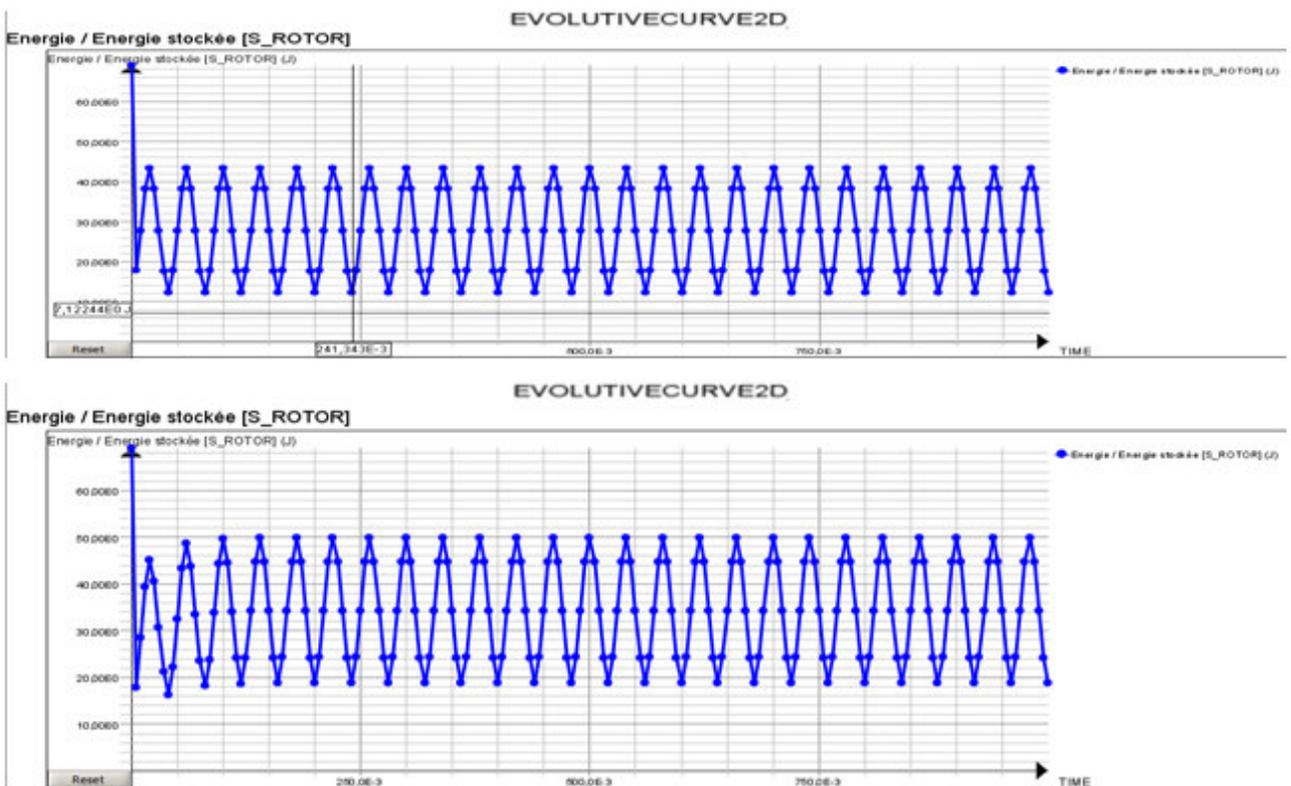


Figure IV.9. Variation temporelle de l'énergie stockée dans le rotor de la machine n'ayant pas de SHTc et la machine doté de SHTc respectivement.

### **IV.3. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation du comportement magnétique d'une machine électrique dotée de supraconducteur à haute température critique, les résultats de simulation ont montré qu'il peut y avoir une augmentation du champ magnétique au sein de la machine dans le cas de la machine ayant des SHTc.

L'outil de simulation FEMM ne permet pas d'obtenir de bons résultats, alors que les résultats obtenus à partir de Flux 2D sont meilleurs. Ceci grâce au programme intégré qui peut traiter des problèmes magnétiques ayant des matériaux diamagnétiques tels que les supraconducteurs à haute température critique.

### Conclusion général

La supraconductivité est un nouvel état de la matière qui mixte de propriétés électriques et magnétiques, leur principales caractéristiques sont :

- La propriété fondamentale est l'absence de résistivité des supraconducteurs, qui évite toute dissipation d'énergie qui permet de gagner la puissance.
- Grâce des matériaux supraconducteurs qui annulé l'effet joule il devient possible de faire passer des grandes densités de courant.
- Une autre propriété fondamentale est le diamagnétisme parfait ou « l'effet Meissner » ; lorsqu'on refroidit un supraconducteur « parfait » placé sous une induction magnétique externe, lorsqu'il passe au dessous de la température critique  $T_c$ , il « expulse le champ magnétique ».

On a conclu aussi l'inconvénient majeur pour les matériaux supraconducteurs reste toujours la température critique qui est très basse.

La découverte de la supraconductivité, ont permis de développer de nombreuses applications, certaines sont déjà couramment utilisées, d'autres très prometteuses en cours de développement. Quelques applications majeures des supraconducteurs sont citées dessous :

- Fabrication de câbles électriques
- Utilisation dans le stockage d'énergie (les SMES)
- Production de limiteurs de courant (dans les centrales électriques - création de moteurs plus compacts etc.)

L'utilisation des matériaux supraconducteurs (SHTC) dans les moteurs ou machines supraconductrice, donne les avantages :

- Ils peuvent créer un champ magnétique dans l'entrefer sans aucune perte.
- Meilleur rendement par rapport à un moteur conventionnel parce que dans ces machines les pertes sont diminuées.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Thèse License « étude des câbles supraconducteurs », préparé par Nasserredine Taibi, université de Biskra, juin 2012.
- [2]. Thèse doctorat « machine synchrone à plot supraconducteur », étude et réalisation, préparé par Hadj Ailam, université Henry Poincaré, Nancy I, juin2006.
- [3]. Thèse master « étude des supraconducteurs à haute température critique », préparé par Sami Chaib, université de Biskra, Juin2006.
- [4]. Travail personnelle « Le moteur asynchrone triphasé », Alain Charbonnel, académie Caen de sciences technologies industrielles, novembre 2009.
- [5]. Thèse de magistère « Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones », Abdelmalek KHEZZAR, Université Mentouri constantine, 2009.
- [6]. Thèse doctorat « étude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs ». Application et réalisation d'une machine électrique de conception originale, université henry Poincaré, Nancy I, Décembre 2002.
- [7]. Thèse doctorat « dimensionnements et essais des moteurs supraconducteurs », université Henry Poincaré Nancy I, préparé par Renaud Moulin.
- [8]. P. Tixador, F.Simon, H. Daffix, and M. Deliglise, « 150 KW Expérimental superconducting Permanent Magnet Motor », IEEE Trans. Appl.Supercond, vol. 9, no. 2, pp. 1205-1208, june1999.
- [9]. P. Tixador, « Superconducting electrical motors », International Journal of Réfrigération, 1999.
- [10]. H. Sugimoto, Z. N. Wang, T. Morishita, Y. Hondou, T. Takeda, and H. Togawa, « Developement of an HTS motor with Ho-123 superconducting field coils at liquid nitrogen temperature », European conference on Appl. Supercond, Eucas2007, Février 2008.
- [11]. Thèse doctorat « étude des systèmes de guidage magnétique a base de supraconducteur HT<sub>C</sub> », préparé par Khaled Ben Alia, université Biskra, Juillet 2013.
- [12]. Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures à géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finies, Thèse de Magister université Batna, Lotfi Khene, 2006.
- [13]. J. P. Nougier, « Méthodes de calcul numérique », 3ème édition, Edition Masson.
- [14]. J. P. Pelletier, 'Techniques numériques appliqués au calcul scientifique, 'Edition Masson et Cie'; pp. 132, 135.
- [15]. N. PISKOUNOV 'CALCUL DIFÉRENTIEL et INTÉGRAL' Edition MIR 1980.

- [16]. Help du logiciel FEMM.
- [17]. Thèse doctorat « Modélisation de matériaux supraconducteurs -application à un limiteur de courant», ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, mars 2006.
- [18]. Thèse magister « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques Application aux moteurs asynchrones», université Mentouri Constantine, 2006.